I. SOKOLOV

# FÜÜSIKA

I OSA

VIII KLASSILE

RK „PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

Prof. I. SOKOLOV

# FÜÜSIKA KURSUS

ESIMENE OSA

## MEHAANIKA

ÕPIK KESKKOOLI VIII KLASSILE

II JAGU



RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS"
TALLINN 1948

# II. Staatika.

## 1. Tungide liitmine ja lahutamine.

**60. Tungi kolm tunnust.** Tungi mõju kehasse avaldub selles, et keha saab kiirenduse või deformeerub, s. o. muudab kuju või mahtu. Deformeerumine on ka seotud kiirendusega, kuid mitte terve keha, vaid osakeste kiirendusega.

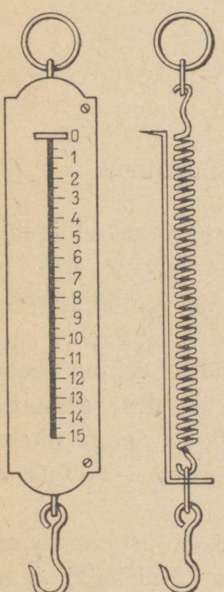
Nagu eespool määratud, on kiirendus vektor; sellepärast ka tungil, mis kiirendust tekitab, on kiirenduse suunaga ühtiv suund. Tähendab, t u n g o n v e k t o r. Seega üheks tungi tunnuseks on tema suund, teiseks tunnuseks — t e m a a r v u l i n e v ä ä r t u s teatavais ühikutes.

Peale nende kahe, iga vektorit iseloomustava tunnuse, on tungile vaja anda veel kolmas tunnus. Kui löögi juures üks keha puudutab teist, siis räägitakse, et tung on rakendatud teise keha mingisse punkti. Vedur paneb vaguni liikuma keti rõnga abil, mis on pandud vaguni konksule: veduri tõmbetung on rakendatud vaguni punkti. Üldse iga tungi jaoks, mis on kehale mõjumas, märgitakse rakenduspunkt.

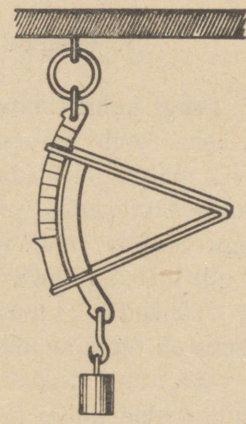
T u n g i r a k e n d u s p u n k t ongi kolmandaks tungi tunnuseks.

Kui kujutatakse tungi graafiliselt vektori kujul, siis vektortungi kujutav lõik saab alguse rakenduspunktist ja tõmmatakse tungi suunas.

Tungi võime mõõta kas kehale antud kiirenduse või temale tekitatud deformatsiooni kaudu. Harilikult toimub tungi mõõtmine deformatsiooni kaudu. Deformeeritavaks kehaks võetakse vedru kas spiraali kujul (joon. 58) või mõnel teisel kujul (joon. 58-a). Deformeeritav vedru gradueeritud skaalaga kannab d ü n a m o m e e t r i ehk t u n g i m õ õ t j a nime.




Joon. 58.



Joon. 58-a. Dünamomeeter.

**60-a. Tasakaalustuvad tungid.** Senini oli meie tähelepanu pühendatud sellistele juhtudele, kus kehade vastastikune mõju kutsus välja liikumise oleku muutuse, teiste sõnadega, kus tung andis kehale kiirenduse. Kuid on võimalikud ka sellised juhud, kus keha tungide mõjul liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt: ühtlaselt püstjoones tõstetav raskus; sirgjoonelisel teeosal ühtlaselt liikuv rong.

Rong võib liikuda ühtlaselt, kuigi temasse üheaegselt mõjuvad mitu tungi: auru surve, rataste ja rööbaste vaheline hõõrdumistung, õhutakistus jts.

Igakord kui keha, mitme tungi mõjumise korral temasse, liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt või on paigal, temasse mõjuvad tungid vastastikku tasakaalustuvad.

Seega vastastikku tasakaalustuvateks tungideks nimetatakse selliseid tunge, mis mõjudes koos ei muuda mõjutatava keha kiirust.

Erijuhul *vastastikku tasakaalustuvateks tungideks on kaks tungi, mis mõjuvad ühte punkti, on võrdsed ja vastassuunalised.*

Seda osa mehaanikast, mis käsitleb tungide tasakaalu tingimusi, nimetatakse staatikaks.

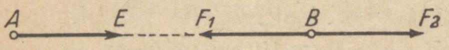
Staatikas jäetakse ära tahke keha tõelised omadused ja kasutatakse nn. ideaalselt kõva keha, s. o. sellist keha, mille kuju ja maht tungide mõjul mitte sugugi ei muutu.

*Kaks võrdset ja vastassuunalist tungi, mõjudes ideaalselt kõvale kehale, tasakaalustuvad mitte ainult siis, kui nad on rakendatud ühes punktis, vaid ka sel juhul, kui nad on rakendatud erinevates punktides ja suunatud ühte sirgjoont pidi.*

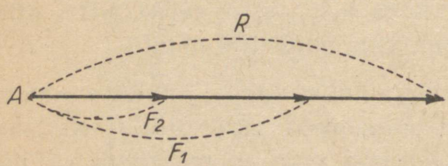
**61. Tungi rakenduspunkti ülekanne tahkes kehas.** Tungi rakenduspunkti võib tungi suunas igasse keha punkti üle kanda. Selles võib veenduda järgmise arutelu kaudu. Mõjugu tahkesse kehasse (joon. 59-a) tung $F_1$, mis on rakendatud punktis $A$. Tungi pikendusel kehas võtame vabalt teise punkti $B$ ja rakendame sellele $AB$ suunas kaks vastupidist tungi $F_1$ ja $F_2$, mõlemad võrdsed tungiga $F$. Uuesti rakendatud tungid hävivad vastastikku ja ei saa muuta tungi $F$ mõju kehasse.

Nüüd mõjuvad kehasse kolm tungi ja avaldavad temasse samasugust mõju mis tung $F$. Nendest kolmest kaks vastassuunalist tungi $F$ ja $F_1$, rakendatud punktides $A$ ja $B$, ei avalda tahke keha muutumatuse tõttu kehasse mingit mõju ja mõjuma jääb $F_2$, kuid nüüd juba rakendatult punktis $B$.

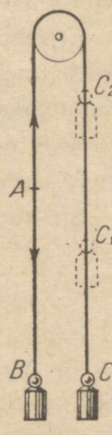
Ülekande reeglit on kerge kontrollida katse abil. Kui visata üle ploki niit (joon. 59-b), otsadesse riputada võrdsed koormused ja ühte neist kanda niidi mitmesugustesse punktidesse, siis vaatamata viimase raskuse asukohale, tungide tasakaal säilib.




Joon. 59-a. Tungi rakenduspunkti ülekanne ühest keha punktist teise.




Joon. 60. Ühel sirgel ja ühes suunas mõjuvate tungide resultant.




Joon. 59-b.

**62. Resultanttung.** Tungide tasakaalu küsimus laheneb kahe tungi puhul lihtsalt. Ka siis, kui kehasse mõjub mitu tungi, on võimalik neid asendada ühega.

*Ühte tungi, mis avaldab kehasse sama mõju kui mitu kehasse rakendatud tungi, nimetatakse nende resultanttungiks. Tunge, mida resultanttung asendab, nimetatakse komponentideks. Resultanttungi leidmist nimetatakse tungide liitmiseks.*

**63. Ühel sirgel ja ühes suunas mõjuvate tungide liitmine.** Mitu poissi tõmbavad kelku ühte nööri pidi; võib küsida, missugust ühte tungi tuleb rakendada samale nöörile, et tekitada samasugust kelgu liikumist. Võtame teise näite: dünamomeetrile on riputatud üksteise järele kolm vihti: 1 kG, 2 kG ja 3 kG.

Küsitakse, missuguse vihi peame riputama kolme endise asemele, et kutsuda välja sama suurt dünamomeetri vedru venitamist?

Esitatud küsimustele on kerge vastata elukogemuste põhjal ja järelikult pole raske leida antud tungide resultanti.

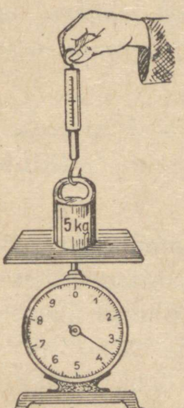
Vaatlustest igal üksikul juhul võib järeldada:

***Ühes punktis ja mööda ühte sirget samasuunaliselt mõjuvate tungide resultant on võrdne komponenttungide summaga, on selle juures rakendatud samasse punkti, mõjub sama sirget mööda ja on samasuunaline.***

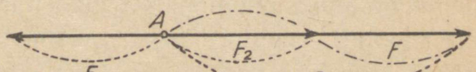
Kui tähistada ühte tungi $F_1$, teist — $F_2$, nende resultanti $R$-ga, (joon. 60) siis:

$$\boxed{R = F_1 + F_2.} \qquad \text{(XII-a)}$$

**64. Ühel sirgel ja vastassuunaliselt mõjuvate tungide liitmine.** Paneme vihi laua-vedrukaalule (surumisega töötav dünamomeeter). Kaalud näitavad vertikaalselt alla suunatud vihi kaalu. Kinnitame vihi külge dünamomeetri ja tõmbame vertikaalselt üles. Vedrukaalud näitavad nüüd tungi, mis on võrdne vihi kaalu ja dünamomeetri näitamise vahega. Kaalude näitamine annab resultanttungi kahele tungile, mis on rakendatud vihile, mõjuvad ühte sir-




Joon. 61. Vastassuunaliste tungide liitmine.




Joon. 62. Ühte sirget mööda ja vastassuunaliselt mõjuvate tungide resultant.

get pidi ja on vastassuunalised (joon. 61). Kuidas ka ei pingutataks ülemist dünamomeetrit (vihi raskuse piirides muidugi), alumine näitab ikka raskuse ja dünamomeetri näitamise vahet.

Ühte sirget mööda ja vastassuunaliselt mõjuvate tungide resultanti võime saada järgmise aruteluga. Olgu (joon. 62) ühes keha punktis $A$ mõjumas ühes suunas tung $F_1$ ja vastupidises $F_2$. Asendame suurema tungi $F_1$ kahe komponendiga, millest ühe võtame võrdsena tungiga $F_2$, aga teise — võrdsena ülejäägiga $F = F_1 - F_2$. Eelmise paragrahvi reegli järgi on mõlemad komponendid $F_2$ ja $F$ suunatud sama sirget mööda ja samale poole, mis tung $F_1$. Peale sellist asendust mõjuvad keha peale punktis $A$ juba kolm tungi: tung $F_2$ ühele poole ning tung $F_2$ ja $F_1 - F_2$ vastupidisele. Kuid § 60-a reegli järgi tungid $F_2$ ja $F_2$ kui võrdsed, vastassuunalised ja ühte punkti rakendatud, hävivad vastastikku ja kõikide antud tungide mõju taandub ühe tungi $F = F_1 - F_2$ mõjule, mis ongi antud tungide resultandiks $R$.

Seega ***kahe ühte punkti ja mööda ühte sirget vastassuunaliselt mõjuva tungi resultant on võrdne nende vahega, on selle juures rakendatud samasse punkti ja mõjub sama sirget mööda suurema tungi suunas.***

$$\boxed{R = F_1 - F_2.} \qquad \text{(XII-b)}$$

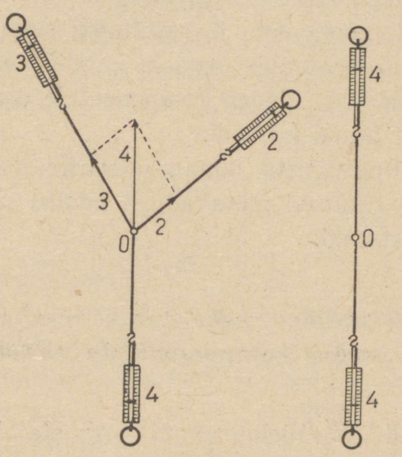
**65. Kehale nurga all mõjuva kahe tungi liitmine (tungide parallelogramm).** Vaatleme juhtu, kus ühte ja samasse kehasse tungid mõjuvad mingi nurga all. Laevasse mõjuvad üheaegselt mootori veotung, vee voolamise tung ja tuule surve. Mäkke tõusvasse traktorisse mõjuvad tema raskus vertikaalselt alla, veotung piki mäenõlva ja hõõrdumistung vastassuunaliselt veotungile jt.

Hoone katusele võivad peale tema raskuse mõjuda katusel oleva lume raskus, mingi nurga all tuule surve jne.

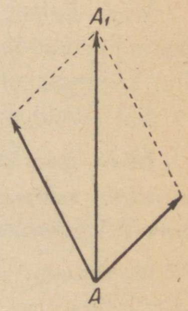
Seega tekib ülesanne liita nurga all kehale mõjuvad tungid.

Lahenduse otsimist algame juhuga, kus kaks tungi mõjuvad ühele kehapunktile.

Katselise uurimise ülesanne seisab selles, et tekitada mingile kehale kaks nurga all mõjuvat tungi, siis asendada need kaks ühe niisugusega, mis tekitaks samasuguse mõju, ja leida seos komponentide ja resultandi suuruste ja suundade vahel.




Joon. 63. Kolme tungi mõju ühele keha punktile.




Joon. 64. Tungide parallelogramm.

Võtame kolm tükki nööri, seome nende ühed otsad ühiseks sõlmeks, aga teised otsad kinnitame kolme dünamomeetri külge; dünamomeetrid ise kinnitame naeltega laua külge vabalt võetud väljavenitustega (joon. 63). Märgime lauale kinnitatud paberile sõlme asendi, kolme niidi suunad ja kolme tungi suurused dünamomeetritelt, näiteks $F_1 = 3$; $F_2 = 2$ ja $F_3 = 4$.

Siis vabastame kaks dünamomeetrit, näiteks esimese ja teise, kinnitame vabanenud niidid ühe dünamomeetri külge (joon. 63) ja venitame teda nii, et kolmas, mittevabanenud dünamomeeter, tema niit ja sõlm võtaksid endise asendi. Märgime niidi suuna ja näitamise $R = 4$ uuesti kinnitatud dünamomeetris. Siis tema vedru venitamise tung mõjutab sõlme samaviisi, kui kahe vabanenud dünamomeetri omadki. Sellepärast võime lugeda tungi $R$ tungidele $F_1$ ja $F_2$ resultanttungiks («võrdselt mõjuvaks»).

Et saada komponentide ja resultandi suundade ja suuruste vahelist seost, võtame laualt dünamomeetrid ja tõmbame paberile läbi sõlme jooned komponentide ja resultandi suunas. Siis kanname kohaselt valitud mastaabis nendele joontele vastavaid tunge kujutavad lõigud. Ühendades komponentide otsad resultandiga, saame joon. 64 antud kujundi.

Võib katset korrata mitmesuguste dünamomeetrite venituste ja suundadega. Täpsed katsed näitavad, et niiviisi saadud kujundid on parallelogrammid.

Siit järeldus:

***Ühes punktis nurga all mõjuva kahe tungi resultanti kujutab suuruse ja suuna poolest komponentidele ehitatud parallelogrammi diagonaal.***

Komponentidele ehitatud parallelogrammi nimetatakse t u n g i d e p a r a l l e l o g r a m m i k s.

Antud vektoritele ehitatud parallelogrammi diagonaali leidmist nimetatakse vektorite liitmiseks, diagonaali ennast aga vektorite g e o m e e t r i l i s e k s summaks.

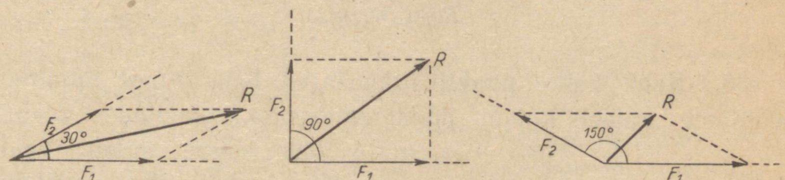
Ei tule segada geomeetrilist summat algebralisega. Meie näitest on näha, et $R = 4$, kuna $F_1 + F_2 = 3 + 2 = 5$. Resultant $R$, kui kolmnurga külg peab alati olema väiksem kahe teise, komponente kujutava külje summast ja suurem nende vahest.

Millest veel, peale komponentide suuruse, sõltub resultandi suurus ja suund?

Leiame resultandi samale kahele tungile $F_1 = 3$ ja $F_2 = 2$ kolmel juhul, kui tungid moodustavad nurgad 30°, 90° ja 150°.

Igal kolmel juhul ehitame resultandi saamiseks komponente kujutavate lõikude peale parallelogrammi, tõmbame tema diagonaali (joon. 65) ja valitud mastaabi järgi mõõdame resultandi suuruse.

Jooniseid omavahel võrreldes leiame, et komponentidevahelise nurga vähenemisega resultant suureneb, nurga suurenemisega — väheneb. Resultant saab oma suurima väärtuse siis, kui komponentidevaheline nurk on null; siis on resultant komponentide summa. Sel juhul mõlemad komponendid mõjuvad ühte sirget mööda ja ühes suunas (vastab tungide liitmise esimesele juhule). Väikseima väärtuse, komponentide vahega




Joon. 65. Resultandi suuruse olenevus komponentidevahelisest nurgast.

võrdse, saab resultant siis, kui komponentidevaheline nurk on 180°, s. o. mõlemad komponendid on mõjumas ühte sirget mööda ja vastassuunaliselt (vastab tungide liitmise teisele juhule).

Seega ühes punktis nurga all mõjuvate tungide komponendi ja resultantide suuruste vahelist olenevust võib avaldada järgmise seosega:

$$\boxed{F_1 + F_2 \geqslant R \geqslant F_1 - F_2,}$$

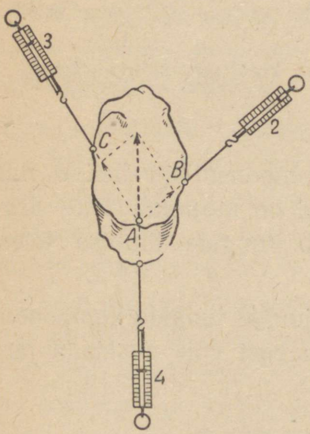
mille juures võrdusmärgid kuuluvad äärmistele, aga võrratuse märgid kõigile ülejäänud juhtudele.

Kolme tungi tasakaalustamisel, nagu näeme joon. 66, võib iga tungipaari võtta komponentidena; siis kolmas on tasakaalustav, s. o. on võrdne ja vastassuunaline esimese kahe resultandiga.

Tehke joon. 66 endale vihku, ehitage parallelogrammid vabalt võetud kahele tungile, silmas pidades mastaapi, ja kontrollige, kas resultant suuruse ja suuna poolest ühtib diagonaaliga. Kui liita kahte täisnurga all seisvat komponenti, siis resultanti saab arvutada Pythagorase teoreemi põhjal. Niiviisi joon. 65 keskmise joonise jaoks

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2$$
$$R^2 = 3^2 + 2^2$$
$$R = \sqrt{13}$$
$$R \approx 3{,}6 \text{ kG.}$$

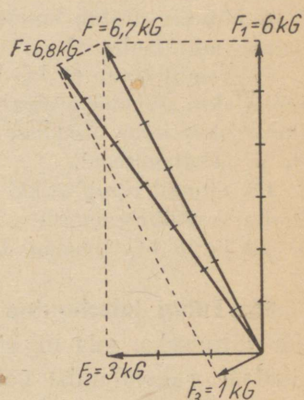
**66. Keha kahte punkti rakendatud kahe tungi liitmine.** Kordame katset kolme dünamomeetriga, kinnitades niidid mitte ühe sõlme külge, vaid papi või vineeri mitmesugustele punktidele (joon. 66). Kui keha nihkub nii, et tungid vastastikku tasakaalustuvad ja keha nihkumine lakkab, siis tuleb märkida kõigi kolme tungi siht. Katsed näitavad, et kõigi kolme tungi sihid lõikuvad ühes punktis; see punkt on tipuks parallelogrammile, mis ehitatakse eespool saadud reegli järgi.



Joon. 66.

Seega, et liita kahte ühes tasapinnas olevat ja keha erinevatesse punktidesse rakendatud tungi, tuleb joonisel kujutada vektor-tungid, pikendada nad lõikumiseni, viia komponentide rakenduspunktid lõikepunkti ja liita nad parallelogrammi reegli põhjal.

**67. Keha peale mõjuva mitme tungi liitmine.** Analüüsime näidet. Paadile mõjuvad kolm tungi: sõudjate tung $F_1 = 6$ kG risti voolule, jõevoolu tung $F_2 = 3$ kG ja tuuletung $F_3 = 1$ kG 45° nurga all voolu suunaga. Leida kolme tungi resultant.



Joon. 67. Kolme komponendi resultandi leidmine.

Kujutame tungid graafiliselt (joon. 67). Kui komponentide arv on kahest suurem, leitakse esiteks mingi kahe tungi resultant $F'$, siis leitakse esimese resultandi $F'$ ja mingi järgmise tungi resultant $F$ jne., kuni pole leitud lõplik resultant.

Resultandi arvulise väärtuse võime leida kas arvutamise teel, või mastaabi järgi; meie näites mastaabi järgi $F = 6,8$ kG.

## *Harjutus 11.*

1) Põrandal seisev kast kaalub 400 kG, tema peale astub inimene raskusega 80 kG. Kui suur on rõhumise tung põrandale?

2) Põrandal seisavad üksteise peal 6 ühesuguse suurusega kasti; kaks alumist kaaluvad à 10 kG, kolm järgmist à 8 kG ja ülemine 6 kG. Kui suur on kõikide raskustungide resultant?

3) Saani veotung horisontaalses suunas peab olema 100 kG. Saani ette on rakendatud teineteise järele kaks hobust, kes annavad horisontaalses suunas tõmmet 40 ja 45 kG. Kui suurt lisatõmmet on tarvis saani ühtlaseks liikumiseks?

4) 88 kG raskune tööline tõmbab üle liikumatu ploki visatud köie abil 48 kG koormat. Missuguse tungiga surub tööline maad?

5) Paati tõmmatakse kahe köie abil, mis moodustavad teineteisega 60° nurga, tungidega à 12 kG. Leida resultant (graafiliselt ja arvutamisega).

Vastus: 20,8 kG.

6) Selgitada graafiliselt resultandi muutumist, kui komponentidevaheline nurk eelmises ülesandes on 45° ja 30°.

7) Millega võrdub kahe võrdse, 120° all mõjuva komponendi resultant?

8) Millega võrdub kolme võrdse, üksteise suhtes 120° all mõjuva komponendi resultant?

9) Traadil ripub 60 kG koormus. Koormuse ülesriputamise kohale kinnitatakse dünamomeeter, ja hoides teda horisontaalselt, tõmmatakse raskus uude asendisse tungiga 20 kG. Leida resultant (graafiliselt ja arvutamisega).

10) Traadil ripub 45 kG koormus. Koormuse ülesriputamise kohale kinnitatakse dünamomeeter, millega tõmmatakse koormust horisondiga 45° all ja 18 kG tungiga. Leida resultant (graafiliselt).

**68. Tungi lahutamine komponentideks.** Leitud reegel tungide liitmiseks, mis mõjuvad ühes punktis ja nurga all, leiab laialdast rakendamist paljude praktiliste ülesannete lahendamisel. Ainult et paljudel juhtudel tuleb lahendada eelmises paragrahvis antud ülesandele vastupidist ja nimelt — tuleb asendada antud tung kahe komponendiga.

Antud tungi järgi tema komponentide leidmist nimetatakse tungide l a h u t a m i s e k s.

Samad katsed, mis olid aluseks kahe tungi asendamisel ühega, näitavad võimalust asendada ühte kahega, ilma et muudetaks selle juures keha peale avaldatavat mõju.

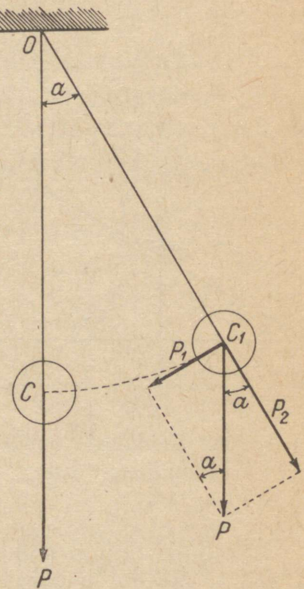
Tungi lahutamine komponentideks toimub üldise vektorilahutamise reegli järgi, mis on antud §-s 43.

Igas üksikus ülesandes (antud tungi lahutamisel teatud komponentideks) peab antud olema kas mõlema komponendi suund, või ühe komponendi suurus ja suund. Sellejuures suundade valik ei tohi olla juhuslik, vaid ära määratud ülesande konkreetsete andmetega.

Vaatleme tungide lahutamist näidetel.

N ä i t e i d. 1. Leida p e n d l i t liikumapanev tung. Joon. 68 kujutab pendlit, mis võngub ümber telje $O$; temale mõjub raskus $P$, mis on rakendatud punktis $C$. Seni kui pendel on sellises asendis, et punktid $C$ ja $O$ asuvad ühel vertikaalil, tungi $P$ mõju hävib toetuspunkti vastumõju tõttu ja pendel seisab paigal.

Kui need punktid aga ei asu ühel vertikaalil, siis raskuse mõju ei hävi toetuspunkti vastumõju tõttu ja pendel hakkab liikuma. Et selgitada missugune tung hakkab pendlit liigutama, on tarvis asendada pendli kaal, mida võtame resultandina, kahe komponendiga. Ühe komponendi suunaks võtame sellise suuna, mida mööda liikumine on ilmselt võimatu, s. o. suuna, mis läbib niidi $OC$ suunas toetuspunkti, aga teise võtame risti esimesega, s. o. pendli trajektori puutujat mööda. Ehitades parallelogrammi antud diagonaali $P$ ja komponentide valitud suundade järgi, leiame komponentide suurused $P_1$ ja $P_2$.



Joon. 68. Pendlit võnkuma panev tung.

Tungi $P_2$ mõju, mille suund läbib toetuspunkti, hävib selle vastumõju tõttu; $P_1$ on pendlit kaart $CC_1$ mööda liigutav tung.

2. Laud pikkusega $l = 2{,}5$ m on tõstetud ühe otsaga kõrgusele $h = 1{,}5$ m. Laual asetseb keha raskusega 60 kG. Leida tung, mis paneb keha mööda kaldpinda alla liikuma (joon. 69).

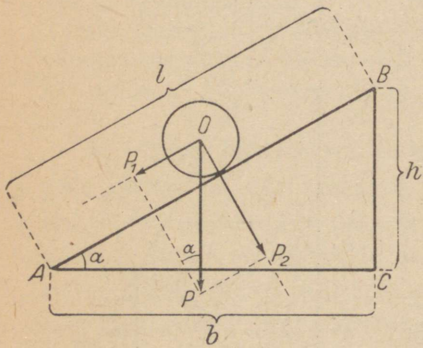
Ühe komponendi suuna võtame kaldpinnaga, s. o. lauaga risti, teise aga — tema pikkusega paralleelselt. Antud tungile ja suundadele ehitatud parallelogrammi küljed annavad komponentide suurused $P_1$ ja $P_2$.

Tung $P_2$ surub pinda; tema mõju hävib laua vastumõju tõttu. Tung $P_1$ on liikumapanevaks tungiks.

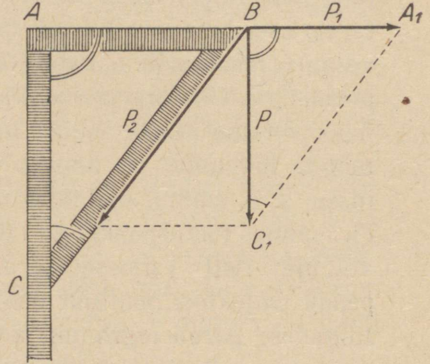
Kolmnurkade $OPP_1$ ja $BAC$ sarnasusest saame: $P_1 : P = BC : AB$; $P_1 : P = h : l$; $P_2 : P = AC : AB$; $P_2 : P = b : l$;

$P_1 = P \cdot \frac{h}{l}$; $P_1 = \frac{60 \cdot 1{,}5}{2{,}5} = 36$; $P_1 = 36$ kG; $b = \sqrt{l^2 - h^2}$;

$$P_2 = P\ \frac{\sqrt{l^2 - h^2}}{l};\ P_2 = 60 \cdot \frac{2}{2{,}5} = 48;\ P_2 = 48 \text{ kG}.$$




Joon. 69. Kaldpinda mööda liikumapanev tung.




Joon. 70. Tõmme ja surve konsteinil.

See näide lubab leida tungi $F$, mis tasakaalustaks liikumapanevat tungi. Sääraseks tungiks peab olema tung, mis on võrdne ja vastassuunaline liikumapaneva tungiga, järelikult,

$F = P_1$ kust $F = P\ \frac{h}{l}$.

***Et hoida keha kaldpinnal paigalolekus või ühtlases liikumises, peab pinnaga paralleelne tung olema nii mitu korda väiksem keha raskusest, kui kaldpinna kõrgus h on väiksem tema pikkusest l.***

Sel alusel kasutatakse kaldpinda raskuste tõstmiseks ja allalaskmiseks. On tarvis näiteks tõsta kasti kaaluga 360 kG maast veokile, kõrgusele 1,2 m. Otsestest tööliste pingutustest tõstmiseks ei piisa. Siis võib võtta tugevaid laudu, asetada nad ühe otsaga veokile, teisega maapinnale ja tõmmata kasti neid laudu mööda. Kui laudade pikkus on umbes 5 m, siis kasti tõstmiseks laudu mööda ilma hõõrdumiseta on vaja tungi, mis kasti raskusest on nii mitu korda väiksem, kui kõrgus on väiksem pikkusest, s. o. 4 korda. Järelikult on küllaldane rakendada 90 kG tungi (ilma hõõrdumiseta).

Raskeid kaste ei lasta käte peal keldrisse, vaid mööda kaldpinda, rakendades nii mitu korda väiksemat kinnipidavat tungi, kui kõrgus on väiksem kaldpinna pikkusest. Majade trepid ja mäeteed ehitatakse väikse tõusuga kaldpinna kujul, et oleks kergem neid mööda koormaga liikuda.

3) Kronsteinil ripub koormus $P = 48$ kG (joon. 70), kronsteini horisontaalne varras $AB = 0,9$ m, vertikaalne — $AC = 1,2$ m. Leida varda $AB$ venitustung ja tung, mis surub varrast $BC$.

Komponentide suundadeks valime $BC$ ja $AB$ pikenduse. Parallelogrammi ehitamisega leiame komponendid $P_1$ ja $P_2$. Tung $P_1$ kutsub esile horisontaalse varda tõmbe ja tung $P_2$ — kaldvarda surve.

Komponentide arvutamiseks võrdleme kahte kolmnurka $ABC$ ja $BA_1C_1$. Nad on sarnased nurkade võrdsuse tõttu, mis on märgitud joonisel ühesuguste märkidega. Sarnastes kolmnurkades on vastavad küljed võrdelised:

$$\frac{BA_1}{AB} = \frac{BC_1}{AC} = \frac{A_1C_1}{BC}.$$

$BC_1$ kujutab keha kaalu $P$, $BA_1$ — komponenti $P_1$ ning $A_1C_1$ on võrdne ja paralleelne komponendiga $P_2$:

$$\frac{P_1}{AB} = \frac{P}{AC} = \frac{P_2}{BC}.$$

Esimesest võrdest arvutame:

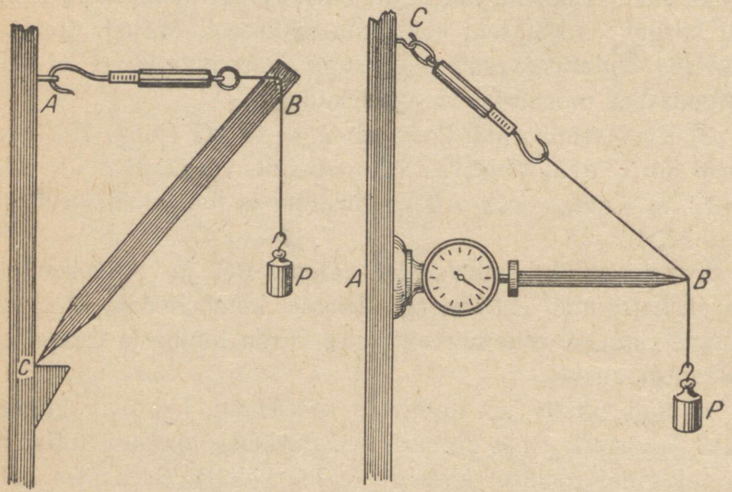
$$P_1 = \frac{P \cdot AB}{AC}; \; P_1 = \frac{48 \cdot 0,9}{1,2} = 36; \; P_1 = 36 \text{ kG}.$$

Teisest võrdest leiame:

$$P_2 = \frac{P \cdot BC}{AC}; \text{ aga } BC = \sqrt{AB^2 + AC^2} = 1{,}5 \text{ ja}$$

$$P_2 = \frac{48 \cdot 1{,}5}{1{,}2} = 60; \; P_2 = 60 \text{ kG}.$$

Arvutusi võime kontrollida katseliselt, nagu on näidatud joon. 71.



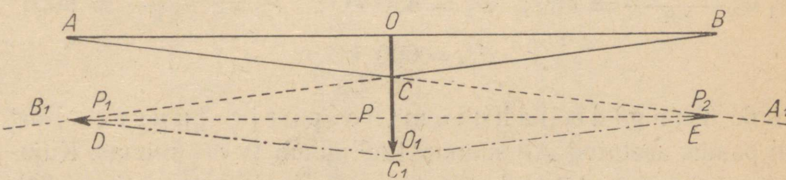

Joon. 71. Põikpuule ja kaldpuule mõjuvate tungide mõõtmine.

4. 20 meetri pikkuse trossi keskel ripub latern kaaluga $P = 20$ kG. Trossi paindekõrgus $OC$ on võrdne $h = 0{,}1$ m. Leida trossi pinge (joon. 72).

Et saada tunge, mis tekitavad trossi pinget, lahutame laterna kaalu suundades $CB_1$ ja $CA_1$, mis kujutavad trossi osade pikendusi. Rombi $CDC_1E$ küljed $CD$ ja $CE$ annavad komponendid $P_1$ ja $P_2$, mis põhjustavad pinget trossi osades. Nende võrdsete komponentide arvutamiseks tõmbame rombi teise diagonaali ja vaatleme kolmnurki $AOC$ ja $CO_1E$. Nad on sarnased nurkade võrdsuse tõttu. Kolmnurkade sarnasusest järgneb:

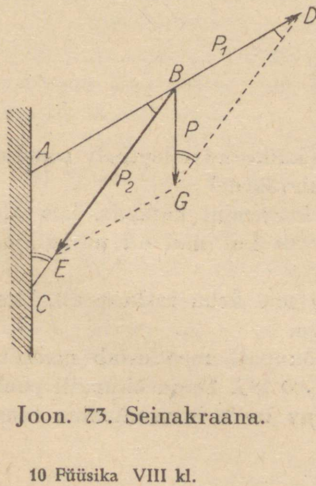
$$\frac{CE}{CO_1} = \frac{AC}{CO}; \quad CE = \frac{CO_1 \cdot AC}{CO}; \quad CO_1 = \frac{P}{2} = 10 \text{ kG},$$

$$CE = \frac{10 \cdot 10}{0,1} = 1000 \text{ kG}.$$

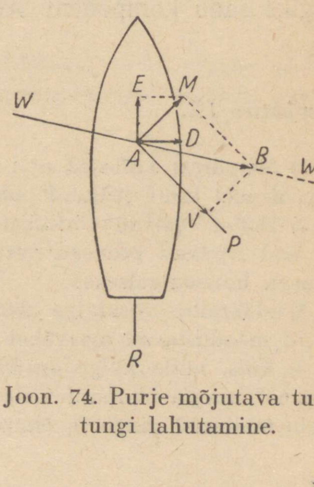



Joon. 72. Trossi pinge.

5. Seinakraana $ABC$ abil tõstetakse üles koormus $P = 300$ kG. Pingevarras $AB = 2,7$ m, tugi $BC = 3,6$ m, $AC = 1,8$ m (joon. 73). Leida pingevarda $AB$ tõmbetung ja surve toele $BC$.




Joon. 73. Seinakraana.




Joon. 74. Purje mõjutava tuule tungi lahutamine.

Kolmnurgad $ABC$ ja $BDG$ on sarnased, kuna neil on võrdsed nurgad, mis on märgitud joonisel ühesuguste märkidega. Kolmnurkade sarnasusest järgneb külgede võrdelisus:

$$\frac{DC}{BC} = \frac{BG}{AC} = \frac{BD}{AB}; \quad DG = P_2; \quad BG = P; \quad BD = P_1;$$

$$\frac{P_2}{BC} = \frac{P}{AC} = \frac{P_1}{AB}; \quad P_1 = \frac{P \cdot AB}{AC}; \quad P_2 = \frac{P \cdot BC}{AC};$$

$$P_1 = \frac{3000 \cdot 2{,}7}{1{,}8} = 450; \quad P_1 = 450 \text{ kG}; \quad P_2 = \frac{300 \cdot 3{,}6}{1{,}8} = 600;$$

$$P_2 = 600 \text{ kG}.$$

6. T u n g i d e  l a h u t a m i n e  p u r j e  j u u r e s. Puri on paadis asetatud $AP$ suunas, tuul puhub $WW_1$ suunas. Kujutame vektoriga $AB$ tuule surve purjele tuule suunas (joon. 74).

Et saada tungi, mis paneb liikuma paati ninaga ees, lahutame algul tuule survetungi $AB$ kaheks komponendiks: $AV$ — piki purje ja $AM$ — risti purje pinnaga. Komponent $AV$, libisedes piki purje, ei pane paati liikuma. Komponent $AM$ tervikuna samuti ei suuda liigutada paati pära — nina sihis. Kuid seda viimast võib uuesti komponentideks lahutada ja saada $AE$ — piki paati ja $AD$ põiki paati. Liikumapanevaks tungiks saab komponent $AE$.

***Harjutus 12.***

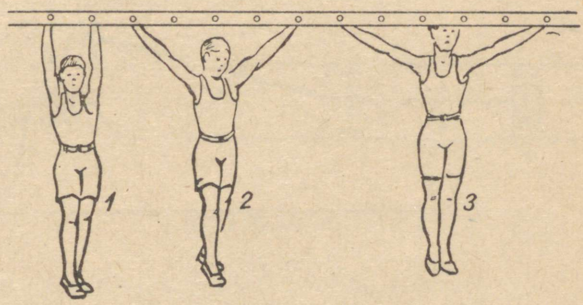
1) Mispärast kiilasjää ajal mõnikord katkevad telegraafi traadid, kuigi nendel lasuv jääkord pole nimetamisväärne?

2) Millal võivad võrkkiige nöörid kergemini katkeda, kas siis, kui nad ripuvad peaaegu vertikaalselt, või kui nad on pingutatud peaaegu horisontaalseks?

3) Määrake võrkkiige nööride pinge teie keha raskuse all, kui nöörid moodustavad omavahel 120° nurga.

4) Köis, mille külge on kinnitatud õhupall, moodustab maapinnaga 60° nurga. Õhupalli tõstetung on 1000 kG. Leida õhupalli poolt köiele tekitatud pinge ja õhupallile mõjuv tuule horisontaalne tung.

5) Kolm poissi, igaüks kaaluga 45 kG, ripuvad käsipidi horisontaalse redeli küljes, nii nagu näidatud joon. 75. Esimese käed on paralleelsed, teise käed moodustavad 90° nurga, ja kolmanda omad — 120° nurga. Leida iga poisi käte pinge.




Joon. 75. 5-nda ülesande juurde.

6) Vaati hoitakse kaldpinnal nööriga, mis moodustab kaldpinnaga 45° nurga. Kujutada kõikide tungide vektorid ja seletada, milles seisab iga tungi toime.

7) 2,25 m pikkusega ja 1,35 kõrgusega kaldpinnal asetseb kera kaaluga 90 kG. Kui suurt kaldpinnaga paralleelset tungi on tarvis rakendada kerale, et takistada tema allaveeremist?

Vastus: 54 kG.

8) Kera kaaluga 48 kG asetseb kaldpinnal, mille pikkus on 5 m ja kõrgus 3 m. Leida tung, mis paneb kera liikuma ja tung, millega kera surub kaldpinda.

Vastus: 28,8 kG; 38,4 kG.

9) Elektrilamp on laua kohal riputatud traadi külge. Kõrvale tõmbab teda horisontaalne nöör. Lambi kaal $P = 0{,}8$ kG, traat moodustab horisondiga 60° nurga. Leida traadi ja nööri pinged

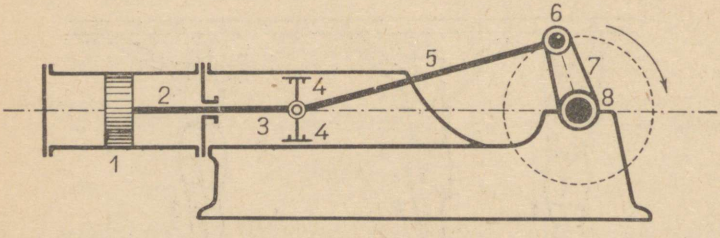
Vastus: $\approx$ 0,92 kG; $\approx$ 0,46 kG.

10) Trammi juhe on riputatud kahele postile trossi abil. Postide vahe on (sirget mööda) 20 m. Paindekõrgus $h = 0{,}2$ m. Tung, millega juhe mõjub enda raskuse tõttu ülesriputamise punktis, on 17,8 kG. Leida trossi pinge.

Vastus: 445 kG.

11) Aurumasina kolvi pind $S = 300$ cm$^2$; auru rõhk $p = 10$ kG/cm$^2$. Leida kepsu (5) pidi mõjuv tung ja tung juhtijale (4), kui keps (5) moodustab kolvi varrega (3) nurga 150° (joon. 76).

Vastus: 3464 kG; 1732 kG.




Joon. 76.

12) 9 kG latern on riputatud kronsteinile $ABC$. Horisontaalne varb $AB = 1{,}2$ m, kaldvarb $BC = 1{,}5$ m. Punkt $C$ on seinal $A$-st kõrgemal. Leida tung, mis surub varba $Ab$, ja varva $BC$ tõmbetung.

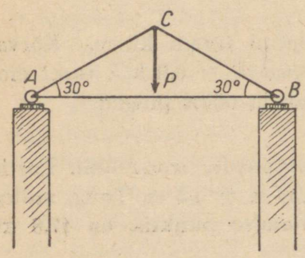
Vastus: 12 kG; 15 kG.

13) 18 kG latern on riputatud postil kandetoele $ACB$. Horisontaalse varva pikkus $AB = 96$ cm; toe (kaldvarva) pikkus $BC = 120$ cm Punkt $A$ on postil kõrgemal kui punkt $C$. Leida varva $AB$ tõmbetung ja tung, mis surub varba $BC$.

Vastus: 24 ja 30 kG.

14) Seinakraana pingevarras $AB$ on 2,5 m; pingevarda ja toe otsade kaugus seina mööda on $AC = 1$ m. Kraana otsas ripub koormus 960 kG. Leida pingevarda tõmbetung ja surve toele.

Vastus: 2400 kG; 2690 kG.




Joon. 77.

15) Sarikas moodustab horisontaalse talaga $AB$ nurga 30° (joon. 77). Sarikate lõikepunkti on riputatud koormus $P = 10\,000$ kG. Määrata tala venitus $P_1$ ja surve seinale $P_2$.

Vastus: 8 650 kG; 5 000 kG.

16) Auto jäi porri kinni. Et teda välja tõmmata, sidus autojuht kõva köie ühe otsa auto külge ja teise 12 m kaugusel seisva puu külge. Siis ta surus risti köie keskpaika 40 kG tungiga ja liikus edasi 60 cm võrra. Oletades, et köis ei veninud, määrata sel momendil autosse mõjuv tung.

Vastus: 200 kG.

**Kirjandus.** Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I, статьи: „Парусное судоходство", стр. 84; „Аэроплан", стр. 87. Жабров, Летательные машины.

## *KONTROLLKÜSIMUSI.*

1) Mida nimetatakse tasakaalustavaks tungiks?

2) Millal kaks tungi teineteist vastastikku tasakaalustavad?

3) Missugune omadus antakse kõvale kehale staatikas?

4) Kuidas võib kõvas kehas raskuspunkti ümber asetada?

5) Mida nimetatakse resultandiks? komponentideks?

6) Millega võrdub kahe ühes keha punktis ja ühes suunas mõjuva tungi resultant? vastassuunas?

7 Millega võrdub kahe ühes keha punktis nurga all mõjuva tungi resultant?

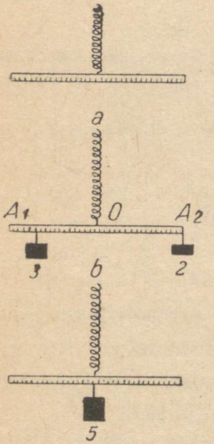
8) Kuidas oleneb resultant komponentidevahelisest nurgast?

9) Kuidas leida mitme ühes kehas mõjuva tungi resultant?

**69. Ühesuunaliste paralleelsete tungide liitmine.** Paljudel juhtudel võib kohata mingi tahke keha peale mõjuvate paralleelsete tungide liitmise ülesannet (mitme hobuse paralleelne rakendus põllutöömasina ette, tahke keha peale asetatud mitme koormuse mõju jne.).

Et tuletada katseliselt ühesuunaliste paralleelsete tungide liitmise reeglit, riputame kerge sirge joonlaua vedru abil naela otsa, mis on löödud vertikaalselt asetseva ja millimeetripaberiga ületõmmatud tahvli külge. Joonlaud asetsegu horisontaalselt.

Joonlauale asetatud aasadele riputame kaks mingit koormust ja nihutame aasasid niikaua, kuni joonlaud võtab horisontaalse seisu. Kirjutame üles vasaku ja parema koormuse $F_1$ ja $F_2$ suurused ja märgime ära, missuguse jaotuse juures millimeetripaberil joonlaud seisab. Siis võtame mõlemad koormused ära ja riputame kolmandale aasale ühe sellise koormuse, mis viiks joonlaua samasse asendisse, mis tal oli kahe koormusega.



Joon. 78. Paralleelsete tungide resultandi leidmine.

Silmanähtavalt tung, millega mõjub üks koormus joonlauale, on resultandiks kahele tungile, millega mõjutavad joonlauda kaks koormust.

Kirjutame üles resultandi R suuruse ja tema rakenduspunkti O kaugused resultantide $F_1$ ja $F_2$ rakenduspunktidest $A_1$ ja $A_2$, $A_1O$ ja $A_2O$ (joon. 78). Kordame mõõtmisi mitmesuguste koormustega, riputades neid joonlaua mitmesugustele kohtadele, ja igakord teeme eespool nimetatud üleskirjutused.

Katse lõpul koostatakse tabel sarnaselt allpool tooduga.

| $F_1$ | $F_2$ | $R$ | $A_1O$ | $A_2O$ | $F_1 \cdot A_1O$ | $F_2 \cdot A_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 6 | 50 | 10 | 50 | 50 |
| 9 | 6 | 15 | 24 | 36 | 216 | 216 |
| 4 | 2 | 6 | 20 | 40 | 80 | 80 |
| 5 | 3 | 8 | 22 | 37 | 110 | 111 |
| 3 | 1 | 4 | 15 | 44 | 45 | 44 |
| 7 | 13 | 20 | 39 | 21 | 273 | 273 |
| 11 | 4 | 15 | 16 | 44 | 176 | 176 |

Resultandi suuruse annab kolmas veerg. Temast näeme, et resultant on komponentide summa. Resultant on paralleelne ja samasuunaline komponentidega. Komponentide rakenduspunktide asukohad $A_1$ ja $A_2$ annavad neljanda ja viienda veeru.

Kuuendasse ja seitsmendasse on paigutatud tungide korrutised nende rakenduspunktide kaugustega resultandi rakenduspunktist. Need korrutised on igas katses omavahel võrdsed. Kui kahe suuruse vastavate väärtuste korrutised on võrdsed, siis nimetatakse neid suurusi pöördvõrdelisteks. Seega komponendid $F_1$ ja $F_2$ ja kaugused $A_1O$ ja $A_2O$ on pöördvõrdelised.

Kõigest sellest järgneb paralleelsete tungide liitmise reegel:

1. ***Kahe ühesuunalise ja paralleelse tungi resultant on samasuunaline, nendega paralleelne ja võrdne nende summaga:***

$$\boxed{F_1 \parallel R \parallel F_2;} \qquad \boxed{R = F_1 + F_2.} \qquad \text{(XIII-a)}$$

2. ***Resultandi rakenduspunkt jagab komponentide rakenduspunktide kauguse tungidega pöördvõrdelisteks lõikudeks:***

$$\boxed{F_1 \cdot A_1O = F_2 \cdot A_2O.} \qquad \text{(XIII-b)}$$



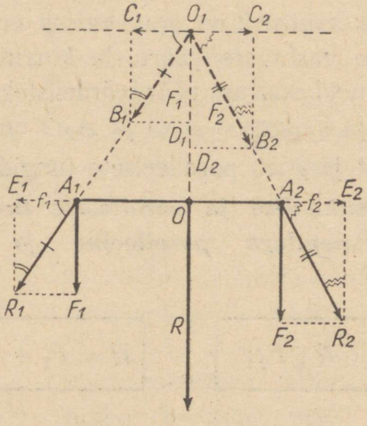
Ühesuunaliste paralleelsete tungide liitmise reeglit võib tuletada teoreetiliselt.

Olgu mingile tahkele kehale rakendatud kaks paralleelset tungi: punktis $A_1$ tung $F_1$ ja punktis $A_2$ tung $F_2$ (joon. 79).

Kuna tunneme ühesse punktisse nurga all mõjuvate tungide liitmise reeglit, siis tuleb antud juhtum viia sellele juhule.

Selle eesmärgiga rakendame punktidesse $A_1$ ja $A_2$ $A_1A_2$ pikenduse sihis kaks võrdset ja vastassuunalist tungi $f_1$ ja $f_2$. Kaks säärast tungi § 60-a põhjal tasakaalustuvad vastastikku. Järelikult nelja tungi $F_1$, $F_2$, $f_1$ ja $f_2$ mõju kehale on sama, mis endise kahegi. Samuti võime ilma tungide mõju kehale muutmata asendada $F_1$ ja $f_1$ resultandiga $R_1$ ja $F_2$ ja $f_2$ — resultandiga $R_2$ ja kanda mõlemad resultandid keha punkti $O_1$ asendisse $O_1B_1$ ($O_1B_1 = R_1$) ja $O_1B_2$ ($O_1B_2 = R_2$). Punkt $O_1$ on resultantide pikenduste lõikepunkt.

Punktis $O_1$ lahutame jällegi iga endise resultandi kaheks komponendiks, suundades: $C_1C_2$ paralleelselt $A_1A_2$-ga ja $O_1O$ paralleelselt $F_1$ ja $F_2$-ga, mille tõttu kõikide tungide lõplik mõju jääb muutumatuks.




Joon. 79. Kahe paralleelse ja ühesuunalise tungi liitmine.

Kolmnurgad $O_1C_1B_1$ ja $A_1E_1R_1$, $O_1C_2B_2$ ja $A_2E_2R_2$ on vastavalt võrdsed, järelikult $O_1C_1 = f_1$, $B_1C_1 = F_1 = O_1D_1$, $O_1C_2 = f_2$; $B_2C_2 = F_2 = O_1D_2$.

Tungid $f_1$ ja $f_2$ tasakaalustuvad vastastikku ja kogu mõju jääb samadele tungidele $F_1$ ja $F_2$, ainult nüüd juba rakendatult ühte punkti ühte sirget mööda samale poole.

Nende resultant on võrdne nende summaga ($R = F_1 + F_2$), on rööbik ja sama suunaga kui antudki tungid.

Resultandi rakenduspunkti võime viia punkti $O$, mis on resultandi pikenduse ja komponentide rakenduspunktide ühendusjoone lõikepunkt. Selle punkti asukoha võime määrata sarnastest kolmnurkadest:

$$O_1B_1D_1 \text{ ja } A_1O_1O; \quad O_1B_2D_2 \text{ ja } A_2O_1O.$$

Nendest:

$$\frac{O_1D_1}{B_1D_1} = \frac{O_1O}{A_1O}; \quad \frac{O_1D_2}{B_2D_2} = \frac{O_1O}{A_2O};$$

$$O_1D_1 = F_1; \; O_1D_2 = F_2; \; B_1D_1 = B_2D_2.$$

Võrduste jagamisel saame:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_2O}{A_1O}.$$

Kui on tarvis leida resultanti paljudele paralleelsetele tungidele, mis mõjutavad ühte ja sama tahket keha, siis tuleb alguses liita saadud reegli kaks paralleelset tungi, selle järel saadud resultandile kolmas tung jne.

Näiteid. 1. Kehale (joon. 80) mõjuvad kaks paralleelselt ja ühteviisi suunatud tungi $F_1 = 4$ kG ja $F_2 = 5$ kG; nende rakenduspunktide kaugus $A_1A_2 = 36$ cm. Leida nende resultant:

$$F_1 \parallel R \parallel F_2; \quad R = F_1 + F_2 = 4 \text{ kG} + 5 \text{ kG} = 9 \text{ kG}.$$

Et leida resultandi rakenduspunkti, tähistame tema kauguse $A_1O$ ühest komponendi rakenduspunktist $A_1$ $x$-ga; siis kaugus teise komponendini $A_2O = 36 - x$ ja $F_1x = F_2\ (36 - x)$; $4x = 5\ (36 - x)$; $4x = 180 - 5x$; $9x = 180$; $x = 20$ cm.

2. Kehasse mõjub kaks paralleelset ja samasuunalist tungi: $F_1 = 5$ kG ja $F_2 = 7$ kG. Resultandi rakenduspunkt seisab tungi $F_1$ rakenduspunktist $A_1$ 35 cm kaugusel. Leida resultandi suurus ja komponentide rakenduspunktide kaugus $A_1A_2$:

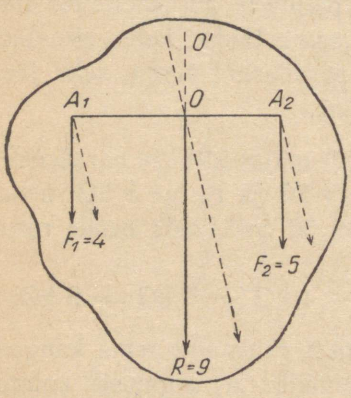
$$R = F_1 + F_2; \quad R = 5 \text{ kG} + 7 \text{ kG} = 12 \text{ kG}.$$

Tähistame kauguse $A_1A_2$ $x$-ga; on antud, et $A_1O = 35$, siis $A_2O = x - 35$. Kuid $F_1 \cdot A_1O = F_2 \cdot A_2O$; $5 \cdot 35 = 7\ (x - 35)$; $175 = 7x - 245$; $7x = 420$; $x = 60$ cm.

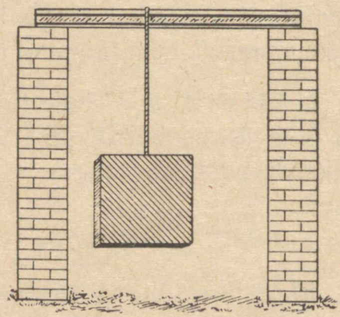
**70. Paralleelsete tungide keskpunkt.** Paralleelsete tungide resultandi rakenduspunkt, mis on leitud eespool antud reegli järgi resultantide rakenduspunkte ühendaval joonel, nimetatakse p a r a l l e e l s e t e  t u n g i d e  k e s k p u n k t i k s.

Paralleelsete tungide keskpunkt O säilitab oma asukoha kehas, kui kõik paralleelsed tungid muudavad oma suunda (punktiirjooned joonisel 80).

Kui kanda resultandi rakenduspunkt paralleelsete tungide keskpunktist mingisse punkti $O_1$ resultandi suunas, siis tungide




Joon. 80. Punkt *O* — paralleelsete tungide keskpunkt.



Joon. 81. Tala surve sammastele.

suundade muutudes ei või enam sinna kanda paralleelsete tungide resultandi rakenduspunkti. Ainult paralleelsete tungide keskpunkti asukoht ei olene nende suunast.

**71. Tungi lahutamine kaheks paralleelseks komponendiks.** Tungi lahutamisel kaheks paralleelseks komponendiks võib anda kas mõlema komponendi rakenduspunktide asukohad või ühe komponendi suuruse ühes selle rakenduspunktiga.

N ä i t e i d. 1. 4,5 m pikkune tala toetub otsadega kahele sambale; vasakust sambast 2 m kaugusel ripub 540 kG koormus. Leida koormuse rõhumise tungid sammastele (joon. 81).

Koormuse rõhumise tungid sammastele on vertikaalsed ja järelikult koormuse raskustungiga paralleelsed. Nende summa peab olema võrdne koormuse kaaluga. Kui tähistada rõhumise tungi vasakpoolsele sambale $x$ kG, siis parempoolsele on see 500 kG — $x$ kG. Nende tungide kui komponentide kohta kehtib järgmine võrdus:

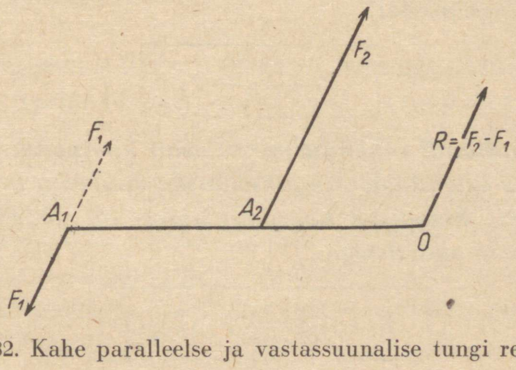
$2 \cdot x = 2{,}5\ (540 - x)$; $20x = 13\,500 - 25x$; $45x = 13\,500$; $x = 300$; $F = 300$ kG; $F_1 = 540$ kG $-$ 300 kG $=$ 240 kG.

2. 500 kG tung lahutada kaheks paralleelseks komponendiks, millest üks on 240 kG ja rakendatud 1,44 m kaugusele resultandi (antud tungi) rakenduspunktist.

Ülesanne viib teise tungi suuruse ja selle rakenduspunkti leidmisele. Otsitava tungi rakenduspunkt asub antud tungi ja esimese komponendi rakenduspunktide ühendussirgel. Otsitava komponendi suurus $F_1 = 600$ kG $-$ 240 kG $=$ 360 kG. Tähistame tema rakenduspunkti kauguse antud tungi rakenduspunktist $x$-ga. Siis

$$1{,}44 \cdot 240 = 360 \cdot x; \quad x = 0{,}96 \text{ m}.$$

**72. Kahe paralleelse ja vastassuunalise tungi liitmine.** Tahkele kehale mõjuvad kaks paralleelset ja vastassuunalist tungi $F_1$ ja $F_2$, mis on rakendatud punktides $A_1$ ja $A_2$ (joon. 82).




Joon. 82. Kahe paralleelse ja vastassuunalise tungi resultant.

Lahutame suurema tungi $F_2$ kaheks komponendiks, millest üks oleks võrdne tungiga $F_1$ ja rakendatud temaga samasse punkti $A_1$; siis teine on võrdne vahega $F_2—F_1$ ja on rakendatud teiselpool tungi $F_2$ olevasse punkti $O$. $O$ asukohta meie esialgu ei tea. Peale säärast lahutamist mõjub kehale kahe antud tungi $F_1$ ja $F_2$ asemel kolm tungi: $F_1$, $F_1$ ja $F_2 — F_1$. Kuid $F_1$ ja $F_1$ on rakendatud ühte punkti, on vastassuunalised ja võrdsed ja sellepärast vastastikku hävivad ning kõikide tungide mõju kujuneb ühe tungi $F_2 — F_1$ mõjuks, mis on rakendatud punkti $O$. Seega tung $R = F_2 — F_1$ on kahe antud tungi $F_1$ ja $F_2$ resultandiks.

Et määrata tema rakenduspunkti asukohta, meenutame, et tungi $F_2$ kaheks komponendiks $F_1$ ja $F_2 — F_1$ lahutamise reegli põhjal peame saama võrdused:

$$F_1 \cdot A_1A_2 = (F_2 — F_1) \cdot A_2O;$$

$$F_1 \cdot A_1A_2 = F_2 \cdot A_2O — F_1 \cdot A_2O;$$

$$F_1 \cdot A_1A_2 + F_1 \cdot A_2O = F_2 \cdot A_2O;$$

$$F_1 (A_1A_2 + A_2O) = F_2 \cdot A_2O,$$

kuid $A_1A_2 + A_2O = A_1O$; siis $F_1 \cdot A_1O = F_2 \cdot A_2O$.

Siit järeldus:

***1) Kahe paralleelse ja vastassuunalise tungi resultant on võrdne nende vahega, on nendega paralleelne ja suunatud suurema tungi poole:***

$$\boxed{R = F_2 — F_1.} \qquad \text{(XIV-a)}$$

***2) Resultandi rakenduspunkt asub komponentide rakenduspunktide ühendusjoone pikendusel, suurema komponendi taga, ja tema kaugused komponentidest on pöördvõrdelised komponentide suurustega:***

$$\boxed{F_1 \cdot A_1O = F_2 \cdot A_2O.} \qquad \text{(XIV-b)}$$

N ä i d e. Kehasse on rakendatud kaks paralleelset ja vastassuunalist tungi $F_1 = 6$ kG ja $F_2 = 10$ kG (joon. 82). Nende tungide rakenduspunktide kaugus on 36 cm. Leida resultant.

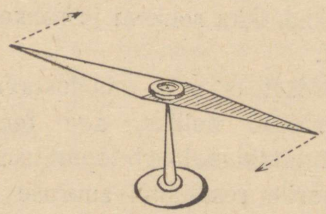
Resultant $R = F_2 - F_1 = 10 \text{ kG} - 6 \text{ kG} = 4$ kG; ta on komponentidega paralleelne, suunatud suurema poole ja rakendatud $A_1A_2$ pikendusel suurema taga. Et leida rakenduspunkti $O$, tähistame tema kauguse lähima tungi rakenduspunktist $x$-ga; $A_2O = x$; siis:

$$A_1O = A_1A_2 + x \text{ ja } F_1(A_1A_2 + x) = F_2x;$$

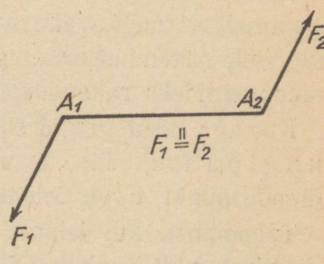
$$F_1 \cdot A_1A_2 + F_1x = F_2x; \quad F_2x - F_1x = F_1 \cdot A_1A_2$$

$$\text{ja } (F_2 - F_1)\, x = F_1 \cdot A_1A_2; \quad x = \frac{F_1 \cdot A_1A_2}{F_2 - F_1};$$

$$x = \frac{6 \cdot 36}{4} = 54; \; A_2O = 54 \text{ cm}; \; A_1O = 90 \text{ cm}.$$



Joon. 83. Tungipaar.




Joon. 84. Tungipaar.

**73. Tungipaar.** Väga sagedasti kohtume tehnikas juhuga, kus kehale mõjuvad kaks paralleelset, v õ r d s e t ja vastassuunalist tungi. Selliseid tunge nimetatakse t u n g i p a a r i k s. Tungipaar mõjub kopeerpressi käepidemele; autojuht või madrus, juhtides rooliga, rakendab sellele tungipaari; kompassi magnetnõelale võib samuti mõjuda tungipaar jne. (joon. 83).

Enne kui leida tungipaari resultanti, vaatame kuidas muutub paralleelsete ja vastassuunaliste tungide resultant, kui nende vahe hakkab järjest vähenema.

Leiame näiteks tungide 10 kG ja 11 kG resultandi, siis 10 kG ja 10,1 kG jaoks ja edasi 10 kG ja 10,01 kG jaoks. Kõikidel juhtudel olgu komponentide rakenduspunktide kaugus 36 cm.

Siis esimese juhu jaoks:

$$R = F_2 - F_1 = 1 \text{ kG};$$

$$x = \frac{F_1 \cdot A_1A_2}{F_2 - F_1} = \frac{10 \cdot 36}{1} = 360; \; x = 360 \text{ cm} = 3{,}6 \text{ m}.$$

Teise juhu jaoks:

$$R = 0{,}01 \text{ kG}; \; x = \frac{10 \cdot 36}{0{,}1} = 3600; \; x = 36.$$

Kolmanda juhu jaoks:

$$R = 0{,}01 \text{ kG}; \quad x = \frac{10 \cdot 36}{0{,}1} = 36000; \; x = 360 \text{ m}.$$

Saadud arvude võrdlusest näeme, et kahe paralleelse ja vastassuunalise tungi vahe vähenemisega väheneb nende resultant, selle rakenduspunkt aga eemaldub ikka rohkem ja rohkem komponentideks rakenduspunktidest.

Kui aga need tungid saavad võrdseteks, s. o. moodustavad tungipaari, siis resultant muutub nulliks, aga tema rakenduspunkt, nagu öeldakse matemaatikas, läheb lõpmatusse.

Tõepoolest, kui leiame tungipaarile resultandi suuruse ja rakenduspunkti asukoha §-s 72 (vt. näide) antud reegli järgi, siis saame:

$$R = F_2 - F_1 = 0 \text{ ja } x = \frac{F_1 \cdot A_1A_2}{F_2 - F_1} = \frac{F_1 \cdot A_1A_2}{0} = \infty.$$

Seejärgi tungipaari resultant oleks võrdne nulliga ja ta oleks rakendatud lõpmatuses.

See tähendab, et *tungipaaril ei ole resultanti.*

Kui tungipaari ei saa asendada ühe tungiga, siis see tähendab, et tungipaar ei saa anda kehale translatoorset liikumist.

*Tungipaar võib anda kehale ainult rotatoorset (pöörlevat) liikumist.*

*Harjutus 13.*

1) Talal, mille pikkus on 5,4 m, ripub 810 kG koormus 2,4 m kaugusel ühest äärest. Leida surve tugevused sammastele, millele see tala oma otsadega toetub.

Vastus: Lähemale sambale 450 kG.

2) 1,2 m pikkuse mittepainduva varda otsadele mõjuvad paralleelsed ja ühesuunalised tungid $F_1 = 5$ kG ja $F_2 = 7$ kG. Missuguses punktis on rakendatud resultant?

Vastus: 0,7 m kaugusel esimesest tungist.

3) 6 m pikkuse laua ühte otsa on rakendatud tung $F_1 = 20$ kG ja 1,8 m kaugusele samast otsast on rakendatud teine tung $F_2 = 32$ kG, paralleelne ja vastassuunaline esimesega. Leida resultandi suurus ja rakenduspunkt.

Vastus: $R = 12$ kG; $AO = 3$ m.

4) Kehasse on rakendatud kaks paralleelset ja vastassuunalist tungi: $F_1 = 10$ kG ja $F_2 = 15$ kG, 36 cm kaugusel teineteisest. Leida resultandi rakenduspunkt.

Vastus: $A_2O = 72$ cm.

5) Lahutada 120 kG tung kaheks paralleelseks ja vastassuunaliseks tungiks antud tungist 1 m ja 80 cm kaugusele.

Vastus: Ligem komponent on 600 kG.

6) Lahutada 160 kg tung kaheks paralleelseks ja vastassuunaliseks tungiks, millest üks on 40 kG ja rakendatud 1,2 m kaugusele antud tungist.

Vastus: 200 kG; 24 cm.

7) Labidal on 16 kG koormus. Parem käsi hoiab labidat kolm korda kaugemalt koormuse rakenduspunktist kui vasak. Kuhu poole on suunatud parema ja vasaku käe tungid, et hoida labidat tasakaalus? Kuhu on suunatud koormuse poolt kätele tekitatud tungid? Arvutada vasaku ja parema käe poolt tekitatud tungid, mitte arvestades labida raskust.

Vastus: Vasak 24 kG.

8) Kahele sambale toetub oma otsadega 6 m pikkune ja 140 kG raskune tala. Vasakust otsast 2 m kaugusele on riputatud 600 kG koormus. Leida surve sammastele.

Vastus: Vasakule sambale 470 kG.

9) 8 m pikkune ja 160 kG raskune tala asetseb oma otsadega kahe samba peal. Talale on riputatud kaks koormust — 300 kG ja 500 kG — vasakust otsast 2 m ja 6 m kaugusel. Leida surve sammastele.

Vastus: Vasakule sambale 430 kG.

## 2. Keha raskuspunkt ja asendi stabiilsus.

**74. Keha raskuspunkt.** Väiksematele [1] kehade osakestele mõjuvaid raskustunge võib lugeda paralleelseteks.

Sel juhul nimetatakse paralleelsete tungide keskpunkti raskuspunktiks.

Järelikult, *raskuspunkt on keha osakestele mõjuvate paralleelsete raskustungide keskpunkt.*

Kuidas ka keha ei oleks pööratud raskustungi suhtes, raskuspunkt võtab ikka teatud asendi kehas.

Kõikidele kehaosakestele mõjuvate raskustungide resultant, mis on rakendatud keha raskuspunktis, on keha kaal.

Et keha kaal ei paneks teda liikuma, peavad täidetud olema teatud tingimused.

Kui keha on kinnitatud ühte punkti (riputatud või toetub) ja on paigalolekus, siis *raskuspunkt ja toetuspunkt asuvad ühel vertikaalil*; keha raskus tasakaalustatakse toetuspunkti vastumõjuga ja keha jääb paigale (vt. joon. 68, 92).

Kui keha on kinnitatud kahte punkti (evib toetustelge), siis jääb keha seisma juhul, kui *raskuspunkti läbiv vertikaal* (raskustungi suund) *lõikab toetustelge.*

Kui keha toetub kolmele punktile (toetuspind), siis jääb keha seisma ainult sel juhul, kui *raskuspunkti läbiv vertikaal lõikab toetuspinda.*

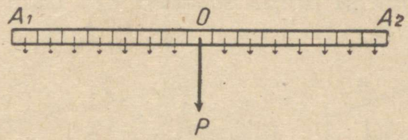
**75. Lihtsama geomeetrilise kujuga kehade raskuspunkti määramine.**

1. Ühtlase peenikese varva (joon. 85) raskuspunkti võime leida järgmise arutluse kaudu. Tükeldame varva paljudeks võrdseteks ruumaladega osadeks. Varva ühtlus tähendab, et kõikides osades võrdsetele ruumaladele vastavad võrdsed

---

[1] Raskustungid kahes 31 m kaugusel olevas punktis moodustavad nurga 1″.

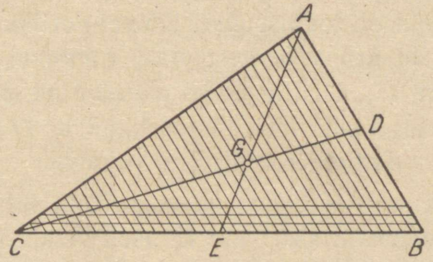
kaalud. Sellepärast võime vaadelda üksteisele järgnevaid varva punkte kui võrdsete tungide rakenduspunkte. Liites järjekorras paarikaupa võrdsed paralleelsed tungid, mis on rakendatud varva keskpunktist ühesugustele kaugustele, leiame et iga



Joon. 85. Varva raskuspunkt.

sellise tungipaari resultant on rakendatud varva keskpunkti ja kõikide paralleelsete tungide üldine resultant on samuti rakendatud varva keskpunkti. Seega *ühtlase varva raskuspunkt on tema keskpunktis.*

2. Rakendades analoogilist võtet ringi raskuspunkti saamiseks, leiame, et *ringi raskuspunkt ühtib ringi keskpunktiga.*

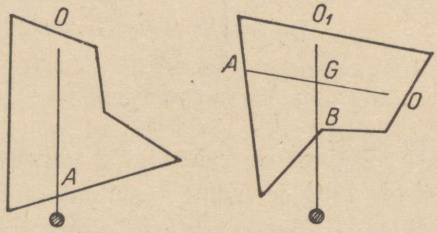


Joon. 86. Kolmnurga pinna raskuspunkt.

3. Kolmnurga pinna raskuspunkti leidmiseks kujutleme, et terve kolmnurk on lõigatud ühe kolmnurga küljega, näiteks AB-ga, paralleelseteks kitsasteks ribadeks. Igal ribal, nagu ühtlasel varvalgi, on raskuspunkt keskel. Terve pinna raskuspunkt peab asuma joonel, mis läbib kõiki ribade keskpunkte, s. o. mediaanil ehk küljepoolitajal. Kui aga lõigata

sama kolmnurga pind külje $CB$-ga paralleelseteks ribadeks, siis sama arutelu annab meile järelduse, et raskuspunkt asub mediaanil $AE$. Raskuspunkt võib olla ühel ajal kahel mediaanil siis, kui ta asub nende lõikepunktis $G$.

Seega *kolmnurga pinna raskuspunkt asub tema mediaanide lõikepunktis.*




Joon. 87. Tasakujundite raskuspunkt.

4. T a s a k u j u n d i raskuspunkti võib leida katseliselt: kui riputada tasakujund mingisse punkti $O$, siis kujund pöördub nii, et raskuspunkt on toetuspunkti läbival vertikaalil (joon. 87). Märkides kujundil ära selle vertikaali, riputame kujundi mingisse teise punkti $O_1$. Siis ta jällegi pöördub nii, et raskuspunkt jääb uuesti toetuspunkti läbivale vertikaalile $O_1B$. Selle viimase vertikaali märgime samuti ära kujundil.

Raskuspunkt peab asetsema üheaegselt nii sirgel $OA$ kui ka $O_1B$. See on võimalik siis, kui ta asub nende ühises punktis $G$, s. o. nende lõikepunktis.

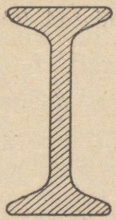
*Tasakujundi raskuspunkt on kahte vabalt võetud ülesriputamise punkti läbiva vertikaali lõikepunkt.*

***Harjutus 14.***

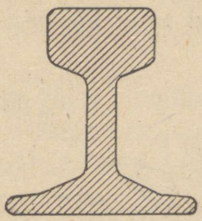
1) Leida ühtlase ruudu, rombi, ristküliku, võrdhaarse trapetsi ja tasarõnga pinna raskuspunkt.

2) Leida ühtlase kera, korrapärase prisma ja silindri raskuspunkt.

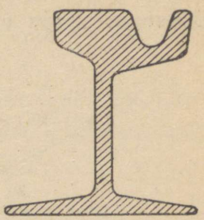
3) Lõigata papist või plekist joon. 88, 89 ja 90 näidatud läbilõiked ja määrata nende raskuspunktid.



Joon. 88. Tala läbilõige.



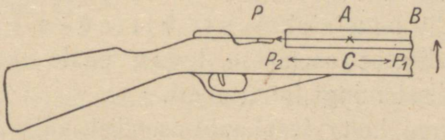
Joon. 89. Vignola rööpa läbilõige.



Joon. 90. Phoeniksi rööpa läbilõige.

4) Seletada, miks vintpüssist laskmisel ta toru hüppab üles (joon. 90-a.)

Vintpüssi raskuspunkt $C$ asetseb madalamal kui toru õõne telg, mida mööda liigub kuul.



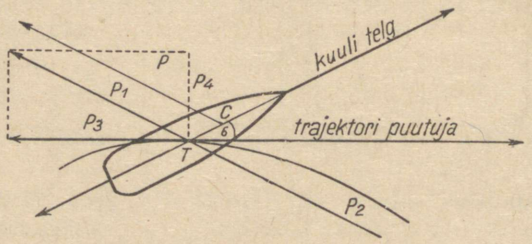

Joon. 90-a. Ülesande nr. 4 juurde.

Seletamiseks rakendada vintpüssi raskuspunkti kaks tungi $P_1$ ja $P_2$, mis on võrdsed gaaside survetungiga vintpüssile $P$ ja mis mõjuvad otse vastupidises suunas. Kas tungide $P_1$ ja $P_2$ rakendamine muudab tagasipõrke tungi toimet vintpüssile (joon. 90-b)?

5) Kui kuul moodustab nurga liikumise suunaga (joon. 90-b), siis on õhutakistus suurem võrreldes sellega, mis tal oleks, kui kuuli telg ühtiks trajektori puutujaga. Takistuse suurust ja suunda kujutatakse joonisel vektoriga $P$, selle rakenduspunkt aga asub kuuli teljel punktis $C$.

Et selgitada selle takistuse mõju kuuli liikumisele, rakendatakse kuuli raskuspunkti ($T$) kaks tungi: $P_1$ ja $P_2$, võrdsed takistusega ja omavahel vastassuunalised. Tungi $P_1$ kujutatakse lahutatuna kaheks komponendiks: üks puutuja suunas — $P_3$ ja teine temaga ristiseisvalt — $P_4$.

Missugust mõju avaldavad kuuli liikumisele rakendatud tungid?




Joon. 90-b. Ülesande nr. 5 juurde.

**76. Toetuspunkti või -telge evivate kehade stabiilsus.** Kujutleme keha, mis on üles riputatud ühte punkti (joon. 68). Ta püsib paigal, kui tema raskuspunkt asetseb ühel vertikaalil toetuspunktiga. Kas on niisugune keha asend stabiilne?

Keha asendit nimetatakse s t a b i i l s e k s (püsivaks), kui keha tuleb endisesse asendisse tagasi peale seda, kui ta on välja viidud sellest mingi tungi poolt.

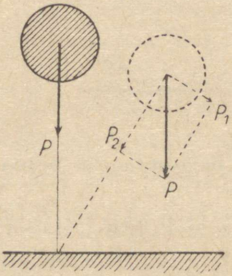
Viime rippuva keha tasakaalu-asendist välja mingi nurga $\alpha$ võrra. Uues asendis tema kaal, mis on rakendatud raskuspunkti $C_1$, ei lähe enam oma suunaga toetuspunktist $O$ läbi ja ei tasakaalustu toetuspunkti vastupanuga.

Lahutame kaalu kaheks komponendiks: ühe suunaga toetuspunkti ja teise sellega ristiseisvalt. Joonisest on näha, et komponent $P_2$ hävib toetuspunkti vastupanu tõttu, komponent $P_1$ aga paneb keha tasakaalu-asendi poole liikuma, kuhu ta ka tuleb peale mõnda võnget (liikumist takistab hõõrdumine toetuses ja õhutakistus).

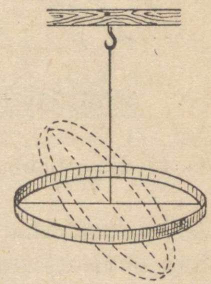
Järelikult, *kui keha on riputatud üles ühte punkti*, mis on raskuspunktiga ühel vertikaalil, siis ta on *stabiilses asendis* ehk *stabiilse tasakaalu asendis*.

Kujutleme, et meil õnnestus asetada keha varda otsa nii, et raskuspunkt $C$ ja toetuspunkt $O$ osutusid vertikaalil olevaks (joon. 91). Keha kaal sel juhul tasakaalustatakse toetuspunkti vastupanuga ja keha võiks olla tasakaalus. Kas on aga selline asend stabiilne?

Kallutame ta mingi välise tungiga esialgsest seisust kõrvale nurga $\alpha$ võrra. Uues asendis keha kaal ei lähe läbi toetuspunkti ja järelikult ei tasakaalustu selle vastupanuga.



Joon. 91.


Joon. 92. Rehvi indiferentne tasakaal.

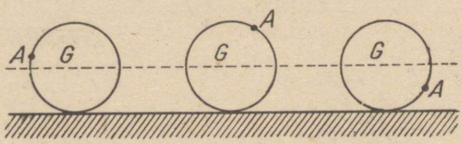
Lahutame keha kaalu uuesti kaheks komponendiks: ühe suunatult toetuspunkti ja teise sellega risti. Joonis näitab, et komponent $P_2$ hävib toetuspunkti vastupanuga; komponent $P_1$ aga kallutab keha esialgsest asendist kõrvale.

Asendit nimetatakse l a b i i l s e k s (mittepüsivaks), kui keha, olles väljaviidud tasakaalu asendist, ei tule enam sinna raskustungi mõjul tagasi.

Järelikult, kui *ühe punkti peale ülesseatud keha toetuspunkt on raskuspunktiga ühel vertikaalil, on keha labiilses asendis* ehk *labiilse tasakaalu asendis.*

Kui toetuspunkt ühtib raskuspunktiga, nagu joon. 92 näidatud juhul, või kui raskuspunkt jääb igasuguste nihete puhul samale nivoole (nii nagu ühtlase massiga kera juures horisontaalsel pinnal, joon. 93), siis keha jääb igas asendis paigale. Seda asendit nimetatakse i n d i f e r e n t s e k s (ükskõikseks) või indiferentse tasakaalu asendiks.

Kui kehal on *toetusjoon*, s. o. ta võib pöörelda ümber liikumatu telje, siis ta asend on püsiv juhul, kui raskuspunkt on toetusjoonest madalamal ja asub toetusjoont lõikaval vertikaalil; mittepüsiv — kui kõrgemal, ja ükskõikne, kui toetusjoon läbistab raskuspunkti.

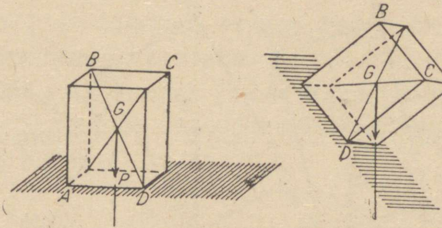



**Joon. 93. Kera indiferentne tasakaal horisontaalsel pinnal.**

Vaadeldes käsiteldud tasakaalujuhtude kohta käivaid jooniseid, võime näha, et stabiilse tasakaalu puhul on raskuspunkt kõige madalamal kõigist antud tingimustel võimalikest asendeist, labiilse puhul — kõige kõrgemal, ja indiferentse tasakaalu puhul on raskuspunkt keha kõigis asendites ühel ja samal horisontaalsel pinnal. Keha raskustung saab keha nihutada ainult selles suunas, milles raskuspunkt läheb madalamale. Sellepärast saame püstitada veel teise välise tunnuse toetuspunkti või -telge evivate kehade tasakaalu kohta. *Tasakaal on stabiilne*, kui *raskuspunkt* võtab kõigist võimalikest *kõige madalama* asendi; *labiilne*, — kui *kõige kõrgema*, ja *indiferentne*, kui raskuspunkt jääb igas asendis samale *horisontaalsele pinnale*.

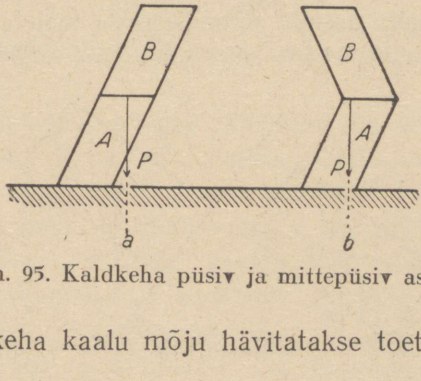
**77. Toetuspinda evivate kehade stabiilsus.** Prismad ja silindrid on horisontaalsel pinnal paigalolekus. Kui aga kallutada pinda, millele nad on asetatud, siis teatud kaldenurga juures kehad kukuvad ümber (joon. 94).

Kaldkehad ei saa alati paigal püsida ka horisontaalsel tasapinnal. Niiviisi osadest *A* ja *B* koosnev keha, nagu näidatud joon. 95 b, jääb paigale; kui aga asetada *B* *A*-le nii, nagu näidatud joon. 95 a, siis see kehade paar ei saa jääda paigale ja kukub [1].




Joon. 94. Toetuspinda eviva keha tasakaal.

Vaadeldes raskustungi suunda joon. 94 ja 95, näeme, et *toetuspinda eviv keha on paigal niikaua, kui raskuspunktist tõmmatud vertikaal läbib toetuspinda.*



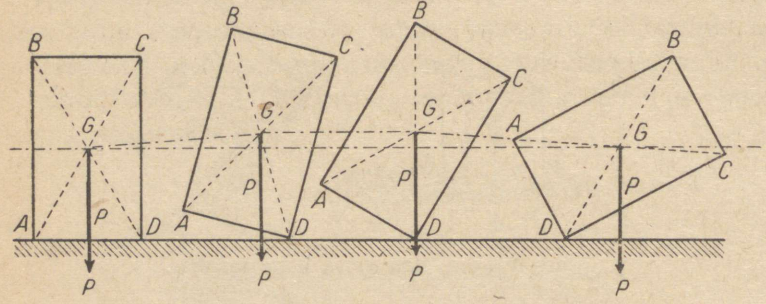

Joon. 95. Kaldkeha püsiv ja mittepüsiv asend.

Sel juhul keha kaalu mõju hävitatakse toetuspinna vastupanuga.

Vaadeldes keha mitmesuguseid asendeid joon. 96, näeme, et keha tuleb tagasi endisesse asendisse, s. o. tema asend on stabiilne kõigil neil nihkumise juhtudel, kus raskuspunkti läbiv

[1] Osadest *A* ja *B* koosneva liitkeha raskuspunkt on *A* ja *B* raskuspunktide ühendusjoone keskpunktis.

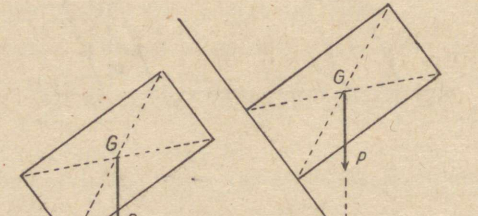
vertikaal ei lähe toetuspinnast väljapoole; tasakaal rikutakse kõigil sellistel nihkumistel, kus raskuspunkti läbiv vertikaal läheb toetuspinna piiridest välja.



Joon. 96. Keha püsivad ja mittepüsivad tasakaalujuhud.

Kahe eelmise juhu piiril asuvaks juhuks on see, kus raskuspunkti läbiv vertikaal lõikab toetusjoont.

Vaadeldes keha asendit mitmesuguste kallete puhul toetuspinna suhtes, näeme, et kui keha tuleb oma endisesse asendisse

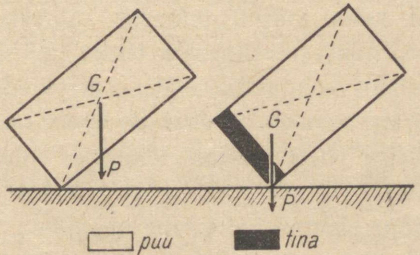


Joon. 97. Toetuspinna suuruse mõju keha stabiilsusele.

tagasi, siis on iga kalde puhul raskuspunkt küll tõusnud, kuid pole ületanud suurimat võimalikku asendit.

Kui aga keha kalle läheks üle piirasendi, siis keha kaal ei saa enam keha tasakaaluasendisse tagasi tuua, sest siis peaks raskuspunkti viima üle kõrgeima asendi; kuna kaal aga jätkab raskuspunkti allapoole viimist, siis keha kukub.

Sellest arutelust tuleneb praktiline võte — anda seinadele, aparaatidele ja igapäevases elus tarvitatavatele asjadele maksimaalne stabiilsus: *toetuspinda evivad kehad on seda stabiilsemad, mida suurem on toetuspind* (joon. 97) *ja mida madalamal on nende raskuspunkt* (joon. 98). Sellepärast tehakse alustugede ja sammaste alused raskemast ainest kui ülejäänud osad ja laiemad kui ese ise.




Joon. 98. Raskuspunkti madaluse mõju keha stabiilsusele.

**77-a. Potentsiaalse energia miinimum kui keha asendi stabiilsuse tingimus.** Keha väljaviimisel stabiilsest asendist keha raskuspunkt tõuseb. Selleks peame kulutama tööd hulgal, mis on võrdne keha kaalu ja tõusu kõrguse korrutisega. Järelikult, stabiilsest asendist väljumise korral peab keha väljastpoolt saama juurde potentsiaalset energiat. Paigaloleku asendis on tal väikseim potentsiaalne energia. Kui aga kõrvaldatakse tung, mis viis keha välja paigalolekust, siis saab keha oma raskuse toimel minna ainult sellesse asendisse, milles tema potentsiaalne energia on kõigist võimalikest kõige väiksem; sellepärast viibki keha kaal keha endisesse asendisse tagasi. Labiilses asendis evivad kehad suuremat potentsiaalset energiat kui üheski teises võimalikus asendis. Iga väljumise juures labiilsest asendist väheneb keha potentsiaalne energia. Kui keha on jäetud omaette, siis keha kaal ei saa tõsta keha raskuspunkti, s. o. anda talle potentsiaalse energia lisa; sellepärast läheb keha esialgsest asendist ikka kaugemale ja kaugemale.

Siit saame järgmise järelduse: *ülesseatud või ülesriputatud keha asend on stabiilne siis, kui kehal on selles asendis kõigist võimalikest kõige väiksem potentsiaalne energia.*

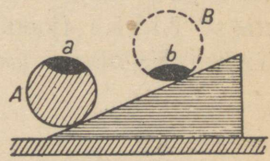
**78. Toe vastumõju.** Mõjub kehale raskus- või mõni teine tung, jääb keha paigale, kui tungi suund läbib toetuspunkti, telje või pinna.

Sel ajal, kui keha mõjub temasse rakendatud tungidega teisesse kehasse, mis on esimesele toeks, mõjub see viimane esimesse mehaanika kolmanda seaduse järgi võrdse ja vastassuunalise tungiga.

Tungi, millega tugi mõjub kehasse, nimetatakse t o e v a s t u m õ j u k s.

Toe vastumõju olemasolus võime veenduda, rõhudes käega lauda. Rõhumise juures me saame teatud taju, mis võib suuremate rõhumiste puhul kujuneda valutundeks. See taju näitab, et meie käele on rakendatud tung. Tähendab, mitte ainult meie lihaste pingutus ei mõjuta lauda, vaid samal ajal ka laud mõjutab meie kätt vastassuunalise tungiga. Veendume selles, et vastumõju on mõjuga võrdne, kui paneme dünamomeetrid konksupidi kokku ja tõmbame. Vaatamata dünamomeetrite süsteemile või suurusele, näitavad nad võrdseid tunge. Iga dünamomeeter mõjutab teist võrdse tungiga. Järelikult, kui laual asetseb kera või mingi muu ese, siis kera või teine ese mõjutavad lauda kaaluga võrdse tungiga ja on omakorda mõjutatud laua poolt sama suure, kuid vastassuunalise tungi poolt. Säärasel juhul on kerasse või asjasse rakendatud kaks võrdset ja vastassuunalist tungi — kaal ja toe vastumõju. Neid tunge kui ühesse kehasse mõjuvaid tunge võime liita ja resultandina saame nulli. Sellepärast keha võibki jääda tasakaalu, kuigi teda on mõjutamas tungid.

Mõjuva tungi ja toe vastumõju jäävad võrdseteks ka siis, kui tugi ja toetatav keha pannakse liikuma kolmanda tungi poolt. Nii jäävad kera surve käele ja käe vastumõju ka siis võrdseteks, kui käsi koos keraga liigub. Kaalukausi surve toetusteljele ja telje vastumõju on võrdsed, olenemata sellest, kas kaalud seisavad paigal või kantakse neid kohast kohta. Sel juhul on tegemist tungide mõju olenematuse seadusega.



Joon. 99.

***Harjutus 15.***

1) Mitteühtlases keras on raskuspunkt raadiuse keskpunktis. Missuguses tasakaaluasendis on see kera horisontaalsel tasapinnal (anda seletus)? Missugust laste mänguasja kujutab see kera?

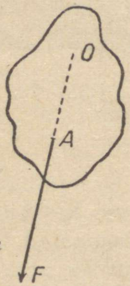
2) Missuguses asendis võib mitteühtlane kera väikese kaldega kaldpinnal veereda ülespoole (joon. 99) (anda seletus joonise järgi)?

## 3. Tungi momendi mõiste.

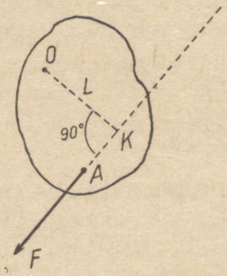
**79. Tungi mõju telje ümber pöörlevasse kehasse.** Me nägime, et kehale mõjuvat mitut tungi võib teatud tingimustel asendada ühe resultandiga. See resultant annab vabale kehale ühtlaselt kiireneva liikumise. Kui samale kehale mõjub resultandiga võrdne ja vastassuunaline tung, siis ta tasakaalustab seda, s. o. nende ühine resultant on võrdne nulliga. Kui kõikide tungide resultant on null, siis keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt või on paigal.

Vaatame, missugused on ümber telje pöörlevatesse kehadesse mõjuvate tungide tasakaalutingimused, näit. masinate pöörlevates osades. Tasakaal saabub alati, kui tungi suund läbib toetustelje (joon. 100). Sel juhul tasakaalustub tung liikumatu telje vastumõjuga ja pöörlemist ei teki.

Kui aga tungi suund ei lähe läbi telje, siis paneb tung tingimata keha liikuma; sellejuures ei olene pöörlemapaneva tungi mõju kehasse mitte üksi tungi suurusest, vaid ka selle kaugusest teljest. Tungi väikseimat kaugust [1] pöörlemisteljest nimetatakse õ l a k s (joon. 101). Tungi ja õla suuruste mõju keha pöörlemisele näeme joon. 102 kujutatud katseriistal.




Joon. 100. Tung, mille suund läbib pöörlemise telge, ei pane keha liikuma.




Joon. 101. Tungi õlg.

Riputame niidiga punktis $A$ 3 ühesugust koormust [2]. Selle tungi õlg $OD$ on võrdne 4 ühikuga. See tung üksi paneb ketta liikuma kellaosuti suunale vastassuunas. Et hoida ketast paigal, tuleb rakendada teist tungi, mis üksi liigutaks ketast vastupidises suunas, s. o. kellaosuti liikumise suunas.

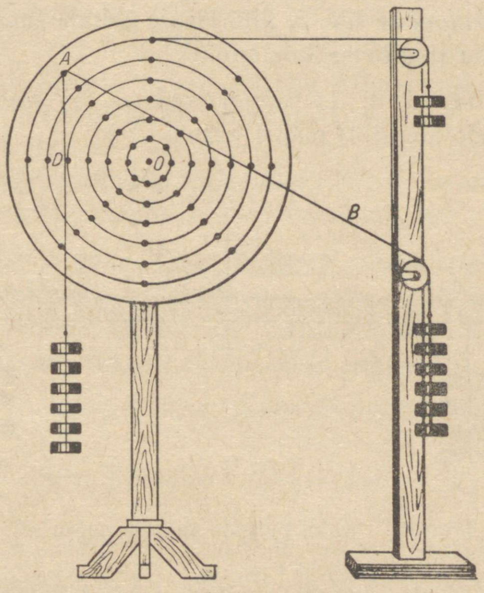
Seda saavutame, kui kinnitame konksu $A$ külge nööri, mis on visatud üle ploki $B$, ja riputame nööri külge 6 sellist koormust. Viimase tungi õlg $OE$ on võrdne kahe ühikuga. Kuid tasakaalustada esimest koormust võib ka teise tungiga, mis

[1] S. o. ristjoon $OK$, mis on lastud telje punktist $O$ tungi $F$ suunale (joon. 101).

[2] Joon. 102 on 6 koormust, mis tasakaalustavad 8 parempoolset koormust.

on tekitatud kahest koormusest, kinnitades nööri selliselt, et õlg $OG$ oleks võrdne 6 ühikuga.

Niiviisi tung suurusega 6 ühikut ja õlaga 2 ühikut avaldab sama mõju, mis tung suurusega 2 ühikut ja õlaga 6 ühikut, s. o. tasakaalustavad 3 ühikulist tungi, millele vastav õlg on 4 ühikut.




Joon. 102. Tungi momendi demonstreerimise riist.

Surudes teatud jõuga ust, me teame, et avame ta kiiremini, kui surume pöörlemisteljest kaugemal. Soovides peatada pöörlevat ratast, haarame teda mitte teljele lähematest, vaid kaugematest kohtadest. Paljudest sellistest näidetest järgneb, et tungi mõju pöörlevale kehale oleneb tungi suurusest ja õla pikkusest. Sellepärast tungi mõju pöörlevale kehale mõõdetakse isesuguse suurusega, mida nimetatakse m o m e n d i k s[1].

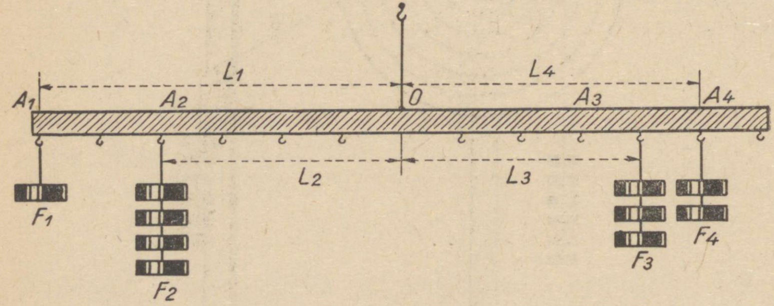
*Tungi momenti mõõdetakse tungi ja õla korrutisega.*

Kui tähistada pöörlemapanevat tungi $F$-ga, õlga — $L$-ga ja momenti $M$-ga, siis

$$M = FL.$$

**80. *Laboratoorne töö 2.* Pöörlevale kehale rakendatud tungide tasakaalu tingimuse tuletamine.**

T ö ö v a h e n d i d: 1) meeterjoonlaud; 2) statiiv; 3) ühesuguste vihtide kogu; 4) niidist aasad.




Joon. 103. Keha paljude tungide mõju all.

T ö ö k ä i k. 1. Pange joonlaud aasa, riputage ta statiivi külge ja nihutage teda aasas niikaua, kuni ta jääb tasakaalu horisontaalses asendis.

2) Asetage aasadega (kolm, neli jne.) mitmesugused koormused joonlauale ja nihutage neid joonlaual, kuni taastub horisontaalne asend (joon. 103).

3) Kirjutage tabelisse tungide suurused: $F_1$, $F_2$ jne., mõõtke ja kirjutage üles iga tungi õlg: $L_1$, $L_2$ jne.

---

[1] Ladinakeelsest sõnast *movimentum* — liikumine.

4) Arvutage iga tungi moment telje O suhtes, mis on risti joonise tasapinnaga; leidke tungide momentide summa, mis tahavad keha pöörata ühele poole, ja tungide momentide summa, mis tahavad teda pöörata vastupidisele poolele, ja võrrelge saadud summasid omavahel.

5) Korrake katset mitmesuguste koormustega, mis on asetatud mitmesugustele kohtadele, ja arvutage tungide momentide summa, mis pööravad kellaosuti suunas ja vastassuunas, ja võrrelge neid summasid omavahel.

Missuguse järelduse võib katsest teha tungide tasakaalu kohta keha juures, millel on pöörlemistelg?

**81. Tungide tasakaalu üldine tingimus.** Kehasse rakendatud tungide tasakaalu tingimuste uurimine näitab, et:

***Pöörlemise telge evivasse kehasse rakendatud tungid on tasakaalus, kui kellaosuti liikumise suunas pööravate tungide momentide summa on võrdne kellaosuti liikumisele vastassuunas pööravate tungide momentide summaga.***

Rakendatult joonisele 103, võime kirjutada tasakaalu tingimust nii:

$$F_1L_1 + F_2L_2 = F_3L_3 + F_4L_4. \qquad \text{(XIV-c)}$$

Eespool läbiarutatud ülesannet — paralleelsete tungide resultandi rakenduspunkti leidmist — võib kergesti lahendada pöörlemise telge eviva keha tasakaalu tingimuse alusel. Kui rakendada kehasse resultandi rakenduspunktis resultanti tasakaalustav tung, siis saabub tasakaal. Siis võime kujutella, et resultandi rakenduspunkti läbib liikumatu telg. Selle telje suhtes on paralleelsete komponenttungide momendid võrdsed.

N ä i t e i d. 1. Leida nelja ühesuunalise paralleelse tungi resultandi rakenduspunkt: $F_1 = 5$ kG, $F_2 = 8$ kG, $F_3 = 3$ kG, $F_4 = 10$ kG. Nende rakenduspunktide omavahelised kaugused on vastavalt: 36, 30, 40 cm.

L a h e n d u s. Resultant $R = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 26$ kG.

Oletame, et resultandi rakenduspunkt on paremal pool tungist $F_2$ kaugusel $x$ viimase rakenduspunktist. Kui me rakendame sellesse punkti tasakaalustava $R_1 = R$, siis jääb keha kõikide temasse rakendatud tungide mõjul tasakaalu. Me võime läbi resultandi rakenduspunkti kujutella pöörlemistelge, mille suhtes kellaosuti liikumise suunas pööravate tungide momentide summa peab olema võrdne kellaosuti vastassuunas pööravate tungide momentide summaga.

Tungi $F_1$ õlg on võrdne $L_1 = 36 + x$; tungi $F_2$ jaoks õlg $L_2 = x$; tungi $F_3$ jaoks õlg $L_3 = 30 - x$; tungi $F_4$ jaoks õlg $L_4 = 70 - x$ (võib kasutada joon. 103).

Tasakaalustava $R_1$ moment on võrdne nulliga, kuna $R_1$ läbib telge ja tema õlg on null:

$$5(36 + x) + 8x = 3(30 - x) + 10(70 - x);$$

$$180 + 5x + 8x = 90 - 3x + 700 - 10x;$$

$$3x + 10x + 5x + 8x = 90 + 700 - 180;$$

$$26x = 610; \quad x = \frac{610}{26} = 23{,}5; \; x = 23{,}5 \text{ cm}.$$

2. Lae tala toetub kahele kivist toele, mis on teineteisest 8 m kaugusel. 3 m kaugusel parempoolsest toest on koormus 16 T. Leida surve kummalegi toele (joon. 81).

L a h e n d u s. Tala mõjutab tugesid samasuguse tungiga, missugusega toed mõjutavad tala. Seega on talale rakendatud kolm tungi: 16 T vertikaalselt alla, tung $x$ vasakule äärele ja tung $y$ parempoolsele äärele vertikaalselt üles. Tala on paigal. Seepärast peab kõikide tungide summa olema null ja momentide summa samuti null. On arusaadav, et vastumõjude summa $x + y = 16$.

Momentide tingimuse rakendamiseks võtame mingi tala punkti, näiteks vasakpoolse ääre, pöörlemisteljeks, siis:

| | | |
|---|---|---|
| tungi $x$ moment | $x \cdot 0 = 0$; | |
| koormuse raskuse moment | $5 \cdot 16 = 80$ | (kellaosuti suunas); |
| vastumõju $y$ moment | $8y$ | (kellaosuti vastassuunas); |

$$8y = 80;\ y = 10\ \mathrm{T};\ x = 6\ \mathrm{T}.$$

Võttes tala parema ääre pöörlemisteljeks, saame:

| | | |
|---|---|---|
| tungi $x$ moment | $8x$ | (kellaosuti suunas); |
| koormuse raskuse moment | $3 \cdot 16 = 48$ | (kellaosuti vastassuunas); |
| vastumõju $y$ moment | $y \cdot 0 = 0$; | |

$$8x = 48;\ x = 6\ \mathrm{T};\ y = 10\ \mathrm{T}.$$

## 4. Tungide tasakaalu tingimused ja lihtsate masinate töö seadus.

**82. Tööriist, mehhanism, masin.** Tungide tasakaalu tingimused leiavad rakendamist masinate juures tehtavatel arvutustel. Masinad on suuremalt jaolt mõjuvate tungide toimel ühtlases liikumises.

Oma elu säilitamiseks pidi inimene alati tööd tegema. Oma toiduks tappis ta loomi ja kandis neid oma elamusse. Elamu ehitamisel tuli tal kanda palke ja oksi, nihutada kive ja murda kasvavate puude tüvesid.

Juba oma olemasolu esimestest aegadest peale hakkas inimene kasutama töö sooritamisel, mis oli vajalik tema elu säilitamiseks, peale ihuliikmete ka kõrvalisi kehi.

Pähklikoore purustamiseks ta võttis kätte kivi ja selle kivihaamriga purustas koore. Kivide ja puutüvede tõstmiseks ja nihutamiseks ta kasutas oksa kui kangi. Puude langetamisel ta kasutas kirvest.

Keha, mida kasutame töö juures rakendatava tungi suuruse või suuna muutmiseks, nimetatakse t ö ö r i i s t a k s.

Tööriista rakendamine oligi see, mis eraldas inimese teistest loomadest.

Tööriist, mida inimene hoiab käes töö ajal, kordab neid liigutusi, mida pidi tegema ka paljas käsi.

Nii näiteks pähklikoore purustamisel tõuseb ja langeb haamer samuti kui rusikaski. Need liigutused ei saa olla absoluutselt täpsed ega ka kuigi suure kiirusega. Haamri, kiilu või teraviku löögid ei lähe alati ühte ja samasse kohta. Samuti tuleb õmblemisel väga kerge nõela ja niidi tõstmiseks tõsta ka rasket kätt, raisates sellega palju tööd.

Tootmise protsessis tekkinud vajadus vähendada tööd kasututele liigutustele ning suurendada tööriista täpsust ja kiirust sundis inimest tööriista asetama nõrgast ja ebatäpsest käest teistesse kehadesse, mis olid suutelised sooritama kindlaid ja kiireid liigutusi.

Kehade kogumikku, milles ühe keha (juhtiva) liikumine kutsub esile täiesti kindlaksmääratud liigutusi sama süsteemi teistes kehades, nimetatakse m e h h a n i s m i k s.

Mehhanismide kogumikku, mis on ette nähtud otstarbekaks energia muundamiseks ja selle arvel teatud kasuliku töö tegemiseks, nimetatakse m a s i n a k s.

K. Marxi definitsiooni järgi («Kapital», I k., 8. tr. v. k., 1936, lk. 302) masin on «mehhanism, mis saades teatud liikumise, sooritab oma riistadega samu operatsioone, mida tööline tegi samasuguste tööriistadega». «Peale seda, kui tööriist sõna otseses tähenduses läks inimeselt mehhanismile, astub masin lihtsa tööriista asemele».

Masin on töö vahend, kuid ühtlasi on ta ka töö saadus.

Igasuguse masina ehituse eesmärk on saada tema liikumapanemiseks kulutatud energiast suurimat hulka kasulikku tööd. Kasuliku töö suurenemine saavutatakse peaasjalikult masina liikuvate osade liikumise kindlaksmääramisega. See asjaolu lubab suuresti kiirendada osade liikumist ja tõsta töö kvaliteeti, võrreldes vähemtäpsete käeliigutustega sama töö juures.

Nii teeb mehaanilise ajamiga õmblusmasin 1500 pistet minutis, kuna õmblejanna suudab sama aja jooksul teha 50 pistet. Naelamasin viskab välja 500 naela minutis, kuna tööline teeb neid käsitsi ainult mõne saja päevas.

Meie ülesandeks on tungide tasakaalu tingimuste ja töö seaduse tundmaõppimine mõnede kehade juures, mida ammu nimetatakse mittetäpselt «lihtmasinateks» (täpsemalt on need l i h t m e h h a n i s m i d), ja nimelt ploki, pööra, kangi, kaldpinna, kiilu ja kruvi juures.

Kolmel esimesel on pöörlemistelg, sellepärast saab nende jaoks tungide tasakaalu tingimusi tuletada tungide momentide abil.

**83. Hõõrdumine ja selle tekkimine.** Kui üks keha liigub teise suhtes ja on sellega kokkupuutumises, siis avaldub hõõrdumine liikumise takistamises.

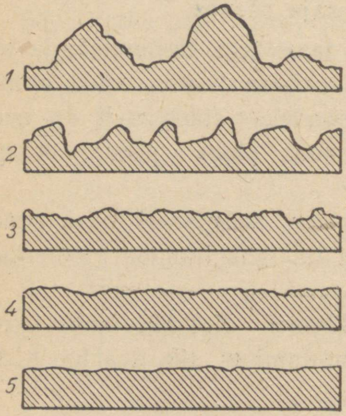
Hõõrdumine teeb tungi ja kiiruse arvutamise nende valemite järgi, mis me saime mehaanika seaduste alusel, keerukamaks; et anda massile $m$ kiirendus $a$, kui on tegemist hõõrdumisega, on tarvis suuremat tungi kui $F = ma$, millest piisaks hõõrdumise puudumisel. Kui on liikumine hõõrdumisega, siis ei ole kehade kiirused enam pöördvõrdelised massidega, vaid väiksemad — määral, mis oleneb hõõrdumise suurusest.

Ühe keha liikumisega teise pinda mööda käib alati kaasas hõõrdumine. Sellepärast on tähtis õppida tundma hõõrdumisseadusi.

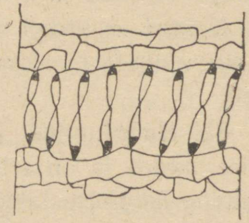
Esialgne ligikaudne teooria seletab ühe keha hõõrdumist teise vastu ebatasasuste ja konarustega.

Neid konarusi võime skemaatiliselt kujutada kui nukke ja lohke (joon. 104). Liikumisel satuvad ühe keha nukid teise keha lohkudesse ja annavad talle lööke. Selliste löökide tõttu mõjutab liikumatu keha liikuvat *kiirusele vastupidiselt suunatud tungiga.* Seda tungi nimetatakse h õ õ r d u m i s t u n g i k s.

Lähem uurimine muudab seda esialgset kujutlust. On leitud, et väga puhtate pindadega kehade kokkupuutumisel toimub nagu kokkupuutepindade kokkukasvamine ja suhtelise liikumise korral tekivad palja silmaga nähtamatud rebenemised.




Joon. 104. Pindade profiilid: 1) koorimisel, 2) treimisel, 3) liivapaberiga puhastamisel, 4) poleerimisel, 5) hoolikal poleerimisel.



Joon. 104-a. Määrde molekulide ja metalli pinna molekulide asetus.

Kuna hõõrdumine ei kao ühegi lihvimisega, siis pindade konarust ei seletata väljaulatuvate osakestega, vaid pealmise kihi molekulidega, mis kujutavad endast kindlaid aatomite kombinatsioone ja asetsevad üksteisest mitmesugustel kaugustel (joon. 104-a).

**83-a. Hõõrdumise liigid.** Olenevalt liikumise liigist tehakse vahet kahe hõõrdumise liigi vahel: l i u g u m i s e hõõrdumine ja v e e r e m i s e hõõrdumine.

*Liugumise hõõrdumist võime tähele panna sel juhul, kui liikumisel üks keha puudutab teist ühtede ja samade pinnapunktidega.*

Liugumise hõõrdumise näitena võime tuua saani hõõrdumist liikumisel mööda jääd.

Liugumise hõõrdumine on aurumasina silindri kolvil ja igas kolviga pumbas ning paljudel tööpinkidel, kus toimub edasi-tagasi liikumine.

*Veeremise hõõrdumist võime tähele panna sel juhul, kui liikuv keha puudutab järjestikku oma üksteisele järgnevate punktidega liikumatu pinna punkte.*

Veeremise hõõrdumise näiteks võib olla koormuse liikumine rullidel või sõiduki liikumine ratastel.

Peale selle tehakse vahet paigaloleku ehk staatilise hõõrdumise ja dünaamilise hõõrdumise vahel.

Staatilist hõõrdumist mõõdetakse minimaalse tungiga, mis on vajalik selleks, et keha paigalolekust välja viia; dünaamiline hõõrdumine on võrdne tungiga, mida peame teatud kiiruse andmiseks kehasse rakendama.

Lõpuks tehakse liugumisel veel vahet kuiva ja poolvedela hõõrdumise vahel. Hõõrdumist nimetatakse kuivaks, kui hõõrduvate pindade vahele pole kunstlikult asetatud mingit kolmandat ainet.

Tuleb pidada silmas, et hõõrduvad pinnad kunagi ei saa olla vabad neile kleepuvatest õhukihtidest ja mõnikord isegi niiskusest.

Hõõrdumist nimetatakse poolvedelaks, kui kahe hõõrduva pinna vahele on pandud õhuke kiht spetsiaalselt valitud vedelikku.

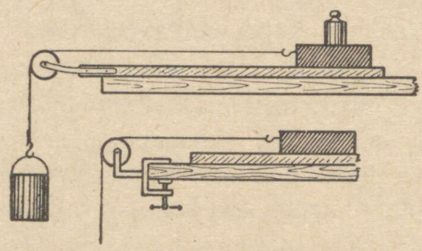
**83-b. Hõõrdumisseadused.** Kuna hõõrdumine väga suurel määral oleneb hõõrduvate pindade töötlemisest ja seisukorrast, siis hõõrdumisseadused on väga ligikaudsed.

Coulomb uuris liugumise hõõrdumisseadusi katseriistaga (joon. 104-b), mida nimetatakse tribomeetriks[1].

---

[1] Kreeka keeles *tribe* — hõõrdumine, *metreo* — mõõdan.

*a) Rõhumistungi ja liugumise hõõrdumistungi vaheline olenevus.* Uuritavast ainest lauale asetatakse rööptahukas samast või mõnest teisest uuritavast ainest. Rööptahuka küljes olevale konksule kinnitatakse dünamomeeter või üle ploki visatud nöör; nööri teises otsas on kausike koormuste asetamiseks. Tuleb silmas pidada, et nöör oleks lauaga paralleelne. Määratakse rööptahuka raskus $P_n$. Nööri otsa seotud kausikesele asetatakse järk-järgult niipalju vihikesi, et rööptahukas kerge koputamise peale alumisele lauale hakkaks ühtlaselt liuguma.



Joon. 104-b. Tribomeeter.

Samasugust ühtlast liugumist võib saada dünamomeetri vedru venitamisega.

Ü h t l a n e liugumine näitab, et rööptahukas liigub inertsi tõttu. Rööptahukale rakendatud tungid sel juhul vastastikku tasakaalustuvad. Sellisteks tungideks on veotung ja hõõrdumistung.

Järelikult *ühtlase liugumise korral on veotung võrdne hõõrdumistungiga.*

Veotungi, vastavalt ka hõõrdumistungi $F$, mõõdetakse vihikestega või dünamomeetriga.

Katset korratakse mitu korda, asetades rööptahukale mitmesuguseid koormusi; mõõdetakse iga kord üldine rõhumine, mis on võrdne raskusega $P_n$, ja hõõrdumistung $F$.

Võrreldes rõhumistungi ja hõõrdumistungi vastavate väärtuste ridu, võime tuletada liugumise hõõrdumise esimese seaduse.

*Liugumise hõõrdumistungi suhe normaalrõhumisega*[1] *on antud pindade kohta jääv. Selle jääva suhte suurust nimetatakse hõõrdumiskoefitsiendiks ehk -teguriks.*

$$\text{Hõõrdumiskoefitsient} = \frac{\text{hõõrdumistung}}{\text{rõhumistung}}.$$

Kui tähistada hõõrdumiskoefitsienti tähega $f$, siis $f = \frac{F}{P_n}$; ehk

$$\boxed{F = fP_n.} \qquad \text{(XV)}$$

Liugumise hõõrdumiskoefitsient on nimeta arv.

*b) Hõõrdumiskoefitsiendi olenematus kokkupuutepindade suurusest.* Asetades rööptahuka alumisele lauale mitmesuguste tahkudega ja korrates samu katseid, mis esimeselgi juhul, saame:

*Hõõrdumiskoefitsient ei olene kokkupuutepinna suurusest.*

Peab tähendama, et saadud seadus on õige vaid tingimisi. Kahe keha kokkupuutumine sünnib konaruse tõttu ainult vähestes punktides, aga mitte tervet geomeetrilist pinda mööda.

Väga väikeste pindade juures, näiteks naela teraviku liikumisel puud mööda, sünnib «sissesöömine» — ühe keha tungimine teisesse. Sellistel juhtudel pole hõõrdumisseadused rakendatavad.

*c) Hõõrdumise olenevus liugumise kiirusest.* Eelmistega sarnased katsed näitavad, et väikeste kiiruste juures hõõrdumiskoefitsient ei olene kiirusest. Suurte kiiruste puhul hõõrdu-

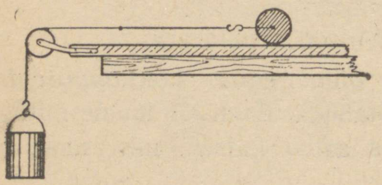
[1] Rõhumisega risti alusele. Geomeetrias nimetatakse ristjoont pinnale normaaliks.

miskoefitsient muutub kiiruse muutudes. Olenevus on keerukas. Auto hõõrdumine 90 km/h kiiruse juures on väiksem kui kiirusega 30 km/h.

*d) Määrde mõju hõõrdumisele.* Korrates eelmisi katseid mitmesuguste ainetega (peaasjalikult metallidega), algul ilma määrdeta, aga pärast määrides pinnad mingi määrdeainega — õliga, rasvaga, seebi lahusega — võib tähele panna, et määre õhukese kihina vähendab suuresti hõõrdumist.

Pinna katmine isegi väga õhukese määrdeaine kihiga kaitseb pinda vigastuste eest ja teeb sujuva liuglemise võimalikuks.

*e) Hõõrdumiskoefitsient veeremisel.* Asendame tribomeetril rööptahuka silindriga (joon. 104-c). Kinnitame algul silindri klambrisse nii, et see ei saaks pöörelda. Lohistame teda lauda mööda; dünamomeeter näitab hõõrdumistungi liugumisel. Vabastame silindri klambrist ja laseme tal ühtlaselt veereda lauda mööda. Dünamomeeter näitab hõõrdumistungi veeremisel. Nende kahe tungi võrdlus näitab, et ühe ja sama pinna jaoks on hõõrdumine veeremisel palju väiksem hõõrdumisest liugumisel.



Joon. 104-c. Hõõrdumine veeremisel.

Valime silindrid ühesugusest ainest, ühesuguse pikkusega ja ühesuguse raskusega, kuid erinevate raadiustega $r$. Veeretame neid ühtlaselt sama lauda mööda dünamomeetri abil ja märgime ära hõõrdumistungid. Vaatlused näitavad, et hõõrdumistung väheneb pöördvõrdeliselt silindri raadiusega. Kui mõjuv tung on rakendatud silindri teljele, siis arvutused annavad hõõrdumiskoefitsiendi jaoks veeremisel järgmise avaldise:

$$f_v = \frac{F}{P_n r}. \tag{XV-a}$$

Hõõrdumiskoefitsiendid on toodud raamatu lõpus tabelis III.

**83-c. Hõõrdumise tähtsus looduses ja tehnikas.** Hõõrdumisega käib alati kaasas hõõrduvate pindade soojenemine. Lauast hõõrdumisega väljakistud nael osutub soojenenuks. Rataste tugeva hõõrdumise puhul vastu telgi võivad puust teljed põlema hakata; metallist telgedel hakkab põlema määrdeõli. Kõik tööpingi riistad liiguvad töötamise ajal hõõrdumisega. Hõõrdumisega liikumisel tekkinud soojus hajub, kaob. Soojus tekib selle töö arvel, mis on kulutatud hõõrdumise ületamiseks. Hiiglasuur toöhulk kulutatakse masinates ja transpordis hõõrdumise ületamiseks. Siit selgub kahjuliku hõõrdumise vähendamise erakordselt suur majanduslik tähtsus.

Kuid hõõrdumise kahjulikkusega ühelt poolt on seotud kasulikkus teiselt poolt.

Ilma hõõrdumiseta poleks võimalik ei käimine ega sõitmine maad mööda. Märga jääd mööda on väga raske liikuda. Hobune, kes vabalt veab koormat kuival teel, ei suuda seda liigutada libedal kohal. Veduri rattad libisevad märgadel rööbastel ja ta ei saa edasi. Riie seisab koos lõnga hõõrdumise tõttu. Kirved, labidad ja paljud teised tööriistad seisavad varte otsas hõõrdumise tõttu.

Hõõrdumisel põhjeneb sõidukite ja vagunite pidurite ehitus.

Ilma hõõrdumiseta poleks võimalik kinnitamine poltidega, naeltega, kruvidega ja neetidega.

Hõõrdumise tõttu on võimalik anda edasi liikumist transmissioonivõllilt rihmülekandega tööpingile. Mõnel juhul masinaosad liiguvad omavahelise hõõrdumise tõttu.

Hõõrdumistungi tõttu on võimalik metalli valtsimine, rööbaste, profiilraua, traadi jts. töötlemine.

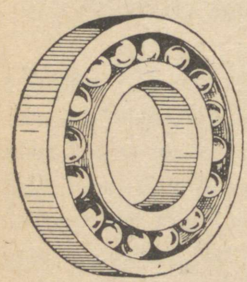
**83-d. Kahjuliku hõõrdumise vähendamise ja kasuliku hõõrdumise suurendamise viisid.** Kuna hõõrdumine toob rahvamajandusele transpordis ja masinates suurt kahju, siis võetakse tarvitusele abinõusid selle vähendamiseks. Hõõrdumisseaduste alusel rakendatakse kahte põhilist viisi hõõrdumise vähendamiseks:

a) määrimine, s. o. kuiva hõõrdumise asendamine poolvedelaga;

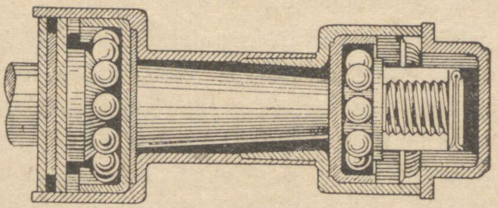
b) liugumise hõõrdumise asendamine veeremise hõõrdumisega.

Hõõrduvate pindade pidevaks määrimiseks kasutatakse mitmesuguseid määrimissüsteeme.

Liugumise asendamist veeremisega teostatakse rull- või kuullaagritega.



Joon. 104-d. Kuullaager.



Joon. 104-e. Jalgratta osa kuullaagritel.

Kuul- või rull-laagrites toetub pöörlev võll kuulidele või rullidele (joon. 104-d), mis on asetatud erilisse masina korpusega ühenduses olevasse rõngasse. Töötamise ajal kuulid pöörlevad ja seega liugumise hõõrdumine laagri vastu asendatakse veeremise hõõrdumisega kuulide vastu (joon. 104-e).

Kuni 1931. a. Nõukogude Liidus ei olnud kuullaagrite tööstust, välja arvatud üks väike tehas. Hiljem ehitati Moskvasse L. M. Kaganovitši nimeline hiigeltehas, mis vabastas meie maa selles suhtes sõltuvusest välismaast ja rahuldas selleks ajaks kerkinud masinaehitushiigeltehaste kuullaagrite tarviduse.

Hõõrdumise suurendamiseks kaetakse libedad teed ja rööpad liivaga, veorihmad kaetakse pulbriga ja viiuli poognat hõõrutakse kampoliga.

**Kirjandus.** Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I. „Трение скольжения" стр. 69, „Телега и паровоз", стр. 70, „Движение поезда", стр. 73, „Значение трения", стр. 74, „Внутреннее трение", стр. 76. Фридман, Трение в природе и технике, изд. „Начатки науки".

## *Harjutus 15.*

1) Miks autokummid tehakse reljeefse mustriga?

2) Miks talvel veoautode ratastele tõmmatakse peale ketid?

3) Miks vedur varustatakse liivakastiga?

4) Miks on raske hoida käes elavat kala?

5) Tooge peale raamatu näidete veel teile tuntud näiteid kasulikust ja kahjulikust hõõrdumisest.

6) Miks ei saa kirjutada kriidiga õliga määritud tahvlile?

7) Miks kiiresti käiv jalakäija, üle minnes karedalt teelt siledale, kukub tahapoole, aga üle minnes siledalt karedale kaldub ettepoole?

8) Missuguse hõõrdumise liigiga on tegemist uisutamisel harilike ja ratasuiskudega?

9) Kirjeldage, missugused muudatused juhtuksid teiega ja teie toa asjadega, kui äkki kaoks hõõrdumine?

10) Kuidas muutub rattapaari (ühel teljel) liikumise suund, kui teda juhtida nurga all äestatud põllu ja sileda tee piirile? Miks?

11) Rongi kaal on 490 000 kG. Millega on võrdne veotung ja hõõrdumistung ühtlase liikumise korral? Ülesannete lahendamisel kasutada tabelit III (ülesannetes 11—20 on liikumine ühtlane).

Vastus: 1470 kG.

12) Hobune tõmbab 45 kG-se tungiga. Missuguse raskusega koormat ta suudab vedada munakivi-teel? kivitamata teel?

Vastus: 2250 kG.

13) Koorem kaaluga 500 kG liigub veotungiga 50 kG. Leida hõõrdumiskoefitsient.

14) Terasjalastega saan koos koormusega kaalub 650 kG. Kui suur on veotung libedal jääl?

15) Puust kast koos koormuse raskusega 500 kG liigub mööda puust põrandat (põiki kiudusid). Leida hõõrdumistung.

16) Lihvitud pronksvalam liigub mööda pronksist lauda tungiga 50 kG. Leida valami raskus.

17) Metallkeha kaaluga 1000 kG liigub oma lihvitud küljega mööda samasugust horisontaalset õlitatud metall-lauda tungiga 70 kG. Leida hõõrdumiskoefitsient.

18) Tellis raskusega 4 kG liigub teist tellist mööda 2 kG tungi mõjul. Leida hõõrdumiskoefitsient.

19) Missugust hõõrdumist tuleb ületada kiviseina nihutamisel maapinda mööda, kui seina kaal on 900 kG ja hõõrdumiskoefitsient 0,45.

20) Terasjalastega saan kaaluga 800 kG liikus 2 tunni jooksul kiirusega 18 km/h. Leida kulutatud töö.

21. Miks lauale asetatud rööptahukas ei hakka kohe lauda mööda libisema, kui lauda ühest otsast tõsta?

22) Miks kotist väljalastud terad ei lähe lauda mööda laiali, vaid moodustavad koonilise kuhja?

## KONTROLLKÜSIMUSI.

1) Millal tekib ühe keha hõõrdumine teise vastu?

2) Kuidas võib seletada hõõrdumise tekkimist?

3) Missugused hõõrdumise liigid on olemas?

4) Missuguse katseriistaga ja kuidas saab uurida hõõrdumisseadusi?

5) Kuidas oleneb liugumise hõõrdumistung normaalrõhumisest?

6) Mida nimetatakse hõõrdumiskoefitsiendiks?

7) Missuguse arvuga avaldub liugumise hõõrdumiskoefitsient?

8) Kas oleneb liugumise hõõrdumiskoefitsient kokkupuutepinnast ja liikumise kiirusest?

9) Missugune tähtsus on pinna määrimisel?

10) Millest oleneb veeremise hõõrdumiskoefitsient?

11) Võrrelge liugumise hõõrdumist veeremise hõõrdumisega.

12) Milles seisab hõõrdumise kahjulikkus?

13) Milles seisab hõõrdumise kasulikkus?

14) Missugused hõõrdumise vähendamise viisid on olemas?

15) Millal on tarvis hõõrdumist suurendada ja milliste vahenditega saab seda teostada?

16) Kuidas on ehitatud kuul- ja rulllaagrid?

**84. Tungi töö koormuse tõstmisel kaldpinda mööda.** Võrdleme koormuse tõstmisel vertikaali mööda tehtud tööd kaldpinda mööda tehtud tööga.

Nagu me nägime §-s 68, *kaldpinnaga paralleelne tung (joon. 69), mis on vajalik keha hoidmiseks paigal või ilma hõõrdumiseta ühtlases liikumises, peab olema niimitu korda väiksem kõrgusega paralleelsest tungist, kui kaldpinna kõrgus on väiksem selle pikkusest, s. o.*

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

Teisendades saame:

$$\boxed{Fl = Ph.} \qquad \text{(XVI)}$$

$Ph$ väljendab keha ühtlaseks tõstmiseks kaldpinna kõrgusele $h$ tehtavat tööd.

$Fl$ väljendab liikumapaneva tungi $F$ poolt keha ühtlaseks hõõrdumiseta liikumiseks tehtavat tööd piki kaldpinna pikkust $l$.

Teine kehamõjutav komponent $P_2$ selle liikumise juures tööd ei tee, kuna ta on vertikaalne keha võimaliku liikumise suunaga. See tung kui normaalrõhumine mõjub hõõrdumise suurusele.

***Keha ühtlase hõõrdumiseta tõstmise juures mööda kaldpinda on tungi töö võrdne tööga, mis kulub keha tõstmiseks vertikaali mööda samale kõrgusele.***

Seega keha tõstmisel kaldpinna abil võidetakse tungis, kuna liikumapanev tung on alati väiksem keha raskusest. Kuid seeeest tee pikkus kaldpinda mööda on pikem teest vertikaali mööda niimitu korda, kui tung on väiksem keha raskusest, sellepärast ei ole ühtlase liikumise puhul ja hõõrdumise puududes töös võitu ega kaotust.

Tegelikult, nagu me teame, tekib ühe keha liikumisel teise pinda mööda möödapääsematult hõõrdumine.

Tegelik kaldpinda mööda liikumapanev tung on isegi ühtlase liikumise korral varem arvutatud tungist suurem.

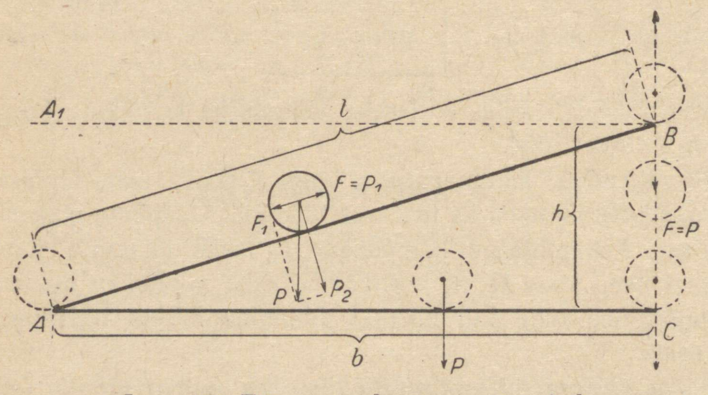
Kui tähistada antud keha hõõrdumiskoefitsient liikumisel kaldpinda mööda $f$-ga, siis hõõrdumistung $F_1$, mis on võrdeline normaalrõhumise $P_n$-ga, on võrdne $F_1 = fP_n$.

Seepärast on ühtlase liikumise tekitamiseks kaldpinnal tarvis tungi $F_2$, mis on veeremapaneva tungi $F$ ja hõõrdumistungi $F_1$ summa.

Tung $F = P \sin\alpha$; $P_n = P_2 = P \cos\alpha$; järelikult hõõrdumistung $F_1 = fP \cos\alpha$; $F_2 = F + F_1$; $F_2 = P \sin\alpha + fP \cos\alpha$.

Veotungi $F_2$ töö teepikkusel $l$ on võrdne:

$$A = F_2 l = Fl + F_1 l.$$




Joon. 105. Töö suurus koormuse tõstmisel.

**85. Raskustungi ületamiseks tehtav töö, kui keha viiakse ühest horisontaalasendist teise.** Kui on tarvis tõsta koormust raskusega $P$ horisontaalsest asendist $AC$ horisontaalsele asendile $A_1B$ (joon. 105) kõrgusele $h$, siis võib punktist $A$ punkti $B$ minna kas horisontaali $AC$ ja vertikaali $BC$ mööda, või mööda kaldpinda $AB$.

Keha liikumisel ilma hõõrdumiseta horisontaali $AC$ mööda tööd raskustungi ületamiseks ei ole vaja, kuna keha kaal on keha võimaliku liikumisesuunaga risti. Järelikult keha raskustungi ületamiseks vajalik töö keha liikumisel $AC$ mööda on võrdne nulliga, s. o.

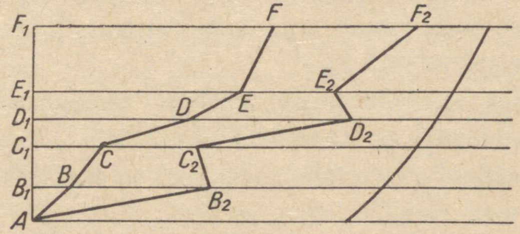
$$A_{AC} = 0.$$

Raskustungi ületamiseks vertikaali $BC$ mööda tehtud töö on ühtlase tõusu korral:

$$A_{BC} = Ph.$$

Terve töö $AC + CB$ ulatuses:

$$A_{AC+BC} = A_{AC} + A_{BC} = Ph.$$




Joon. 106. Koormuse tõstmise töö ei olene tee kujust.

Kaldpinda mööda ühtlaselt liikuma paneva tungi töö ilma hõõrdumiseta on:

$$A_{AB} = Fl.$$

Nagu varem tuletatud, $Ph = Fl$, järelikult:

$$A_{AB} = A_{BC},$$

s. o. *raskustungi ületamiseks tehtud töö kaldpinnal on võrdne keha tõstmiseks vertikaali mööda kaldpinna kõrgusele tehtava tööga.*

Kui kahe horisontaali vaheline tõus toimub (joon. 106) mingit murdjoont, näiteks $ABCDEF$ mööda, siis on töö esimese lüli $AB$ ulatuses võrdne tööga vertikaalil $AB$; töö teist lüli $BC$ mööda on võrdne tööga vertikaali $B_1C_1$ mööda jne. Terve töö murdjoont *ABCDEF* mööda on võrdne tööga äärmiste horisontaalpindade vahelist kaugust $AF_1$ mööda.

Lõpuks kahe horisontaalpinna vaheline koormuse tõstmise töö kõverat joont mööda on samuti võrdne tööga vertikaali mööda, kuna kõverat joont võime vaadelda kui väga suure lülide arvuga murdjoont. Järelikult:

***Keha liikumisel ühest horisontaalpinnast teise raskustungi ületamiseks tehtav töö oleneb nende pindadevahelisest kaugusest, aga mitte tee kujust.***

**86. Kasutegur.** Mehhanismide kasutamisel ületame alati takistusi: tõstmisel raskustungi, kokkusurumisel, venitamisel ja lõikamisel elastsustungi jts.

Mehhanismile rakendatud takistuse ületamiseks tehtavat tööd nimetatakse kasulikuks tööks.

Igas mehhanismis toimuvad kehade nihkumised on seotud hõõrdumisega.

Hõõrdumise ületamine nõuab lisatööd. Sellepärast on terve töö, ehk nõnda nimetatud kulutatud töö $A$, suurem kasulikust tööst $A_1$.

Vahe $A - A_1$ kujutab seda tööhulka, mida kulutame paratamatute kahjulikkude takistuste ületamiseks, et saada kasulikku tööd.

Kuna hõõrdumisega on tegemist igas masinas, siis ka igaühes neist tuleb vahet teha terve ehk kulutatud ja saadud ehk kasuliku töö vahel.

Mida suurem on kasulik töö kulutatud tööhulga juures, seda tulusam on masina tegevus. Masina tulukuse üle otsustame selle järgi, missuguse osa kogu kulutatud tööst moodustab kasulik töö.

*Masina kasuteguriks nimetatakse kasuliku töö ja kulutatud töö suhet.*

Kui tähistada kasutegur kreeka tähega $\eta$ (eeta), siis

$$\boxed{\eta = \frac{A_1}{A}.} \qquad \text{(XVII)}$$

Igal masinal on oma kasutegur.

Kõik tuntud võtted hõõrdumise vähendamiseks, nagu määrimine ja liugumise asendamine veeremisega, ongi selleks, et tõsta masina tootlikkust, tõsta kasutegurit.

### *87. Laboratoorne töö 3.* **Kaldpinna kasuteguri arvutamine.**

Töövahendid: 1) laud; 2) rööptahukas; 3) koormuste kogu; 4) meetermõõt; 5) dünamomeeter või selle asemel plokk, plekktoos, niit, haavlid või liiv; 6) kaalud vihtidega; 7) alus.

Töö jaguneb kaheks osaks: mõõta ära kasulik töö ja mõõta ära kulutatud töö keha ühtlasel tõstmisel kaldpinda mööda.

Kasulik töö kaldpinda mööda tõstmisel on võrdne, nagu nägime varem, $Ph$-ga. Siit on näha, milliseid suurusi peame mõõtma, et määrata kasulikku tööd.

Kulutatud töö saame, kui korrutame veotungi $F$ ühtlasel liikumisel kaldpinna pikkusega $l$. Kerge on näha, milliseid suurusi on tarvis määrata kulutatud töö arvutamiseks.

Töökäik. 1) Seadke töövahendid nii üles, nagu on näidatud joon. 107.

2) Mõõtke kaldpinna kõrgus $h = bc$, võttes ta esimene kord võrdseks 10 cm-ga, ja mõõtke ära kaldpinna pikkus $l = ab$.

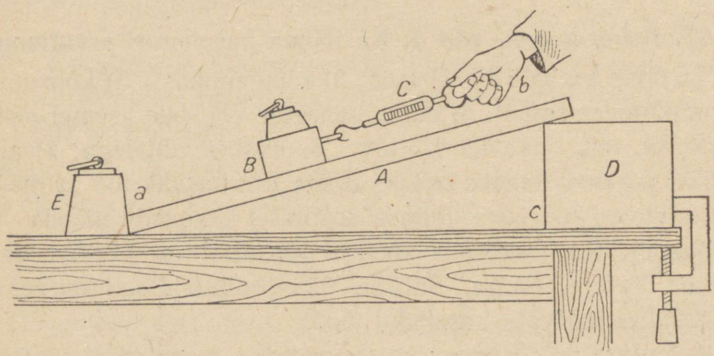
3) Leidke rööptahuka ja temale asetatavate koormuste raskus $P$ kG.

4) Asetage koormustega rööptahukas kaldpinnale, ühendage rööptahuka rõngas dünamomeetriga ja tõmmake ta ühtlaselt liikuma. Märkige ära dünamomeetri näitamine; niiviisi leiate veotungi $F$. Jälgige, et dünamomeeter oleks kogu aja kaldpinnaga paralleelne.

Veotungi mõõtmisel pole vajadust vedada rööptahukat kogu kaldpinna ulatuses.

Dünamomeetri puudumisel võib veotungi mõõta vihtidega plekktoosis, mis ripub üle ploki visatud nööri otsas; teine nööriots on rööptahuka küljes.

5) Koostage tabel mõõdetud suuruste jaoks; kandke sinna ka kasuliku töö, kulutatud töö ja kasuteguri $\eta$ arvutatud väärtused.




Joon. 107.

6) Sama kõrguse jaoks võtke uus koormus ja määrake uuesti kasutegur. Arvutage ühe ja sama kõrguse jaoks keskmine kasuteguri väärtus.

7) Korrake katset teiste kõrgustega.

8) Võrrelge kasutegureid mitmesugustel kõrgustel. Kas ja kuidas oleneb kasutegur kaldpinna kõrgusest?

9) Arvutage iga kõrguse jaoks hõõrdumise ületamiseks tehtud töö teepikkuse $l$ ulatuses ja arvutage selle järgi hõõrdumistungi suurus.

10) Arvutage normaalrõhumise suurus $P_n$; hõõrdumistungi ja normaalrõhumise järgi määrake hõõrdumiskoefitsiendi suurus ja võrrelge seda tabeli omaga.

*Harjutus 16.*

1) Missugusele kõrgusele tuleb tõsta 2 m pikkuse laua ots, et lauda mööda oleks võimalik vedada 100 kG koormust tungiga 16 kG (ilma hõõrdumiseta)?

2) Miks tee mäetippu tehakse siksakiliselt?

3) Kui suur on kaldpinna tõus iga 100 m pikkuse kohta, kui seda mööda tõstetakse koormust 960 kG tungiga 12 kG (ilma hõõrdumiseta)?

Vastus: 12,5 m.

4) 20 000 kG kaaluga vedur tõmmatakse köiega 50 m pikkust kaldpinda mööda 7,5 m kõrgusele. Leida köie tõmbetung ühtlase hõõrdumisega ja hõõrdumiseta liikumise puhul ja kasutegur.

Vastus: 0,98.

5) 1000 kG kaaluga keha tõstetakse vagunisse 5 m pikkuse ja 1 m kõrguse kaldpinna abil. Hõõrdumiskoefitsient on 0,2. Leida: tung ühtlasel hõõrdumisega liikumisel; hõõrdumistung tõusmisel ja kasutegur.

Vastus: 200 kG; 196 kG; $\approx$ 50%.

6) Rong kaaluga 500 000 kG tõuseb mäkke, mille tõus on 1 m 1000 m-i kohta. Leida veotung ühtlase hõõrdumisega liikumise puhul; normaaltung lugeda kaldenurga väiksuse tõttu võrdseks raskusega (hõõrdumiskoefitsient — 0,002).

Vastus: 1500 kG.

7) Rong kaaluga 500 000 kG ja kiirusega 36 km/h tõuseb iga 100 m kohta 1 m (tõus 0,01). Hõõrdumiskoefitsient on 0,002. Leida veduri võimsus (kehtib eelmise ülesande märkus).

Vastus: 800 HJ.

8) Saan koormusega, mille koguraskus on 200 kG, tõuseb ühtlaselt 10 m kõrgusega mäkke mööda 40 m-list tõusuteed. Hõõrdumiskoefitsient on 0,02. Leida veotung, kasulik töö ja kasutegur.

Vastus: $\approx$ 54 kG.

9) Leida tung, millega saan eelmises ülesandes veereks alla samast mäest.

Vastus: $\approx$ 46 kG.

10) 80 m pikkusega ja 16 m kõrgusega kaldpinda mööda tõmmatakse ühtlaselt koormust 225 kG. Kuidas muutub kasutegur, kui asetada kaldpind $30^0$ nurga alla? Hõõrdumiskoefitsient on 0,1.

Vastus: 0,67; 0,85.

11) Vedur võimsusega 400 HJ veab rongi üldise kaaluga 500 000

kG teel, mille kalle on 0,005, kiirusega 18 km/h. Määrata hõõrdumiskoefitsient (lugeda $P_2 = P$).

Vastus: 0,007.

12) 600 HJ-lise võimsusega vedur veab 500 000 kG-lise kaaluga rongi tõusvat teed mööda 100 m ulatuses kiirusega 36 km/h. Hõõrdumiskoefitsient on 0,003. Leida tõusu kõrgus (lugeda $P_2 = P$).

Vastus: 0,6 m.

13) 880 HJ-lise võimsusega vedur veab 1 000 000 kG kaaluga rongi teel, mille tõus on 0,008. Leida 2 minutiga läbitud tee (lugeda $P_2 = P$)?

Vastus: 720 m.

14) Määrata Dnjeprogesi keskmine võimsus, kui veekulu on 2000 $m^3$/sek, kõrgus 37 m, aga kasutegur 0,85 (energiakaotuste tõttu voolamistakistuste ületamiseks).

Vastus: 840 000 HJ.

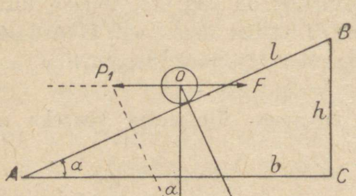
15) Leida tuuleseadeldise kasutegur, kui õhuvoolu ristlõige on 4 $dm^2$, voolu kiirus 10 m/sek ja kui seadeldis suudab tõsta 4 kG kõrgusele 1,5 m poole minutiga.

Vastus: $\approx$ 8%.

16) Traktori „Kletrak 40" kaal on 5,5 T, veokoefitsient sillutamata teel on 0,1, traktori võimsus on 60 HJ; kasutegur — 0,9, kiirus — 5,4 km/h. Maha arvates traktori enese liikumapanemiseks tarvitatud võimsuse, arvutada, missuguse võimsusega veab traktor külgehaagitud osi.

Vastus: 43 HJ.

**88. Teine viis tungi tasakaalustamiseks kaldpinnal.** Keha võib hoida kaldpinnal tasakaalus või ühtlases liikumises tungiga, mis on a l u s e g a p a r a l l e e l n e.




Joon. 108. Kaldpinna alusega paralleelne tasakaalustav tung.

Et leida sel juhul tasakaalustavat tungi, lahutame koormuse kaalu kaheks komponendiks, millest üks on kaldpinnaga risti, teine alusega rööbiti (joon. 108). Ristiseisva komponendi $P_2$ mõju hävib kaldpinna vastumõjuga. Komponent $P_1$ võib panna keha liikuma. Keha hoidmiseks paigal või ühtlases hõõrdumiseta liikumises kaldpinda mööda üles on küllaldane rakendada $P_1$-le võrdset ja vastassuunalist tungi. $F$. Võrdsete nurkadega $OPP_1$ ja $BAC$ sarnastest kolmnurkadest järgneb, et $P_1 : P : P_2 = BC : AC : AB$ ehk $P_1 : P : P_2 = h : b : l$, kust

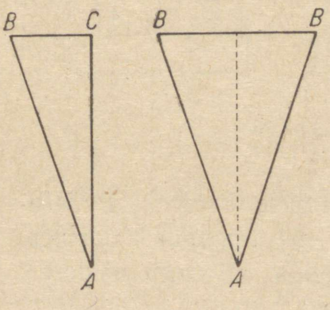
$$\boxed{P_1 = P\frac{h}{b},} \qquad \boxed{P_2 = P\frac{l}{b}.} \qquad \text{(XVIII)}$$

Vabastades võrduse $P_1 = P\frac{h}{b}$ nimetajast, saame

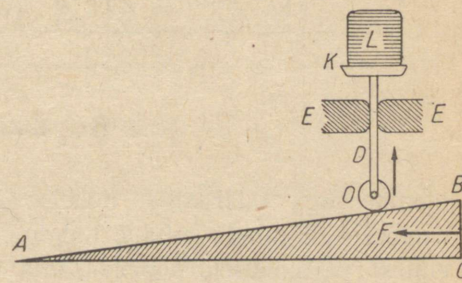
$$P_1 b = Ph.$$

$Ph$ on vertikaalsel tõusul kõrgusele $h$ raskustungi ületamiseks tehtud töö.

$P_1 b$ võib asendada temaga võrdse suurusega $Fb$, kuna $P_1 = F$. $Fb$ on aga tungi $F$ töö teepikkusel $b$. Et tõsta keha kõrgusele $h$, peab tung $F$ nihutama oma rakenduspunkti punktist $A$ kuni punktini $B$ kaugusele $b$ horisontaali mööda.




Joon. 109. Kiilu läbilõige.



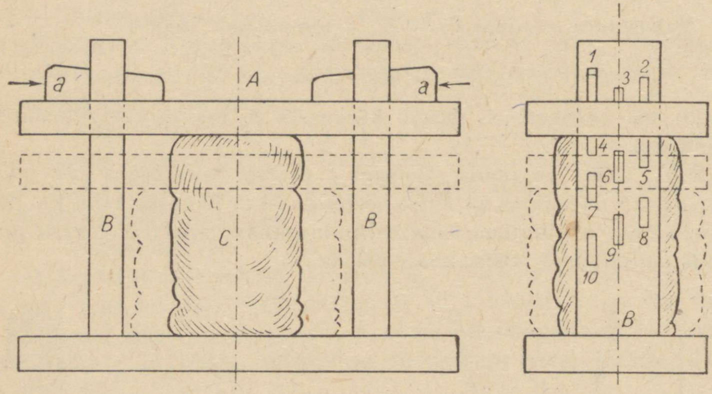

Joon. 110. Keha tõstmine liikuva kaldpinna abil.

Nii ka sel juhul *kaldpinna alusega paralleelse tungi töö ühtlase hõõrdumiseta liikumise korral kaldpinda mööda on võrdne vertikaali mööda tõstmisel raskustungi ületamiseks tehtud tööga.*

**89. Kiil.** Kiil on kõva keha, mille pikilõige on täisnurkne kolmnurk (joon. 109). Mõnikord tarvitatakse kiilu kahest täisnurksest kiilust kokkupandud kujul. Siis tema lõige on võrdhaarne kolmnurk.

Kiil esineb osana purustavate, lõikavate ja hööveldavate riistade juures, nagu nuga, käärid, kirves, peitel, höövel, ader jt.

Kiilu võib tarvitada kehade nihutamiseks (joon. 110). Varras $D$ on asetatud kahe juhtiva pinna $EE$ vahele, mis lasevad teda liikuda ainult üles-alla. Varda alumine ots lõpeb rattaga,



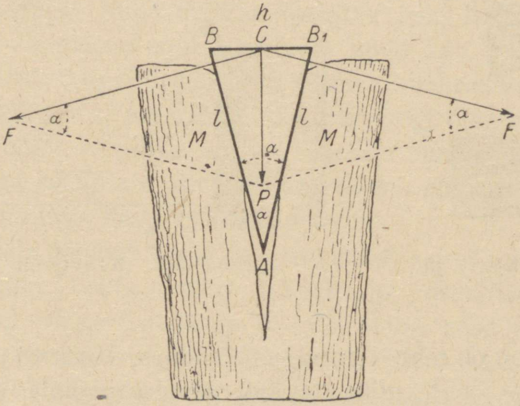

Joon. 111. Kiilpress.

ülemine aga taldrikuga, millele asetatakse koormus $L$. Selle asemel et liigutada keha $L$ tungiga $F$, võib liigutada kaldpinda ennast vastupidisele poolele sama tungiga, nii nagu näidatud joonisel.

Kiilu tarvitatakse veel kiilpresside juures (joon. 111) kehade kokkusurumiseks, osadeks lõhkumiseks või üldse sissetungimiseks töödeldavasse materjalisse (lõikavad ja lõhkuvad tööriistad).

Kujutleme, et kiil $BAB_1$ on löödud mingisse töödeldavasse materjalisse $MM$ (joon. 112) tungiga $P$, mis on risti kiilu seljaga $BB_1 = h$. Kehasse tunginud kiil tekitab selles survet ja kannatab omakorda ise keha vastumõju all. See vastumõju on suunatud risti kiilu küljega $l$. Joonisel 112 on kiiluseljaga ristiseisev tung $P$ lahutatud kaheks komponendiks $F$ ja $F$, mis on külgedega risti.

Iga komponent on võrdne ja vastassuunaline tungiga (joonisel see ei ole kujutatud), millega keha mõjutab kiilu ja seepärast tasakaalustab seda tungi. Kui ei oleks rakendatud tungi $P$, siis oleks kiil hõõrdumise puudumisel kehast välja tõugatud.




Joon. 112. Tungide tasakaal kiilul.

Kahe võrdsete tipunurkadega võrdhaarse kolmnurga sarnasusest järgneb:

$$F : P = AB : BB_1,$$

ehk

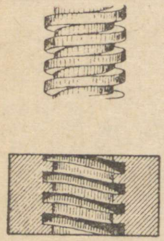
$$\boxed{F : P = l : h.} \qquad \text{(XIX)}$$

***Et hoida kiilu paigal või ühtlases hõõrdumiseta liikumises, peab kiilu seljaga risti mõjuv tung olema niimitu korda väiksem kiilu küljega risti seisvast tungist, kui mitu korda selja laius on väiksem külje pikkusest.***

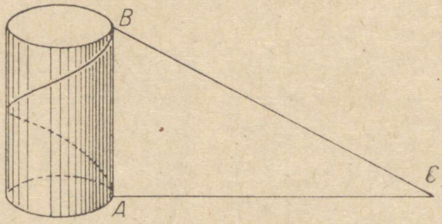
Kiilu kasutamisel on võit tungis seda suurem, mida kitsam on selg ja pikem külg. Kiil, nagu kaldpindki, mille üks liike ta on, ei saa anda võitu töös.

**90. Kruvi.** Teiseks tööriistaks, mida võime vaadelda **kui** kaldpinda, on kruvi.

K r u v i k s nimetatakse püstsilindrit, mille pinnale on tehtud täisnurkse või kolmnurkse läbilõikega kruvisoon (joon 113).



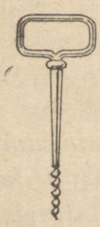
Joon. 113. Kruvi ja mutter.




Joon. 114. Kruvijoon.

Kruvisoon on tehtud kruvijoone suunas. K r u v i j o o n e k s nimetatakse joont, mille tekitab silindri pinnale kolmnurga hüpotenuus, kui kolmnurga alus on võrdne silindri ümbermõõduga ja kui kolmnurk mähitakse silindri peale (joon. 114).

Kruvijoone naaberpunktide vahet, mõõdetult mööda silindri moodustajat, nimetatakse k r u v i k ä i g u k õ r g u s e k s ehk k r u v i s a m m u k s.



Joon. 115. Puur.

Kruvi kui tööriista tarvitatakse materjalide töötlemisel, puusse, metallisse ja maasse aukude puurimisel. Sellisteks otstarveteks tarvitatavat kruvi nimetatakse p u u r i k s (joon. 115).

Keha, mis tihedalt haarab kruvisoont, nimetatakse m u t r i k s. Ka mutri sisepinnal on soon, ainult vastupidine kruvisoonele; kruvi kumerusele vastab mutri nõgusus ja ümberpöördult.

Kui hoiame mutrit kinni ja pöörame kruvi, siis kruvi nihkub oma telge mööda mingi lõigu võrra. Kui hoiame kinni kruvi ja pöörame mutrit, siis see nihkub kruvi telge mööda mingi lõigu võrra. Kui teha kruviga üks pööre, siis kruvi (või mutter) nihkub ühe kruvisammu võrra.

Kruvimisel puusse või metallisse või kui kruviga tõstetakse mingit koormust, rakendatakse ületatav tung-takistus kruvitelje suunas, kruvipea poole. Mõjuvat tungi aga, seda, millega ületatakse takistust, rakendatakse silindri ümbermõõdu puutuja suunas. Harilikult ei rakendata mõjuvat tungi otse silindri pinnale, vaid tehakse kruvile pea — suurema raadiusega ring — või pannakse silindrisse käepide; käepideme otspunkt või ringi punkt ongi mõjuva tungi rakenduspunktiks.

Et tuletada tungide tasakaalu tingimust kruvi juures, kasutame kaldpinna kohta saadud tööhulkade võrdumise seadust. Seda seadust võime laiendada kruvile, kuna selle juures üks tung on paralleelne kõrgusega, aga teine — paralleelne sama kaldpinna alusega, mille pikkus moodustab kruvijoone.

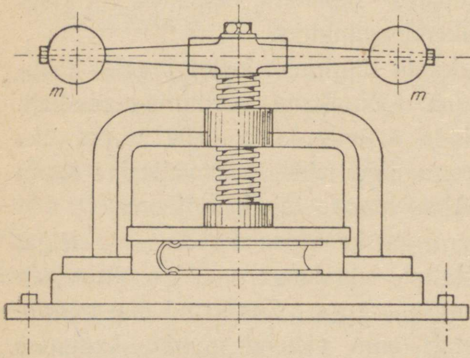
Tähistame kruvisammu $h$-ga, kruvipea raadiuse — $R$-ga, kruvi telje suunas rakendatud takistungi — $P$-ga, kruvipea puutuja suunas mõjuvat tungi — $F$-ga. Siis kruvi ühe pöörde puhul mõjuv tung $F$ nihutab oma rakenduspunkti kruvipea ümbermõõdu $2\pi R$ võrra ja sooritab töö $A_F = 2\pi RF$. Samal ajal takistuse rakenduspunkt $P$ nihkub kruvisammu $h$ võrra. Takistuse $P$ ületamiseks tehtud töö on võrdne $A_P = Ph$. Tööde võrdsusest $A_F = A_P$ järgneb: $2\pi RF = Ph$, kust

$$\boxed{F = \frac{Ph}{2\pi R}.} \qquad \text{(XX)}$$

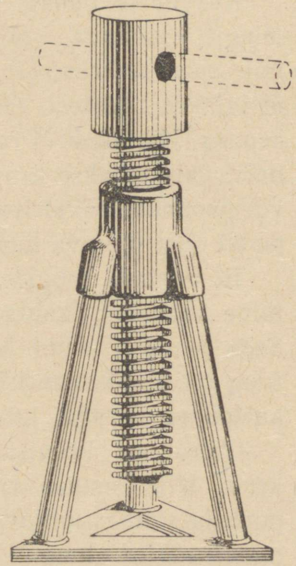
***Kruvi hoidmiseks paigal või ühtlases hõõrdumiseta liikumises peab kruvipeale rakendatud tung olema niimitu korda***

***väiksem telje suunas rakendatud tungist, kui kruvisamm on väiksem kruvipea ümbermõõdust.***

Igal tegelikul kruviga töötamise juhul tuleb arvestada veel hõõrdumistungi. Kui kruvijoont tekitava hüpotenuusi kaldenurk on teatud suurusega, siis kruvi on i s e p i d u r d a v: kui suur ka ei oleks koormuse raskus telje suunas, kruvi ei hakka hõõrdumistungi tõttu liikuma.



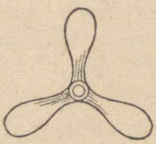

Joon. 116. Kruvipress.



Joon. 117. Tungraud.

Selle põhjal rakendatakse kruvi osade kinnitamiseks. Et kruvi paremini peaks, tehakse kruvisamm hästi väike ja soon kolmnurkne, kuna see annab suurema hõõrdumise kui täisnurkne. Viimast, ümberpöördult, tarvitatakse seal, kus kruvi annab edasi liikumist, näiteks pressi (joon. 116) ja tungraua (joon. 117) juures.

Tungraua juures me näeme, et kruvi tarvitatakse ka keha nihutamiseks. Pöörlev kruvi (joon. 118) paneb liikuma laeva ja lennuki (joon. 119).



Joon. 118. Sõudekruvi.

Joon. 119. Propeller.

***Harjutus 17.***

1) Kiilu selja laius $h = 5$ cm, külje pikkus $= 25$ cm. Missugune tung peab mõjuma seljale, et ületada küljele rakendatud 60 kG-line takistus?

Vastus: 12 kG.

2) Kiilu seljale rakendatud 10 kG-line tung tasakaalustab küljele rakendatud takistuse 240 kG. Selja laius on 60 mm. Leida külje pikkus.

3) Kiilu küljele, mille pikkus on 10 cm, on rakendatud takistus 100 kG. Seda tasakaalustab tung 25 kG. Leida selja laius.

Vastus: 2,5 cm.

4) Kiilu seljale mõjuv tung on 300 kG. Selja laius on 40 mm, külje pikkus — 160 m. Leida küljele rakendatud takistus.

5) Milline peaks olema kiilu külje ja selja laiuse suhe, et tungiga 120 kG ületada takistust 1000 kG?

Vastus: $8^1/_3$.

6) Kui suure koormuse võib tõsta tungrauaga, kui kruvisamm $h = 4$ mm, käepideme pikkus $R = 1$ m, käepidemele mõjuv tung $F = 25$ kG ja kasutegur $= 0{,}4$?

Vastus: 15 700 kG.

7) Kopeerpressi kruvisamm $h = 0{,}5$ cm, käepideme pikkus $R = 20$ cm, kasutegur $= 0{,}7$. Kui suure tungi peab rakendama käepideme otsale, et ületada takistust 600 kG?

Vastus: 3,4 kG.

8) Kiilu selja (joon. 112) $h = 1$ cm, külje pikkus $l = 10$ cm, seljale mõjuv tung $P = 16$ kG. Leida ületatav takistus.

Vastus: 160 kG.

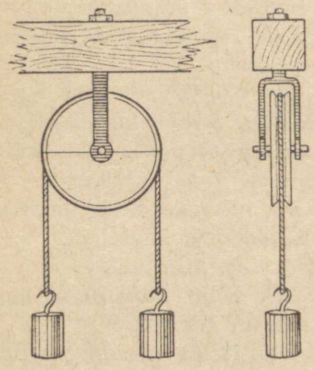
9) Kui suure tungi peab rakendama kruvi käepidemele, et ületada takistust $P = 2$ T, kui kruvisamm $h = 2$ cm ja käepideme pikkus $R = 50$ cm?

Vastus: 12,7 kG.

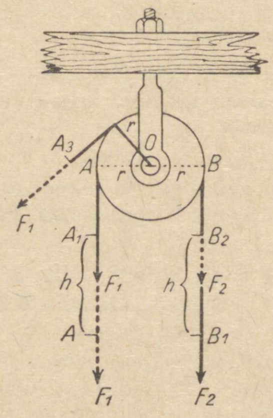
10) Käepideme pikkus $R = 40$ cm; käepideme otsale rakendatud tung $F = 18$ kG. Kruvisamm $h = 4$ mm. Leida ületatav takistus.

Vastus: 11 304 kG.

**91. Plokk.** Plokiks nimetatakse ümber telje pöörlevat silindrit, mille kõrgus on tublisti väiksem aluse raadiusest. Ploki külgpinnal on uure nööri või köie jaoks (joon. 120).



Joon. 120. Plokk.




Joon. 121. Liikumatu ploki skeem.

Kui ploki telg jääb töö ajal liikumatuks (joon. 121), siis p l o k k i nimetatakse l i i k u m a t u k s; kui ploki telg liigub, siis ka p l o k k i nimetatakse l i i k u v a k s (joon. 122). Plokke kasutatakse koormuste nihutamiseks.

L i i k u m a t u ploki uurdesse pannakse köis. Köie ühte otsa $B$ kinnitatakse koormus või rakendatakse mingi teine takistav tung $F_2$. Teise otsa rakendatakse m õ j u v tung $F_1$ (joon. 121).

Ploki paigalpüsimise või ühtlase pöörlemise jaoks ümber telje $O$ on vaja, et tungi moment, mis pöörab teda kellaosuti liikumise suunas, oleks võrdne tungi momendiga, mis pöörab kellaosutile vastassuunas.

Liikumatu ploki juures on nii ühe kui teise tungi õlaks ploki raadius. Tung $F_2$ pöörab plokki kellaosuti suunas ja evib momenti $F_2r$. Tung $F_1$ pöörab plokki kellaosutile vastassuunas ja selle moment on $F_1r$. Momentide võrdusest järgneb: $F_2r = F_1r$, kust

$$\boxed{F_2 = F_1.} \tag{XXI}$$

Seega:

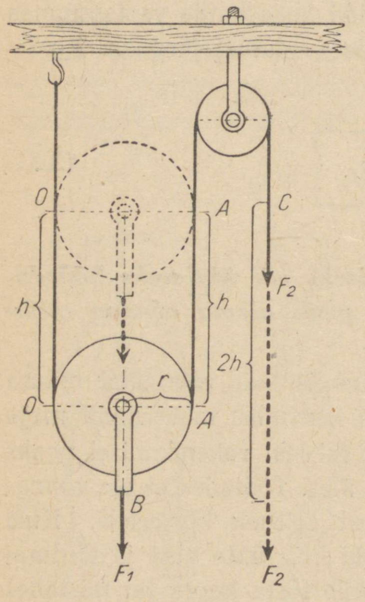
***Liikumatu ploki paigalhoidmiseks või ühtlaseks hõõrdumiseta liikumiseks mõjuv tung peab olema võrdne takistusega.***

Liikumatu plokk ei anna võitu tungis, kuid võimaldab muuta tungi suunda. Kui on tarvis tõsta koormust maapinnalt maja teise korruse tasemele, siis tungi vahetul rakendamisel peaks tung olema suunatud vertikaalselt üles. Töötades ei ole võimalik tõsta vahetult kätega koormust sellisele kõrgusele. Kuid kinnitades koormuse liikumatu ploki köie ühte otsa ja tõmmates teisest otsast (suunas $A_3F_1$), võib tõsta koormust mistahes kõrgusele.

Hindame mõjuva tungi ja takistuse ületamiseks tehtavat tööd liikumatu ploki juures. Et tõsta koormust või üldse takistuse rakenduspunkti kõrgusele $h$, tuleb nihutada mõjuva tungi rakenduspunkti tungi suunas samuti $h$ võrra. Et ületada takistust $F_2$, tuleb selle rakenduspunkti rakendada võrdne ja vastassuunaline tung. Siis on takistuse ületamiseks tehtav töö teepikkuse $h$ ulatuses võrdne $A_2 = F_2h$. Mõjuva tungi $F_1$ töö samal teepikkusel $h$ on $A_1 = F_1h$. Kuna $F_2 = F_1$, siis ka $A_2 = A_1$.

***Koormuse ühtlasel hõõrdumiseta tõstmisel või takistuse rakenduspunkti nihutamisel liikumatu ploki abil on mõjuva tungi töö võrdne takistuse tööga.***

Siit järgneb, et ka liikumatu plokiga ei ole võimalik saada töös võitu. Vastupidi, igas plokis esineb vältimatult hõõrdumine; sellepärast on mõjuv tung $F_1$ suurem takistusest hõõrdumistungi võrra. Kulutatud töö on suurem koormuse tõstmise kasulikust tööst ja liikumatul plokil on suurem või väiksem kasutegur, olenedes hõõrdumise suurusest.



Joon. 122. Liikuva ploki skeem.

Liikuva ploki juures kinnitatakse tõstetav koormus ploki telje külge seatud klambri konksu külge (joon. 122); takistuse rakenduspunkt asub ploki teljel. Koormust tõstev tung rakendatakse köie vaba otsa mingisse punkti, näiteks punkti $A$. Selle asemel et suunata tungi vertikaalselt üles, võib, visates köie üle liikumatu ploki, rakendada samasugust tungi vertikaalselt alla. Tõstmisel liikuv plokk pöörleb ümber punkti $O$ läbistava telje. Punkt $O$ on kinnise köieotsa puutepunkt ja telg on risti joonise tasapinnaga. Et selles veenduda, teeme ploki välisele äärele mingid märgid.

Ploki tõstmisel liigub märk telje läheduses kõige vähem. Järelikult läbib pöörlemistelg sel momendil punkti $O$. Selle telje suhtes on takistustungile $F_1$ õlaks ploki raadius $r$ ja momendiks $F_1 r$. Mõjuva tungi õlg on $2r$ ja moment $2rF_2$. Tung

$F_1$ püüab plokki pöörata kellaosuti suunas, tung $F_2$ — vastassuunas. Momentide võrdusest $2rF_2 = F_1 r$ järgneb:

$$\boxed{F_2 = {}^1/_2\, F_1.} \qquad \text{(XXII)}$$

***Liikuva ploki paigalhoidmiseks või ühtlaseks hõõrdumiseta liikumiseks mõjuv tung peab olema kaks korda väiksem takistusest.***

Seega võidame liikuva plokiga tungis kaks korda.

Et liikuva plokiga tõsta takistuse rakenduspunkti $h$ võrra, peame, nagu nähtub joon. 122, tõmbama köie vabanevaid osi $OO$ ja $AA_1$, mis summas annavad $2h$. Järelikult nihutab mõjuv tung oma rakenduspunkti kaks korda rohkem kui takistus.

Takistuse ületamise töö $A_1 = F_1 h$. Mõjuva tungi töö $A_2 = 2hF_2$, kuid $F_2 = {}^1/_2\, F_1$, kust $A_2 = 2h \cdot {}^1/_2\, F_1 = F_1 h$.

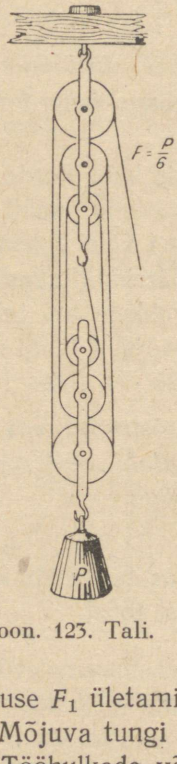
***Koormuse ühtlasel hõõrdumiseta tõstmisel või takistuse rakenduspunkti nihutamisel liikuva ploki abil on mõjuva tungi töö võrdne takistuse ületamise tööga.***

Töös võitu ei saa olla.

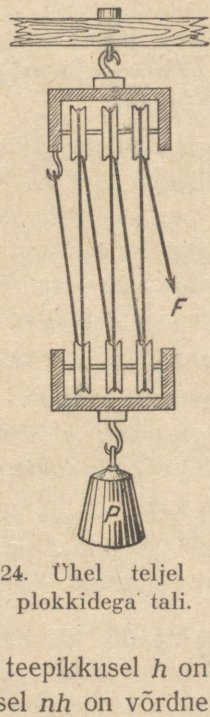
Kõigis plokkides on tegelikult olemas hõõrdumine ja selle tõttu on kulutatud töö suurem kasulikust tööst.

**92. Liitplokk.** Et saavutada tungis veel suuremat võitu, ühendatakse mitu plokki. Teatud viisil saadud plokkide ühendust nimetatakse liitplokiks. Liitplokk, mis koosneb ühesugusest plokkide arvust mõlemas hargis — ühes liikuvad, teises liikumatud —, nimetatakse taliks (joon. 123). Mõnikord asetatakse kõik liikuvad plokid ühele teljele ja liikumatud teisele teljele (joon. 124). Et tõsta koormust 1 m kõrgusele 6 plokiga tali abil, mis on kujutatud joonisel 123, peame tõmbama 1 m võrra igaühte kuuest nöörist. Seega peab nööri vaba ots liikuma 6 m võrra. Siin peab tööhulkade võrdsuse tõttu mõjuv tung olema kuus korda väiksem takistusest.

Üldiselt $n$ ploki puhul, koormuse tõstmisel $h$ m võrra, tuleb $n$ nöörist igaühte nihutada $h$ m võrra, järelikult peab nööri vaba ots liikuma $nh$ m võrra.




Joon. 123. Tali.




Joon. 124. Ühel teljel asuvate plokkidega tali.

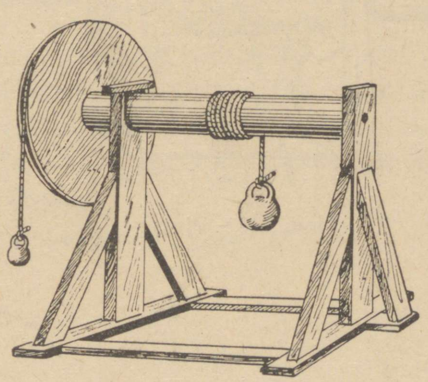
Takistuse $F_1$ ületamiseks tehtav töö teepikkusel $h$ on $A_1 = F_1 h$. Mõjuva tungi $F_2$ töö teepikkusel $nh$ on võrdne $A_2 = nhF_2$. Tööhulkade võrdumisel $nhF_2 = hF_1$, kust

$$\boxed{F_2 = \frac{F_1}{n}.} \tag{XXIII}$$

***Koormuse paigalhoidmiseks või ühtlaseks hõõrdumiseta nihutamiseks liitplokil peab mõjuv tung olema takistusest niimitu korda väiksem, kui liitplokis on plokke.***

Talisid kasutatakse ladudes koormate tõstmiseks, ehitustel — materjalide tõstmiseks, raudteejaamades — kivisöe laadimiseks tendritele ja purjelaevadel — maste hoidvate köite (vantide) pingutamiseks. Tali printsiipi kasutatakse ekraanide ja purikatuste (telgikatte) pingutamisel jne.

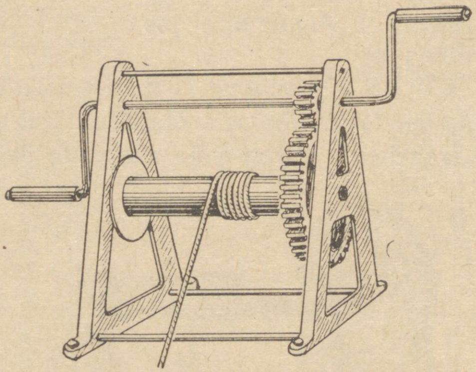
**93. Pöör.** Pööraks nimetatakse võlli koos selle teljele asetatud rattaga (joon. 125). Pööra töötamise ajal pöörleb selle telg kinnistes laagrites. Ratast võib asendada üksikute koda-



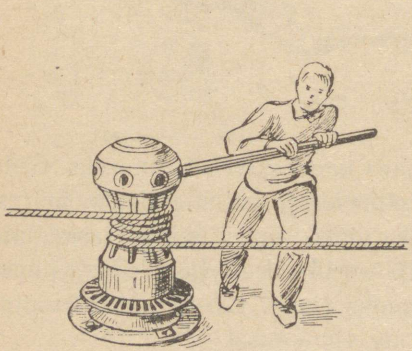
Joon. 125. Pöör.

ratega. Sellist pööra tarvitatakse kaevust vee tõstmiseks. Seda võib sagedasti näha raudteejaamades ja vahimajakeste juures. Hammasratastega pööra ehk vintsi tarvitatakse raskemate kehade nihutamisel (joon. 126). Vertikaalse teljega pööra nimetatakse p e l i k s ehk kabestaniks (joon. 126-a). Peli kasutatakse sagedasti laevadel ankrute vinnamisel.

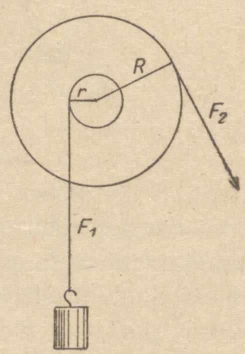
Pööra abil ületatav takistus rakendatakse harilikult võlli ümber mähitud köiele. Takistust tasakaalustav või pööra ühtlaselt liikumapanev tung rakendatakse rattale mähitud köiele. Mõjuvat tungi võib ka otseselt ilma köieta rakendada rattale või radiaalse kodara otsale. Mõlemad tungid mõjuvad võlli ja ratta puutujate sihis (joon. 127). Mõjuv ja ületatav tung peavad olema rakendatud pöörale nii, et anda vastassuunalisi pöördemomente.



Joon. 126. Vints.



Joon. 126-a. Peli.




Joon. 127. Pööra skeem.

Mõjuva tungi $F_2$ õlg on ratta raadius $R$; selle moment on $F_2R$. Takistustungi $F_1$ õlg on võlli raadius $r$; selle moment on $F_1r$.

Momentide võrdusest $F_2R = F_1r$ järgneb:

$$\boxed{F_2 : F_1 = r : R,} \qquad \text{(XXIV)}$$

järelikult:

***Pööra paigalhoidmiseks või ühtlaseks hõõrdumiseta pööramiseks peab rattale rakendatud tung olema niimitu korda väiksem võllile rakendatud tungist, kui võlli raadius on väiksem ratta raadiusest.***

Pööra ratta pööramisel täispöörde võrra liigub mõjuva tungi $F_2$ rakenduspunkt ringi ümbermõõdu $2\pi R$ võrra ja teeb tööd $A_{F_2} = 2\pi RF_2$. Selle ajaga liigub takistuse $F_1$ rakenduspunkt võlli ümbermõõdu $2\pi r$ võrra. Takistuse ületamiseks tehtav töö $A_F = 2\pi rF_1$.

Korrutades mõlemad võrduse (XXIV) $F_1r = F_2R$ pooled $2\pi$-ga, saame:

$$2\pi rF_1 = 2\pi RF_2 \text{ s. o. } A_{F_1} = A_{F_2},$$

järelikult:

***Pööra ühtlasel takistuseta liikumisel on mõjuva tungi töö võrdne takistuse ületamiseks tehtava tööga.***

***Harjutus 18.***

1) Liikumatu ploki abil tõstetakse 240 kG koormus 2 m kõrgusele tungiga 300 kG. Leida kasulik töö ja kasutegur.

Vastus: 0,8.

2) Liikuva ploki abil tõstetakse 210 kG koormus 1,5 m kõrgusele tungiga 120 kG. Leida kasulik töö ja kasutegur.

Vastus: 0,87.

3) Missugust tungi, võrreldes oma kaaluga, rakendab inimene, tõstes ennast üle liikumatu ploki visatud ja keha külge seotud köie abil?

4) Liitplokk koosneb neljast plokipaarist. Missugust hõõrdumiseta tungi on tarvis rakendada, et tõsta koormust 500 kG? Missugusele kõrgusele tõstetakse koormus, kui köie vaba ots liigub 10 m võrra? Leida kasulik töö.

Vastus: 62,5 kG.

5) Missugust tungi tuleb rakendada pööra rattale, et hõõrdumiseta tasakaalustada koormust 300 kG, mis on rakendatud pööra võllile, kui võlli raadius on 40 cm ja ratta raadius 1,2 m?

Vastus: 100 kG.

6) Missugust tungi on tarvis rakendada liikumatu ploki nöörile, et ühtlaselt tõsta koormust 96 kG, kui kasutegur on 0,8?

Vastus: 120 kG.

7) Kui suurt tungi tuleb rakendada liikuva ploki köiele, et ühtlaselt tõsta koormust 60 kG, kui kasutegur on 0,75?

Vastus: 40 kG.

8) Missugust koormust võib ühtlaselt tõsta 3 plokipaariga liitploki abil tungiga 95 kG, kui kasutegur on 0,6?

9) Missugust tungi tuleb rakendada pööra rattale, et tõsta ühtlaselt pööra võlli külge rakendatud koormust 120 kG, kui võlli raadius on 30 cm, ratta diameeter 1,5 m ja kasutegur 0,75?

10) Kaevu pööra võlli raadius on 30 cm ja ratta raadius on 1,2 m. Võlli köis käib ümber liikuva ploki, millele on riputatud koormus 48 kG. Köie vaba ots on kinnitatud kaevu ülemise tala külge. Kui suurt tungi tuleb rakendada pööra rattale, koormuse ühtlaseks hõõrdumiseta liikumiseks ja missugust võimsust tuleks arendada, et tõus 30 m toimuks 2 minutiga?

Vastus: 6 kG.

11) Mitu plokipaari tuleb võtta liitplokis, et tõsta ühtlaselt 360 kG koormust 100 kG tungiga, kui kasutegur on 0,6?

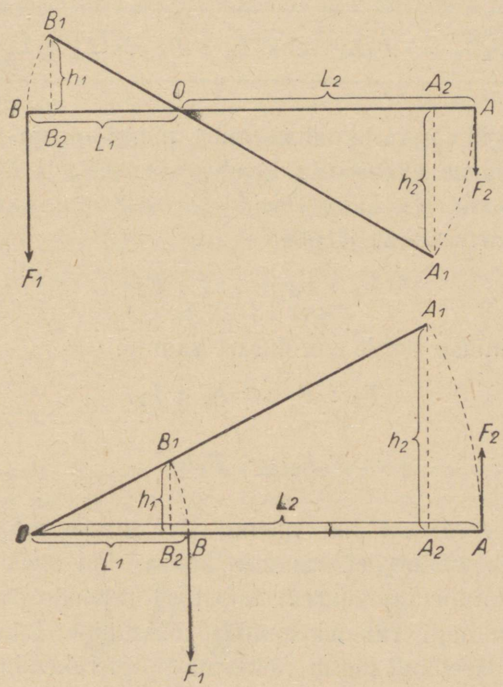
12) Missugune peab olema pööra võlli ja ratta raadiuste suhe, et oleks võimalik ühtlaselt tõsta 400 kG koormust 100 kG tungiga, kui kasutegur on 0,8?

Vastus: 1 : 5.

13) Koormuse ühtlasel tõstmisel liitplokiga 2 m võrra on tehtud 840 kGm tööd. Mõjuv tung on 100 kG ja kasutegur 0,7. Mitu plokipaari on liitplokis?

**Kirjandus.** Ханфштенгель, Общедоступное введение в технику, статья „Расчёт работы на лебёдке“, стр. 49—53.

**94. Kang.** Tahke keha, millele on rakendatud mõjuvad tungid ja takistustungid, mis püüavad seda keha pöörata ümber mingi telje, nimetatakse kangiks. Tõstes teibaga kivi, kangutades haamri terava otsaga naelu, kaevates labidaga maad, sõudes aerudega ja töötades vikatiga, tarvitatakse neid kehi kõige lihtsamat liiki kangidena.




Joon. 128. Kangi skemaatiline kujutus.

Kasutame kangi juures põhilist tungide tasakaalu seadust. Ühte kangile rakendatud tungidest nimetatakse takistustungiks, teist (või teisi), mis tahab panna kangi telje ümber pöörlema, nimetatakse mõjuvaks tungiks. Rakendades kangi juures üldist pöörlevate kehade tasakaalu tingimust, saame:

***Kangi paigalseismiseks või ühtlaseks hõõrdumiseta pöörlemiseks ühes suunas peab pöörlemapaneva tungi moment olema võrdne vastassuunas pöörlemapaneva tungi momendiga.***

Kui kujutada kange skemaatiliselt nii nagu joonisel 128, siis võib tasakaalu tingimust märkida nii:

$$\boxed{F_2 L_2 = F_1 L_1 \quad \text{ehk} \quad F_2 : F_1 = L_1 : L_2.} \qquad \text{(XXV)}$$

Kui kangid on tasakaaluasendist mingi nurga võrra välja viidud, siis lähevad tungide rakenduspunktid $F_2$ ja $F_1$ õlale tõmmatud ristjoone sihis kaugusele $h_2$ ja $h_1$. Kolmnurkade $A_1OA_2$ ja $B_1OB_2$ sarnasusest järgneb:

$$h_1 : h_2 = L_1 : L_2.$$

Kahe viimase võrde võrdlusest saame:

$$F_2 : F_1 = h_1 : h_2,$$

siit

$$F_2 h_2 = F_1 h_1.$$

Saadud võrdusest me tuleme järeldusele: mõjuv tung on väiksem takistustungist niimitu korda, kui selle rakenduspunkti nihkumine on suurem takistuse rakenduspunkti nihkumisest. Kummagi rakenduspunkti nihkumine toimub ühel ja samal ajal. Järelikult liigub väiksema tungi rakenduspunkt suurema kiirusega.

Sellest kangi omadusest ilmneb nn. mehaanika kuldne reegel:

***Tungis võidetakse samapalju kui kaotatakse nihkumise kiiruses, ja ümberpöördult.***

Tungi $F_2$ tööd teepikkusel $h_2$ mõõdab korrutis $F_2h_2$. Tungi $F_1$ tööd teepikkusel $h_1$ mõõdab korrutis $F_1h_1$.

Võrdsusest järgneb:

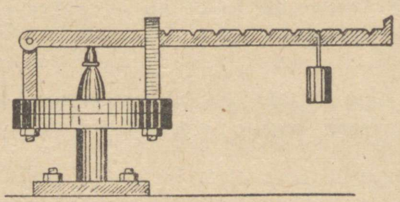
***Kangi ühtlasel hõõrdumiseta nihkumisel on mõjuva tungi töö võrdne takistuse ületamiseks tehtava tööga.***

Ka sel juhul me jällegi veendume, et tööriistaga töös võitu ei saa olla. Kui vaadelda tungi $F_1$ kui takistust, siis, kasutades kangi, me paremal juhul (hõõrdumise puudumisel) sooritame mõjuva tungiga $F_2$ samasuure töö, kui me oleksime kulutanud takistuse $F_1$ rakenduspunkti nihutamiseks kauguse $h_1$ võrra ilma kangita.

Hõõrdumise tõttu on mõjuva tungi töö kangil suurem, kui see on takistuse otsesel ületamisel ilma kangita. Kangi kui tööriista kasu ei seisa mitte töõhulga võitmises, vaid selles, et kangi abil saame väiksema tungiga ületada suuremaid takistusi kui töötades ilma selleta. Kui aga kasutada on suurem tung kui ületatav takistus, siis, rakendades suuremat tungi lühemale õlale, võib võita teepikkuses.

***Harjutus 19.***

1) Aurukatla kaitseventiil kujutab endast kangi, mille pöörlemistelg on ühes otsas (joon. 129). Ümmarguse ventiili diameeter $D = 6$



Joon. 129. Kaitseventiil.

cm. Auru rõhumine $p = 11$ kG/cm$^2$. Ventiili kaugus teljest on 7 cm. Ühtlase kangi kaal $P = 1$ kG. Kangi pikkus 43 cm. Kui suurt tungi on vaja rakendada kangi otsale, et tasakaalustada aurusurvet?

Vastus: $\approx 50$ kG.

2) Kangi õlgade pikkus on 25 ja 45 cm. Lühemale õlale on rakendatud takistus 100 kG, suuremale — tung 60 kG, mis on samasuunaline ja hoiab kangi ühtlases liikumises. Leida kasutegur.

Vastus: $\approx$ 0,93.

3) Õlale pikkusega 20 cm on rakendatud 96 kG tung, teisele õlale pikkusega 50 cm on rakendatud vastassuunaline tung 40 kG; kang on ühtlases liikumises. Leida kasutegur.

Vastus: 0,96.

4) 12 cm õlale on rakendatud 150 kG tung. Kui suure paralleelse ja samasuunalise tungi peame rakendama teisele õlale pikkusega 40 cm, et hoida kangi ühtlases liikumises?

Vastus: 45 kG.

5) 18 cm õlale on rakendatud 200 kG tung. Kui suure paralleelse vastassuunalise tungi peame rakendama 30 cm-lisele õlale, et hoida kangi ühtlases liikumises?

Vastus: 120 kG.

6) Kangi 24 cm-lisele õlale on rakendatud 300 kG tung. Kui kaugele teisele poole telge on tarvis rakendada 96 kG-list tungi ja kuhu poole seda suunata, et hoida kangi ühtlases liikumises?

Vastus: 75 cm.

7) 20 cm-lisele õlale on rakendatud 60 kG tung. Kui kaugele samale poole telge kus esimenegi tung on vaja rakendada teist 24 kG-list tungi ja kuhu seda suunata, et kangi hoida ühtlases liikumises?

Vastus: 50 cm.

8) Millega on võrdne ja kuhu on suunatud vastumõju kõikides eelmistes kangi ülesannetes?

**Kirjandus.** Ханфштенгель, Общедоступное введение в технику, статья „Расчёт мостовой фермы на основе закона рычага", стр. 25—28.

**95. Tööhulga jäävuse seadus masinate juures.** Meie eest käis läbi terve rida tööriistu — kaldpind, kiil, kruvi, kang, plokk ja pöör —, mis on inimese poolt leiutatud selleks, et nende abil sooritada tööd talle majanduslikuks otstarbeks vajalikkude kehade juures, selle asemel et nende kehade juures tarvitada otseselt lihaste jõudu.

Me nägime, et nende tööriistadega töötades inimene võidab kas tungis või teepikkuses, kuid mitte kunagi ega ühegi riistaga ta ei saavuta võitu töös.

***Tööriistadele rakendatud mõjuva tungi töö on alati täpselt võrdne kõikide — nii kasulike kui ka kahjulike takistuste ületamiseks tehtava tööga.***

Need tööriistad kuuluvad keerukamate seadeldiste koostisse, mida nimetatakse masinateks. Seepärast kehtib ka nende kohta eespool formuleeritud üldine seadus, mida nimetatakse töö jäävuse seaduseks.

Eespool käsiteldud mehaanilistest nähtustest ja masinate tööst ilmneb, et mehaanilistes nähtustes toimub ainult energia muundumine, mitte aga kadumine ega tekkimine.

Energia jäävuse seadus purustab paljude leiutajate igivana lootuse ehitada jõumasin, mis saanud kord teatud energia hulga, võib ise kasulikule tööle kulunud osa alatasa uuendada. Selline masin on saanud igavesti liikuva masina ehk ladina keele järgi *perpetuum mobile* nime. Palju vahendeid, jõudu, tervist ja isegi elusid on toodud ohvriks sellele ideele, kuna saadi aru, et sellise energiaallika andmisega oleks inimkonnale osutatud võrratu heategu.

Ajaloo sajandite jooksul on esitatud tuhandeid perpetuum mobile projekte, mille hulgas on palju väga huvitavaid [1].

Kuid täpsem füüsika tundmine ja tema põhilise seaduse — energia jäävuse avastamine löövad sellel ideel jalad alt. Sajandite pikkustel katsetel ilmnenud võimatus ehitada perpetuum mobile't kinnitab omalt poolt energia jäävuse seaduse kehtivust.

---

[1] Mõned projektid võiksid olla füüsikaringi referaatide teemadeks.

## *KONTROLLKÜSIMUSI.*

1) Mida nimetatakse masinaks?

2) Missugune on kaldpinnal asuva keha tasakaalu tingimus, kui mõjuv tung on paralleelne kaldpinnaga?

3) Missugune on kaldpinnal asuva keha tasakaalu tingimus, kui mõjuv tung on paralleelne kaldpinna alusega.

4) Milles seisab kaldpinna juures tööhulga seadus?

5) Millist mõju avaldab keha liikumisele kaldpinnal kaldpinnaga ristiseisev keha raskustungi komponent?

6) Kas kaldpinnaga ristiseisev komponent keha liikumisel kaldpinda mööda teeb tööd?

7) Millega on võrdne veotung keha ühtlasel hõõrdumisega liikumisel kaldpinda mööda?

8) Mida nimetatakse kaldpinna kasuteguriks?

9) Kas kaldpinna kasutegur oleneb kaldenurgast ja kuidas?

10) Missugune on tungide tasakaalu tingimus kiilul?

11) Kas saab kiilu abil töös võita, kui ei ole hõõrdumist?

12) Milleks tarvitatakse kiilu?

13) Miks kiilu saab kasutada seadeldistes osade kinnitamiseks?

14) Mida nimetatakse kruviks?

15) Mida nimetatakse kruvisammuks?

16) Anda tungide tasakaalu tingimus kruvi juures.

17) Milles seisab tööhulkade seadus hõõrdumiseta kruvi juures?

18) Milleks kasutatakse kruvi?

19) Miks saab kruvi kasutada osade kinnitamiseks?

20) Mida nimetatakse tungiõlaks?

21) Mida nimetatakse tungi momendiks?

22) Missugune on pöörlemistelge eviva keha tasakaalu tingimus, kui temasse mõjub palju tunge?

23. Milles seisab kangi kasutamisel kasu ja kahju?

24. Kas hõõrdumise olemasolu korral on kulutatud töö võrdne kasuliku tööga?

25) Mida nimetatakse plokiks?

26) Missugune on liikuva ploki tasakaalu tingimus?

27) Mida nimetatakse pööraks?

28) Missugune on pööra tasakaalu tingimus?

## III. Hüdro-aero-mehaanika.

**96. Vedelikkude kokkusurutavus.** Kuidas muutub vedeliku ruumala igakülgse surve puhul? Kallame pikasse silindrisse liitri vett või mingit teist vedelikku. See täidab silindri teatud kõrguseni. Kallame veel 1 liitri juurde. Kaheliitrise samba kõrgus on kaks korda suurem kui üheliitrise samba kõrgus, kolmeliitrise — kolm korda suurem jne. Siit järgneb, et kõrgemal asuvate osade rõhumine ei muuda alumiste ruumala.

Teadlased uurisid vedelikkude kokkusurutavust hiiglasuurte, üle 40 000 kG/cm² rõhkude juures ja leidsid, et *vedelikkude kokkusurutavus on tühiselt väike.*

Vesi kuni 500 kG/cm² rõhu all laseb end 0° juures kokku suruda 47 miljondiku võrra esialgsest ruumalast, piiritus — 77 miljondikku, eeter — 107 miljondikku. 2 500 kG/cm² ja 3 000 kG/cm² rõhu piirides vesi laseb end kokku suruda 26, piiritus 28 ja eeter 32 miljondiku võrra esialgsest ruumalast.

Vee tühise kokkusurutavuse tõttu hukkuvad allveelaevad pommi lõhkemisest isegi kuni 50 m kaugusel, juhul kui pommi lõhkemine toimub sellisel sügavusel, et vesi ei kerki merepinnal.

**96-a. Rõhumise edasiandmine vedelikkudes ja gaasides.** Staatikas vaatlesime tahket keha kui sellist, mille osad ei liigu tungide mõjul üksteise suhtes. Vastandina sellele on vedelikkude ja gaaside osakesed üksteise suhtes kergesti liikuvad. Sellest liikuvusest oleneb, et vedelikud ja gaasid annavad teisiti rõhku edasi kui tahked kehad.

Meenutame, et rõhku mõõdab ühele pindühikule risti mõjuv tung.

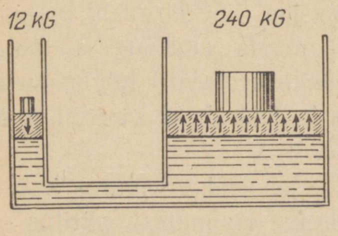
Kui tungi tähistada $F$-ga, pinda, millele mõjub tung, $S$-ga ja rõhku $p$-ga, siis

$$\boxed{p = \frac{F}{S}.} \qquad \text{(XXVI)}$$

P a s c a l (XVII saj.) leidis, et:

***Kinnises anumas annab vedelik või gaas rõhku edasi igas suunas ja ühteviisi.***

Kui vabalt võetud kujuga anumas on vedelik, ja kui selle anuma mingi avausse asetada tihedasti liikuv kolb ja tekitada sellega vedelikule rõhku näit. 2 kG/cm², siis igale ruutsentimeetrile mingist vedelikus võetud pinnast antakse lisarõhku 2 kG/cm².



Joon. 130. Rõhu edasiandmine vedelikkudes.

Vedeliku selles omaduses võime veenduda järgmise katsega. Võtame kaks erinevate läbilõikepindadega anumat (joon. 130), ühendame nad alt peenikese toruga ja täidame vedelikuga. Anumatesse paneme kolvid ja oletame, et nad liiguvad tihedalt ja ilma hõõrdumiseta. Kui väiksema pindalaga kolvile mõjuda mingi ristimõjuva tungiga, siis teine kolb hakkab tõusma. Et seda paigal hoida, peame ka sellele rakendama mingi ristiseisva tungi. See tasakaalustav tung osutub esimesest tungist niimitu korda suuremaks, kui teise kolvi pindala on suurem esimese kolvi pindalast.

Kui esimese kolvi pindala on näiteks $S_1 = 6$ cm² ja temale mõjub tung $F_1 = 12$ kG, aga teise kolvi pindala $S_2 = 120$ cm², kui suur tung mõjub siis teisele kolvile?

Rõhk esimesele kolvile on:

$$p = \frac{F_1}{S_1} \text{ (1)}; \quad p = \frac{12 \text{ kG}}{6 \text{ cm}^2} = 2 \text{ kG/cm}^2.$$

Rõhk antakse teisele kolvile ühtlaselt edasi, järelikult igale $cm^2$-le mõjub 2 kG tung, aga kogu pinnale $S_2$ — tung $F_2$. Siis

$$F_2 = pS_2; \quad F_2 = 2 \text{ kG/cm}^2 \cdot 120 \text{ cm}^2 = 240 \text{ kG}.$$

Kuna $p = \frac{F_2}{S_2}$ (2), siis (1) ja (2) võrdusest järgneb: $\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1}$, s. o. vedeliku poolt edasiantud rõhumine pinnale on võrdeline pinna suurusega.

Seda vedeliku omadust kasutatakse tehnikas näiteks hüdraulilise pressi juures.

**96-b. Hüdrauliline press.** Pascali seadusele põhjeneb hüdraulilise pressi ehitus.

Hüdraulilise pressi leiutas 1812. a. Gladhill. See kujutab endast masinat, mille abil töö antakse töödeldavale esemele vedeliku kaudu, mis on torujuhtmes ja rõhumise all.

Hüdrauliline press koosneb kahest osast: osast, mis annab hüdraulilisele pressile suure rõhu all vett, ja hüdraulilisest pressist enesest (joon. 130-a).

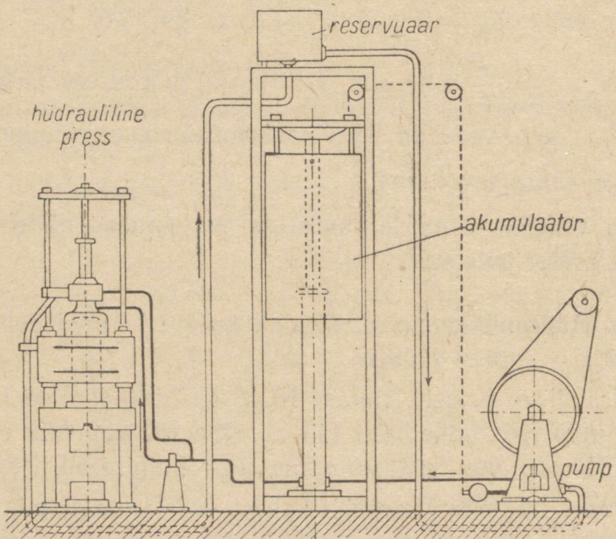
Läbilõikes on hüdrauliline press kujutatud joonisel 130-a. Malmist või terasest raam asetseb neljal terassambal, mis toetuvad alumisele raamile.

Selles alumises raamis asetseb silinder. Sellesse antakse toru kaudu vett (või mingit teist vedelikku). Vesi tõstab üles sileda pinnaga kolvi, mida nimetatakse pumbakolviks (ingl. k. *plunger*). See pumbakolb on ühendatud põikpinnaga, mis surub töödeldava eseme ülemise liikumatu raami vastu.

Kui vesi lastakse silindri alt välja, siis silinder oma raskusega langeb tagasi.

Kui hüdraulilist pressi kasutatakse metalli tagumiseks, siis peab pumbakolb koos põikpinnaga alla laskuma ja vett antakse hüdraulilise pressi ülemises osas asetsevale silindrile.

Tagasikäik, s. o. pumbakolvi tõus saavutatakse vee laskmisega teise silindrisse *b*.




Joon. 130-a. **Hüdraulilise pressi läbilõige.**

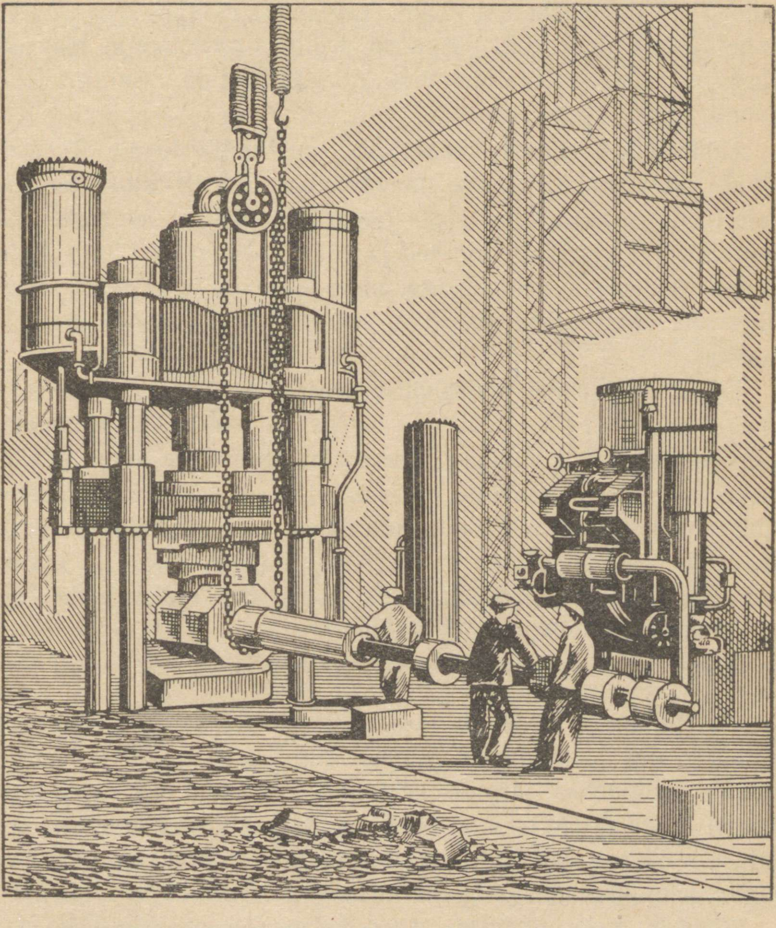
Tung, millega press mõjutab töödeldavat eset, oleneb silindrisse tuleva vee survest ja pumbakolvi diameetrist.

Kui vee rõhk on $p$ kG/cm², *siis mõjuv tung on rõhu ja pumbakolvi ristlõike pindala korrutis.*

Kui pumbakolvi diameeter on $D$ cm, siis ristlõike pindala on $\frac{\pi D^2}{4}$ cm² ja mõjuv tung on võrdne

$$F = \frac{\pi D^2 p}{4} \text{ kG.}$$

Vee andmine on näidatud joonise parempoolses osas. Vett andev pump pannakse tööle mingi mootori, suuremalt jaolt



Joon. 130-b. Hüdrauliline press.

elektrimootori poolt. Vesi satub toru *m* mööda akumulaatorisse (seadeldis, mis hoiab rõhu pidevana), sealt jaotajasse *n* ja siis toru *c* kaudu silindrisse *a*. Tagasikäigu jaoks lastakse kõrge rõhu all olev vesi ka silindrisse *b*. Silindrist *a* voolab vesi tagasikäigu ajal välja toru *p* kaudu reservuaari, kust ta jälle läheb pumba kaudu käiku. Vee surve kõigub väga suures vahemikus 6 at-st kuni 500 at-ni. Kõige tarvitatavam hüdraulilise pressi jõud on 1 000 T-st kuni 2 000 T-ni. Suurim jõud küünib kuni 15 000 T-ni.

Hüdraulilist pressi kasutatakse metallitööstuses. Terasetükid, mida valmistatakse laevaehituse, relvatööstuse ja paljude teiste rasketööstuse alade jaoks, võtavad iga aastaga ikka suuremad ja suuremad mõõted ja küünivad kuni 60 T-ni. Neid ei saa töödelda auruhaamriga, kuna löögi mõju ei ulatu kuigi sügavale. Hüdraulilise pressi surve aga mõjub tervele metallimassile.

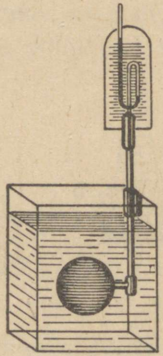
Laialt on levinud hüdraulilise pressi kasutamine v o r m i - m i s m a s i n a t e juures — rehvide panemisel ratastele, valtside seadmisel võllidele, portselani, tselluloosi, papi, kunstsarve ja teiste plastainete pressimisel. Eriti laialt kasutatakse hüdraulilisi presse toiduainete tööstuses: taimeõli saamine lina, päevalille, puuvillataime, mooni, õlipuu, pähkli, kakao jt. seemnetest ja viljadest, marjamahlade pressimine, makaronide valmistamine ja vedelikkude filtreerimine.

Joonis 130-b kujutab ühte suuremat hüdraulilist pressi.

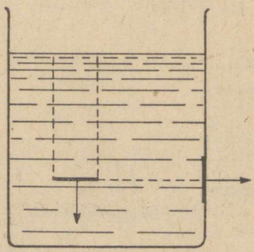
**97. Rõhumine vedeliku sees.** Küsimusele, kas on rõhumist vedeliku sees ja kuidas ta muutub sügavuse muutudes, võime vastata, tuginedes järgmisele katsele. Madala, õõnsa metallsilindri *D* üheks põhjaks on õhukene elastne kummikile. Silindri küljesse on pandud toru *T*, mis ühendab silindri sees olevat õhku vesimanomeetriga (joon. 131).

Silindrit saab pöörata. Ühendades selle kummitoru abil manomeetriga, pööratakse kile üles ja lastakse sügavasse vedelikuga (vesi või mingi teine vedelik) anumasse. Silindri sukeldumisel tõuseb vedelik manomeetri *M* lahtisel poolel. See tuleneb sellest, et kile paindumisega sissepoole silindris olev õhk surutakse kokku ja õhk surub toru kaudu manomeetri vedeliku ühelt poolt teisele.

Silindri edaspidisel laskumisel sügavamale manomeetri vedelik lahtisel poolel tõuseb ikka kõrgemale ja kõrgemale.



Joon. 131. Rõhumine vedeliku sees.



Joon. 131-a. Rõhumine küljele on võrdsete sügavuste puhul võrdne rõhumisega horisontaalsele pinnale.

Kui peatada silinder mingil sügavusel ja pöörata teda, siis teatud sügavusel jääb pööramise kestel manomeetri näitamine muutumatuks, olenemata sellest, kas kile asetseb horisontaalselt, kaldu või vertikaalselt, kas ta on pööratud üles või alla.

Järeldused:

*1) Vedelikus tekib vedeliku kaalust sõltuv rõhumine;*

*2) rõhumine vedelikus suureneb sügavusega;*

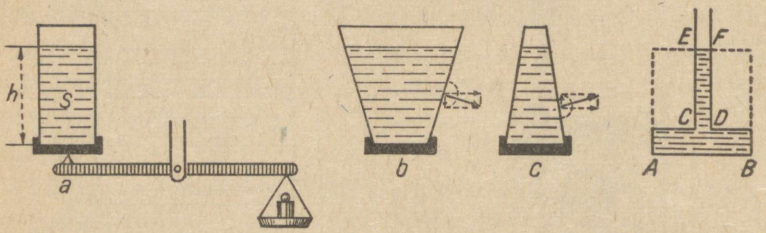
*3) antud sügavuses rõhumine ei sõltu pinna asendist; rõhumine antud pinnale selle mitmesugustes asendites, külgedelt ja alt üles on sama mis ülalt alla.*

Et rõhumine kasvab sügavusega ja et ta antud sügavusel on igas suunas ühesugune, tuleneb vedeliku põhilisest omadusest.

Vedeliku raskusest olenevat rõhumise suurenemist sügavusega ei tule ära segada välise rõhu ühtlase edasiandmisega.

Toodud katsest võib järeldada, et vedelik avaldab rõhumist anuma põhjale ja seintele.

Milline ka oleks seina kuju, iga selle ruutsentimeeter on sama rõhu all mis horisontaalseski asendis, kui sügavuseks võtta küljepealt võetud samasuguse pinna keskmine sügavus.




Joon. 132. Vedeliku poolt anuma põhjale tekitatud rõhumise mõõtmine.

Millega võrdub siis vedeliku rõhumine vedeliku sees asuvale pinnale?

Vastuse sellele küsimusele saame järgmisest katsest: plaat *a* (joon. 132) on kinnitatud võrdsete õlgadega kangi ühte otsa; teises otsas rippuvale kausile asetatakse koormus, mis täpselt tasakaalustab plaadi; eraldi seisvale statiivile kinnitatud püstsilinder asetatakse nii, et plaat *a* oleks talle põhjaks.

Siis asetatakse kausile mingi koormus; selle koormuse raskusega surub plaat vastu silindrit. Silindrisse kallatakse ettevaatlikult vedelikku senikaua, kuni plaat *a* veidi nihkub silindrist ära ja laseb vedelikku läbi. Mõõtes põhja pindala, valatud vedeliku kõrguse ja vedeliku erikaalu, võime näidata, et rõhumine põhjale on võrdne vertikaalsete seintega anumasse valatud vedeliku kaaluga.

Siit ja eelmistest katsetest saame põhilise järelduse:

***Rõhumist mingis sügavuses mõõdetakse vedeliku samba***

***kaaluga, mille aluseks on 1 $cm^2$ ja kõrguseks — pinnakese keskpunkti kaugus vedeliku nivoost; see rõhumine ei olene pinnakese asendist (orientatsioonist).***

Kui pind on $S$, kõrgus $h$ ja vedeliku erikaal $d$, siis vertikaalsamba ruumala on $hS$, aga vedeliku kaal või pinnale mõjuv tung on $F = dhS$, rõhk $\left(p = \frac{F}{S}\right)$, siit

$$\boxed{p = dh.} \qquad \text{(XXVII)}$$

Milline ka oleks anuma kuju ja pinnakese suund, rõhumine ühes ja samas sügavuses antud vedelikus on ühesugune. Võib katseliselt veenduda, et erisuguste kujudega anumates, mis on asetatud riista (joon. 132) liikuvale põhjale, tuleb vedelikku kallata ühele ja samale kõrgusele, et saada ühte ja sama rõhumistungi.

Ei tule ära vahetada rõhumistungi põhjale vedeliku kaaluga, mida määrame vedeliku kaalumisega koos anumaga. Vedeliku kaal anumas *b* on suurem, aga anumas *c* väiksem kui anumas *a*. Vahetegemiseks kaalu ja põhjarõhumise vahel lahutame rõhumise mingile külgpinna elemendile kaheks komponendiks — horisontaalseks ja vertikaalseks. Kui asetada anumad kaaludele, siis horisontaalne komponent ühelgi juhul ei mõjuta kaalusid; vertikaalne komponent liitub põhjarõhumisega anumas *b*, aga lahutub anumas *c*. Märgime, et anumas *AB* peenikeses torus olev tühine vedeliku hulk tekitab põhjale samasuguse rõhumise mis terve samale põhjale toetuv vertikaalne sammas (joonisel märgitud punktiiriga).

Kui anum *ACDB* ja toru *EFDC* täita tahke kehaga, siis keha kaal torus avaldaks põhjale *AB* niimitu korda väiksema rõhumise kui pinnale *CD*, mitu korda pind *AB* on suurem pinnast *CD*.

**98. Vedeliku nivood ühendatud anumates.** Ühendatud anumateks nimetatakse anumaid, mis on alumistes osades toru kaudu ühendatud.

***Üksteist vastastikku tasakaalustavad vedelikkude sambad ühendatud anumates asetuvad nii, et nad oma alustele*** [1] ***avaldavad võrdseid rõhumisi,*** s. o.

$$\boxed{d_1 h_1 = d_2 h_2.} \qquad \text{(XXVIII)}$$

Seda võrdust võib teiste sõnadega väljendada nii: ***Vastastikku tasakaalustuvate vedelikusammaste kõrgused on pöördvõrdelised nende erikaaludega.***

Kui ühendatud anumad täita ühe ja sama vedelikuga, siis on ülemised nivood kõikides anumates ühel horisontaalil, s. o. vedelikusambad on kõikides anumates ühesuguste kõrgustega. Seda vedeliku omadust kasutatakse geodeetiliste tööde juures horisontaaljoone määramiseks, veevärgis vee jaotamiseks korruste järgi, arteesiakaevude ja purskkaevude ehitamisel jm.

**99. Vedeliku mõju vedelikku asetatud kehasse.** Füüsika algkursuses kirjeldatud lihtsa katsega tehakse kindlaks vedeliku ja gaasi mõju neisse asetatud kehasse. See mõju oli arvestatud kreeka teadlase Archimedese poolt peaaegu 2200 aastat tagasi ja on tuntud Archimedese seaduse nime all.

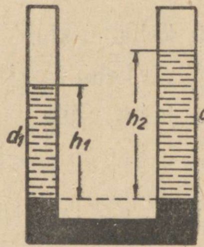
***Vedelik või gaas mõjuvad neisse asetatud kehasse vertikaalselt üles suunatud tungiga, mis on võrdne vedeliku või gaasi kaaluga selle keha sukeldunud osa ruumalas.***

Saab näidata, et see mõju tuleneb nendest rõhumistest, mida vedelik või gaas avaldab temasse asetatud pindadele. Sukeldunud keha on ümbritsetud erinevate sügavustega pinda-

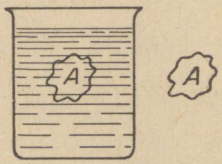
---

[1] Vedelikkude sammaste alused on nende kokkupuutepinnad kolmanda vedelikuga, mille nivood on mõlemas anumas ühesugused.

dest. Alumised, sügavamal asetsevad kannatavad rõhumist alt üles, ülemised — ülalt alla. Kuna alumistele pinnaosadele mõjuvad tungid on suuremad ülemistest, siis üldine pinnale mõjuvate tungide resultant on suunatud vertikaalselt üles.

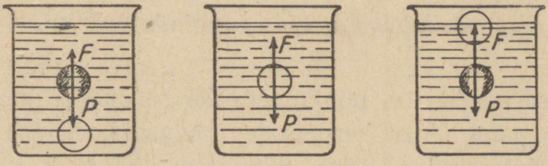



Joon. 133. Erinevate vedelikkude asetus ühendatud anumates.




Joon. 134. Archimedese seaduse tuletamine.

Võtame mistahes kujuga keha (joon. 134) ja eraldame mõttes vedeliku sees täpselt samasuure ja samasuguse kujuga vedeliku osa *A*. See osa vedelikust ei liigu mitte kuhugi poole. Järelikult temasse mõjuvate tungide summa tasakaalustub




Joon. 135.

tema raskusega. Kujutleme, et see vedelikuosa on välja võetud ja asendatud sama suure ja samakujulise kehaga, siis teda ümbritseva vedeliku mõju ei muutu; järelikult tung, millega vedelik mõjutab vedelikku sukeldunud keha, on võrdne vedeliku raskusega keha ruumalas. Sama arutelu kõlbab ka gaaside kohta.

Seega mõjuvad vedelikku või gaasi asetatud kehasse üheaegselt kaks tungi: keha kaal $P$ suunaga vertikaalselt alla ja üleslüke $F$, mis on võrdne keha poolt väljatõrjutud vedeliku või gaasi kaaluga ja suunatud vertikaalselt üles. Kerge on taibata (joon. 135), et

kui kaal $P$ on suurem üleslükkest $F$, siis keha vajub põhja,
„ „ „ „ võrdne üleslükkega „ „ on keha tasakaalus,
„ „ „ „ väiksem üleslükkest „ „ keha ujub.

Vahe $F - P$ on tõstetung.

Neid vahekordi arvestatakse allveelaevade, õhupallide ja tsepeliinide tõusu ja languse juures, uppunud laevade tõstmisel, tuukrite sukeldumisel jts.

**100. Kehade ujumine vedeliku pinnal.** Kui $P < F$, siis keha tõuseb üles. Kui osa kehast ilmub vedeliku pinnast kõrgemale, siis osa üleslükkest kaob. Keha tõuseb niikaua, kuni üleslüke võrdub keha kaaluga. Seega saame järgmise tingimuse keha ujumiseks vedeliku pinnal:

***Kui keha ujub vedeliku pinnal, siis on keha kaal võrdne vedeliku sees oleva keha osa poolt väljatõrjutud vedeliku kaaluga.***

Ujumise seadus on põhjapanevaks seaduseks peal- ja allveelaevade ning õhust kergemate (õhupallid, dirižaablid) õhulaevade ehitamisel. Laeva võimaliku laadungi määramisel peame teadma laeva kaalu ja selle osa ruumala, mis võib jääda vee alla. Väljatõrjutud vee kaalu ja laeva kaalu vahe annab võimaliku laadungi suuruse.

Laeva kogukaalu, s. o. laeva enese ja laadungi kaalu kokku laeva normaalse vajumise korral nimetatakse t o n n a a ž i k s. Laeva normaalse vajumise puhul laeva peale märgitud joont nimetatakse v e s i j o o n e k s (vaterliin). 10 000 T-ne laev vajub vette vesijooneni juhul, kui üleslüke on 10 000 T. Järelikult on väljatõrjutud vee kaal ka 10 000 T. Selle ruumala on 10 000 m³. Seega on tonnaaž arvuliselt võrdne laeva vee all oleva osa ruumalaga kuupmeetrites. Seepärast räägitakse tonnaaži asemel veeväljasurvest.

Allveelaeva sukeldumisel on tarvis suurendada kaalu. Selleks otstarbeks lastakse vesi laeva siseruumis olevatesse kambritesse. Laeva tõusmisel vee pinnale surutakse vesi kambritest sururõhuga välja.

Õhulaevade (dirižaabel, õhupall) laadungi suuruse määramisel lahutame laeva ruumala suuruse õhuhulga kaalust laeva enda kaalu. Kuna õhu erikaal on võrdlemisi väike, tuleb õhulaevad ehitada suured. Need täidetakse vesinikuga, mis on 14 korda õhust kergem, või heeliumiga, mis on küll vesinikust raskem, kuid tulekahju mõttes vähem kardetav, kuna heelium ei põle.

Õhulaeva kasutatakse õhuühenduste pidamisel, õhupallid aga on tähtsad teaduslikel uurimistel ja sõjaasjanduses.

**101. Erikaalu määramine Archimedese seaduse põhjal.** Keha erikaalu $d = \frac{P}{V}$ määramiseks on tarvis mõõta keha kaal $P$ ja ruumala $V$ ning esimene arv jagada teisega.

Tahke keha erikaalu määramisel on vaja leida:

1) keha kaal õhus $P$,

2) keha kaal vedelikus $P_1$.

Arvutada väljatõrjutud vedeliku kaal või üleslüke $P - P_1$.

Teades väljatõrjutud vedeliku kaalu, leiame selle ruumala $V = \frac{P - P_1}{d_0}$, kus $d_0$ on vedeliku erikaal, milles toimub kaalumine. Kaalutava keha ruumala on sama suur. Keha erikaalu saamiseks tuleb selle kaal õhus $P$ jagada selle ruumalaga $V$:

$$d = \frac{P}{V}; \quad d = \frac{P}{P - P_1} d_0 .$$

Vedeliku erikaalu määramiseks on vaja:

1) leida mingi tahke keha kaal õhus $P$;

2) leida selle keha kaal $P_1$ tuntud erikaaluga $d_0$ vedelikus;

3) leida selle keha kaal $P_2$ uuritavas vedelikus.

Siis $P - P_2$ annab uuritava vedeliku kaalu keha ruumalas, aga $P - P_1$ on vedeliku kaal keha ruumalas, mille erikaal on $d_0$; siit saame keha ruumala: $V = \frac{P-P_1}{d_0}$, järelikult

$$d = \frac{P-P_2}{P-P_1} d_0 .$$

Vees lahustuvate tahkete kehade erikaalu määramise jätame õpilaste taibukuse arvele.

Märkused.

1) Kuna § 33-nda järgi keha kaal on võrdeline massiga, siis on kirjeldatud erikaalu määramise võtted õieti tiheduse määramise võtted. Tihedus muutub temperatuuri muutumisega, sellepärast tiheduse määramisel taandatakse see teatud temperatuurile.

2) Kuna õhk avaldab kehale üleslükkavat mõju, siis iga keha kaal õhus on väiksem kaalust tühjuses ja muutub rõhumise, temperatuuri ja niiskuse muutudes.

**102. Areomeeter.** Vedelikku kaalumata saame selle erikaalu määrata riistaga, mida nimetatakse areomeetriks [1]. See kujutab endast õõnest toru (joon. 136), mille ülemises otsas on pikk peenike toru, alumises osas aga on elavhõbe või haavlid selleks, et areomeeter ujuks vedelikus vertikaalses asendis.

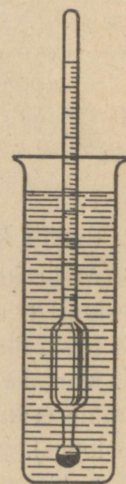
Kui areomeeter ujub vedelikus, siis, nagu me teame, selle kaal on võrdne sukeldunud osa poolt väljatõrjutud vedeliku kaaluga.

Kui asetame areomeetri mitmesuguste tihedustega vedelikkudesse, siis üks ja sama areomeeter vajub tihedamates vede-

[1] Kreekakeelseist sõnadest *araios* — vedel, *metron* — mõõt.

likkudes vähem, hõredamates vedelikkudes rohkem. Esimesel juhul piisab väljatõrjutud vedeliku väiksemast hulgast kui teisel juhul, et selle kaal oleks võrdne areomeetri kaaluga.

Et oleks võimalik tiheduse arvuline määramine areomeetriga, tuleb areomeeter varustada skaalaga, s. o. gradueerida. Harilikult kasutatakse kahte liiki areomeetreid: tiheduste määramiseks, mis on suuremad kui üks, ja tiheduste määramiseks, mis on väiksemad ühest.



Joon. 136. Areomeeter.

Kui areomeeter on ette nähtud ühest suuremate tiheduste määramiseks, siis kallatakse temasse niipalju elavhõbedat, et ta vajuks puhtas vees kuni peenikese toru ülemise otsani; kui ühest väiksemate tiheduste jaoks, — siis peenikese toru aluseni. Esimest tüüpi areomeeter lastakse tuntud tihedustega vedelikkudesse, näiteks lahustesse tihedusega 1,1; 1,2; 1,3 jne. Areomeeter vajub igaühes isesugusele sügavusele ja iga kord tehakse areomeetrile vedeliku pinna kohal märk. Samuti gradueeritakse vedelikkudes, mille tihedused on 0,9; 0,8; 0,7 jne. teist liiki areomeetrit. Et mõõta mingi vedeliku tihedust, lastakse temasse gradueeritud areomeeter ja skaalal märgitakse ära jaotus, mille kohal seisab vedeliku pind.

Mõnikord märgitakse areomeetrile tiheduse asemel mingid teised tihedusest olenevad suurused. Nii näiteks laktomeetril — areomeetril piima jaoks — märgitakse rasva protsendid; alkoholimõõtjal — areomeetril piirituse ja vee segu jaoks — piirituse protsendid jts.

**103. *Laboratoorne töö 4.* Keha erikaalu määramine hüdrostaatilise kaalumise kaudu.**

T ö ö v a h e n d i d 1) kaalud vihtidega; 2) mõned veest raskemad kehad; 3) niidid; 4) klaas; 5) traaditükk pikkusega 10—15 cm; 6) mitmesuguseid vedelikke.

*Ülesanne 1.* Määrata veest raskema keha erikaal.

T ö ö k ä i k. 1. Koostage andmete jaoks tabel:

| Katse nr. | Keha kaal õhus | Keha kaal vees | Üleslüke | Keha erikaal |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

2. Siduge keha kaalukangi külge ja kaaluge ta õhus.

3. Määrake selle keha kaal vees (valvake, et keha ei puudutaks klaasi seinu, samuti ei tohi klaas puudutada kaalusid.

4. Määrake Archimedese seaduse järgi keha erikaal.

5. Korrake määramist mitu korda, leidke uuritava aine keskmine erikaal ja võrrelge seda tabeli omaga (tabel IV raamatu lõpus).

6. Tehke määramist mitme kehaga.

7. Määrake samade kehade erikaal selle rõhumise järgi, mis sukeldunud keha tekitab vedelikule. Korraldage see järgmiselt:

Pange ühele klaaskausile pooleni veega täidetud klaas ja tasakaalustage kaalud. Kaal ja teised andmed kandke tabelisse:

| Katse nr. | Keha kaal õhus | Klaasi kaal veega | Klaasi kaal veega, kui vette on lastud keha | Keha ruumala | Keha erikaal |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

8. Laske klaasis olevasse vette mingi varem võetud kehadest, riputage see niidi otsa (valvake, et keha ei puudutaks klaasi seinu); niit hoidke käes või riputage statiivile.

9. Tasakaalustage kaalud, hoides keha vees.

10. Kaal kirjutage tabelisse.

11. Arvutage keha poolt veele tekitatud rõhumine.

12. Teades keha kaalu ja keha rõhumist vedelikule, arvutage keha erikaal.

*Ülesanne 2.* Määrake vedeliku erikaal (piiritus).

T ö ö k ä i k. 1. Siduge tükk metalli kaalukangi külge.

2. Laske metallitükk vette ja leidke rõhumine metallitükile.

3. Laske metallitükk piiritusse ja leidke rõhumine metallitükile.

4. Archimedese seaduse järgi määrake piirituse erikaal.

5. Korrake katset mingi teise vedelikuga.

**104.** ***Laboratoorne töö 5.*** **Keha ujumise tingimuste katseline tuletamine.**

T ö ö v a h e n d i d: 1) ülevooluanum; 2) katseklaas, mille sisse on kleebitud millimeetrilise jaotusega pabeririba; 3) kaalud; 4) haavlid; 5) klaas; 6) piiritus; 7) keedusoola kange lahus; 8) vasevitrioli lahus.

T ö ö k ä i k. 1. Kaaluge katseklaas.

2. Kaaluge väike hulk haavleid ja pange katseklaasi.

3. Kallake ülevooluanumasse vett; ülevoolutoru alla pange tühi klaas.

4. Laske katseklaas ülevooluanumasse.

5. Märkige ära katseklaasi sukeldumise sügavus.

6. Võrrelge ujuva katseklaasi ja haavlite kaalu ülevooluanumast väljatõrjutud vedeliku kaaluga.

7. Lisage haavleid katseklaasi, neid enne kaaludes.

8. Märkige katseklaasi uus sügavus.

9. Võrrelge ujuva katseklaasi ja haavlite kaalu väljatõrju-

tud vee kaaluga. Mida võib tähele panna ujuva keha kaalu ja väljatõrjutud vedeliku kaalu vahekorra kohta?

10. Asendage vesi piiritusega ja korrake katset.

11. Asendage piiritus ülevooluanumas keedusoola kange lahusega ja korrake katset.

12. Missuguses vahekorras on ujuva keha kaal väljatõrjutud vedeliku kaaluga.

13. Kuidas muutub ujuva keha vajumise sügavus vedeliku erikaalu muutumisega?

Torricelli (1608—1647).

**105. Ohu rõhumine.** Maad ümbritseb õhuookean — atmosfäär. Kuna õhul on raskus ja ta annab sarnaselt vedelikuga rõhumist edasi igas suunas ja ühteviisi, siis õhuookeanis, nii nagu vee omaski, peab olelema rõhumine, mis suureneb allapoole ja väheneb ülespoole minnes.

Õhurõhu mõõtmise viis on antud Torricelli poolt XVII s.

Tuleb võtta umbes 1 m pikkune, ühest otsast kinnine toru ja kallata see ääreni elavhõbedat täis, sulgeda lahtine ots näpuga (joon. 137), pöörata ümber ja lasta kaetud ots elavhõbeda anumasse. Kui sõrm eemaldada, siis elavhõbe veidi langeb ja jääb teatud kõrgusele püsima. Elavhõbeda-samba peale tekib õhuta ruum, nn. Torricelli tühik. Et elavhõbeda-sammas ei lange, on seletatav sellega, et tema alusele on mõjumas samba kaaluga võrdne ja vastassuunaline tung. Kuna peale õhu pole keha, mis oleks elavhõbedaga kokkupuutumises, siis selleks tasakaalustavaks tungiks saab olla ainult õhu rõhumine, mis mõjub anumas elavhõbeda pinnale vertikaalselt alla ja antakse elavhõbeda poolt edasi igas suunas ja ühteviisi, järelikult ka elavhõbeda-samba alusele vertikaalselt üles. Katse annab ühe ja sama elavhõbeda-samba kõrguse, lugedes vertikaali mööda, iga toru jämeduse juures ja toru igas asendis (kuni toru pole tervikuna täidetud). Kõik need asjaolud näitavad, et meil on nende katsete juures tõepoolest õhu rõhumisega tegemist.

Seega *õhurõhku mõõdab vertikaalse elavhõbeda-samba kaal, mille alus on 1 cm²*.

Katsed, mis on korraldatud mitmesugustel kellaaegadel, päevadel ja kohtades, näitavad, et õhu rõhumist taaskaalustav elavhõbeda-sammas on eri juhtudel natuke erinev.

Ühte rõhu väärtust loetakse tingimisi normaalseks ja nimelt:

***Normaalseks õhurõhuks loetakse 76 cm kõrgusega elavhõbeda-samba rõhku.***

Pascal näitas, et elavhõbeda-samba kõrgus langeb, kui tõuseme kõrgemale. Põhjus on sama, mis vedelikugi puhul: kui tõuseme põhjast kõrgemale, siis rõhk väheneb, sest väheneb rõhku tekitav kiht.

Õhurõhu arvutamine: kuna elavhõbeda erikaal on 13,6 G/cm³, siis 76 cm kõrgusega ja 1 cm² läbilõikepinnaga vertikaalse elavhõbedasamba kaal ja järelikult ka õhurõhk on:

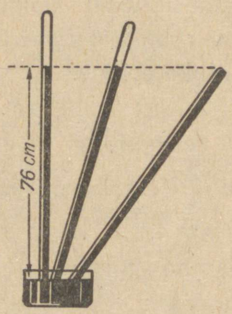
$$p = 76 \cdot 13{,}6\ \mathrm{G/cm^3} = 1033\ \mathrm{G/cm^2} = 1{,}33\ \mathrm{kG/cm^2}.$$

Rõhku 1 kG/cm² nimetatakse tehniliseks atmosfääriks.

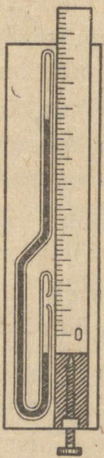
Väga sagedasti avaldatakse rõhku lihtsalt elavhõbedasamba cm-tes või mm-tes. Ei või ütelda või kirjutada, et atmosfääri rõhk $p = 760$ mm; peab väljendama nii: $p = 760$ mm elavhõbe-sammast ehk 760 mm Hg (Hg on elavhõbeda kui elemendi keemiline märk). Õhurõhku võib mõõta ka mõne teise vedelikuga, näiteks vee või õliga. Siis saame nende vedelikkude sammaste kõrgusi järgmisest seosest:

$$d_{\text{elvh.}} \cdot h_{\text{elvh.}} = d_{\text{vesi}} \cdot h_{\text{vesi}} = d_{\text{õli}} \cdot h_{\text{õli}} = \ldots$$

CGS-süsteemis võetakse rõhu ühikuks bar [1], mis on 1-düünine rõhk 1 $cm^2$ peale.




Joon. 137. Toru elavhõbedaga Torricelli katse jaoks.




Joon. 138. Elavhõbebaromeeter.

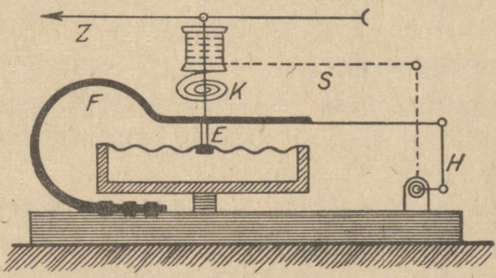
**106. Baromeetrid.** Õhurõhumine igas kohas Maa pinnal muutub ööpäeva jooksul ja päevast päeva aasta jooksul, kõikudes teatud vahemikus.

Kuna õhurõhk on üks nähtustest, mis oma kogumikus moodustavad ilmastiku, siis on ilmastiku uurimisel tarvis mõõta õhurõhku.

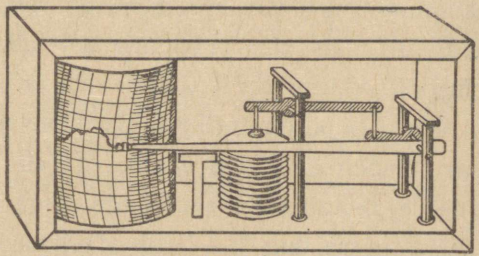
Õhurõhu mõõtmiseks tarvitatavat riista nimetatakse b a r o m e e t r i k s. Baromeetreid on kahte liiki — elavhõbe- (joon. 138) ja metall-baromeetrid (joon. 139). Peale selle ehi-

[1] Kreeka keeli *baros* — raske.

tatakse baromeetreid, mis oma näitamised üles kirjutavad — b a r o g r a a f i d (joon. 140). Lihtsaimaks baromeetriks võiks olla Torricelli toru: rõhu suurenedes osa elavhõbedat surutakse torru; selle nivoo tõuseb, aga anumas langeb. Õhurõhu




Joon. 139. Metallbaromeetri (aneroid) skeem.



Joon. 140. Barograaf.

langedes võib tähele panna ümberpöördut. Rõhu mõõtmiseks on iga kord tarvis mõõta elavhõbeda ülemise ja alumise nivoo vahe.

Täpsuse tõstmiseks antakse elavhõbebaromeetritele mitmesugune kuju. Üks levinumaid on kujutatud joon. 138.

Metallbaromeetrit nimetatakse a n e r o i d b a r o m e e t r i k s. Aneroid koosneb õhutühjast metallkarbist, mille kaas on liikuvuse suurendamise otstarbel tehtud laineliseks.

Õhurõhu suurenemisel surutakse karbi kaas sissepoole ja ta tõmbab endaga kaasa varda *E*; varda liikumist suurendatakse kangi *FH* abil ja antakse edasi nöörile *S*, mis pöörab osutit *z*. Vedru *K* hoolitseb ülekande pidevuse eest. Rõhu vähenedes kaane elastsus vähendab lohku ja osuti pöördub vastupidises suunas. Aneroidi skaala gradueeritakse elavhõbebarometeetri samaaegse näitamise järgi.

Kui osutiga ühendada pöörlevale paberist silindrile toetuv kirjutamisseadeldis, siis riist kirjutab oma näitamised üles ja kannab b a r o g r a a f i nime.

Barograaf on kujutatud joonisel 140. Peab teadma, et ilma ennustamisel barometeetri näitamisest üksi on vähe.

**107. Altimeeter.** Teiseks barometeetri ülesandeks on mõõta õhus tõusu kõrgust. Kõrgemale tõusmisel lüheneb barometeetris elavhõbeda-sammas. Kui tõusta barometeetriga õhupallil või lennukil kõrgusele $h_{\text{õhk}}$, siis jääb mõõduriistast allapoole sama kõrgusega õhukiht; valemi XVII põhjal selle kihi rõhk $p = h_{\text{õhk}} \cdot d_{\text{õhk}}$, kus $d_{\text{õhk}}$ on õhu erikaal. Barometeetri elavhõbedasamba kõrgus alaneb $h_{\text{elvh.}}$ cm võrra. Sellele elavhõbedasamba alanemisele vastab rõhu alanemine sama valemi järgi $p = h_{\text{elvh.}} \cdot d_{\text{elvh.}}$ võrra, kus $d_{\text{elvh.}}$ on elavhõbeda erikaal.

Kuna rõhu vähenemine barometeetris on tingitud sellest, et $h_{\text{õhk}}$ paksusega õhukiht jäi barometeetri alla, siis mõlemad rõhud peavad olema omavahel võrdsed:

$$h_{\text{õhk}} \cdot d_{\text{õhk}} = h_{\text{elvh.}} \cdot d_{\text{elvh.}}$$

Siit võib arvutada tõusu kõrgust. Selline arvutus oleks õige siis, kui õhu tihedus kõrgusega ei muutuks.

Kuid õhutihedus muutub kõrgusega, sellepärast valem muutub palju keerukamaks. Võib arvestada, et piirides kuni 600 m kõrguseni elavhõbedasamba alanemisele 1 mm võrra vastab tõus 10,5 m temperatuuril 0°.

Järgmine tabel näitab kõrguse ja rõhu vahelist seost:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Kõrgus m-tes | 0 | 650 | 1360 | 2150 | 5200 | 10 000 |
| Rõhk cm-tes Hg | 76 | 70 | 64 | 58 | 40 | 25 |

Baromeetrit, millel cm Hg asemel on tõusu kõrgus meetrites, nimetatakse altimeetriks. Seda kasutatakse õhupallidel ja stratostaatidel.

**107-a. Atmosfääri ehitus.** Atmosfääri alumine piir langeb ühte Maa pinnaga. Ülemist piiri pole võimalik täpselt anda, kuna õhuosakesi on laiali paisatud Maad ümbritsevas maailmaruumis.

Atmosfääri olemasolu mitmesugustel, mõnikord päris suurtel kõrgustel näitavad järgmised nähtused:

1) Hämarik tekib päikesekiirte hajumise tõttu 60—70 km kõrgusel.

2) Valgust kiirgavaid pilvi võib näha 70—80 km kõrgusel.

3) Virmalised tekivad 80—800 km kõrgusel.

4) Langevad tähed hakkavad helendama 100—300 km kõrgusel.

Atmosfääri võib jaotada erinevate omadustega kihtideks.

Alumist kihti nimetatakse troposfääriks. Selle keskmine paksus on 11 km. (Ekvaatori ümbruses on paksus umbes 18 km, üle 60° laiusel — umbes 9 km ja vahepealsetel laiustel umbes 11 km).

Troposfääris toimuvad alatised gaaside segunemised tuulte, tõusvate ja laskuvate õhuvoolude mõjul.

Segunemise tõttu on troposfääris õhu koostis igal pool ühesugune, nagu nähtub alltoodud tabelist, kus on antud protsentuaalne gaaside sisaldus maapinnal ja 11 km kõrgusel:

| Kõrgus | GAASID | | | | | | Üldine rõhk mm-tes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Argon | Lämmastik | Vee aur | Hapnik | Süsihapu gaas | Vesinik | |
| 0 | 0,93 | 77,08 | 1,20 | 20,75 | 0,03 | 0,01 | 760 |
| 11 | 0,94 | 78,02 | 0,01 | 20,99 | 0,03 | 0,01 | 168 |

Peale nende koosteosade võib troposfääris olla väikesi veepiisku ja jääosakesi pilvede või udu kujul, mineraaltolmu (vulkaaniline tolm, liiv, nõgi ja soolad) või orgaanilist laadi osakesi, nagu seenekesi, baktereid ja eoseid.

Suurtes linnades on maapinna läheduses igas kuupsentimeetris kuni pool miljonit tolmukübekest.

Troposfääris õhu tihedus, temperatuur ja rõhk üldiselt vähenevad kõrgusega.

Järgmiseks kihiks on s t r a t o s f ä ä r. Selle kihi uurimine toimub automaatsete mõõteriistade abil. Need lastakse üles sondide ja raadiosondide [1] abil ja samuti vaatlejatega stratostaatidel.

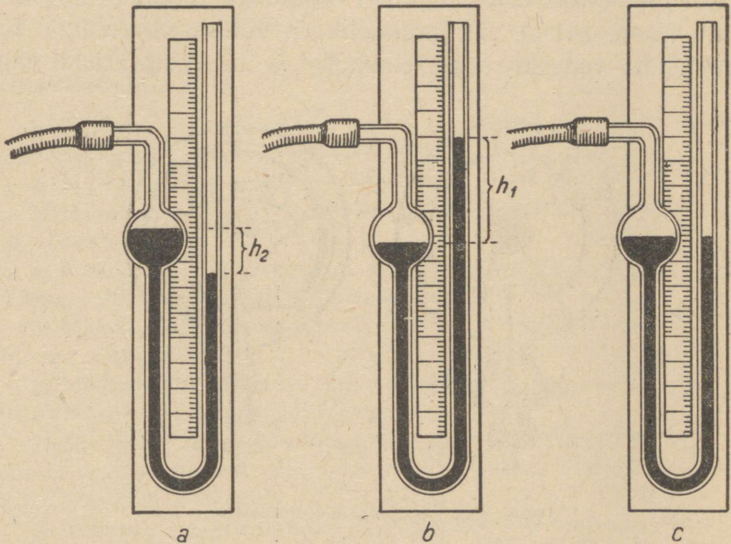
Stratosfääri põhiline omadus seisab selles, et temas puuduvad õhukihtide segunemised vertikaalses suunas.

Vastupidiselt troposfäärile, kus temperatuur kõrgusega väheneb, on stratosfääri alumises osas temperatuur jääv ehk täpsemalt öeldes väga vähe muutuv kõrgusega. Minimaalsed temperatuurid, mis kõige sagedamini esinevad stratosfääri selles osas, on —45° ja —60° vahel. Stratosfääri ülemises osas temperatuur isegi tõuseb.

Sellise temperatuuri jaotumise tõttu on õhuliikumine stratosfääris suuremalt jaolt palju nõrgem kui troposfääris.

[1] Raadiosond — õhupall, mis on varustatud raadiojaamaga. Viimane mõõdab automaatselt meteoroloogilisi suurusi ja annab nad raadio kaudu edasi.

Need asjaolud, samuti väike õhutihedus, mis lubab arendada suuri kiirusi, pilvede puudumine, võimalus alati näha taevatähti ja nende järgi orienteeruda, kõik see loob stratosfäärile suured eelised kaugelennus.




Joon. 141. Lahtine elavhõbemanomeeter.

Sellepärast on stratosfääri uurimine kogu inimkonnale tähtis ülesanne. Tähelepandav osa selles uurimises on nõukogude teadlastel.

Atmosfääri kõrgemad kihid said nime i o n o s f ä ä r, kuna seal leidub elektriliselt laetud osakesi — ioone.

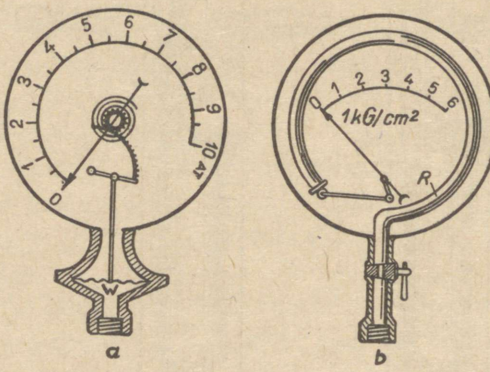
**108. Manomeetrid.** Auru- või gaasirõhu mõõtmiseks kinnises anumas kasutatakse m a n o m e e t r e i d[1].

On olemas v e d e l i k - ja m e t a l l m a n o m e e t r i d. Vedelikmanomeetrid on lahtised ja kinnised. Lahtine vedelik-

[1] Kreeka keeles *manos* — hõre, *metron* — mõõt.

manomeeter kujutab endast kahte alumises osas ühendatud toru, täidetud teatud kõrguseni vedelikuga. Ühe toru ülemine ots on ühendatud anumaga, milles asub mõõdetav gaas. Selle juures märgitakse baromeetri seis $h$ cm Hg.

Kui manomeetri ühendamisel anumaga vedeliku nivoo ei muutu (joon. 141 c), siis gaasirõhk on võrdne õhurõhuga. Kui manomeetri vedelikuks on elavhõbe ja ta võtab asendi nagu




Joon. 142. Metallmanomeetrid.

joonisel 141 b, siis gaasirõhk $p_1 = H + h_1$ cm Hg; kui elavhõbe manomeetris võtab joonisel 141 a näidatud asendi, siis rõhk $p_2 = H - h_2$ cm Hg.

Kui manomeetris on elavhõbeda asemel mingi teine vedelik, siis tuleb selle näitamine ümber arvutada elavhõbeda peale valemi $d_{\text{ved.}} \cdot h_{\text{ved.}} = d_{\text{elvh.}} \cdot h_{\text{elvh.}}$ järgi. Kerge on näha vedelikmanomeetri ebasobivust eriti suurte rõhkude mõõtmisel (näiteks aururõhk aurukateldes ja gaasirõhk kompressorites).

Seepärast asendatakse nad tehnikas metallmanomeetriga. Metallmanomeeter koosneb kas lainelisest metallvaheseinast $W$ (joon. 142 a), mille paindumine antakse edasi osutile, või kõveraks painutatud elastsest õõnsast torust $R$, mis teatud määral sirgeneb rõhu suurenedes (joon. 142 b) ja samuti annab selle liikumise edasi osutile.

Välisõhuga ühendamisel seisab manomeetri osuti nulli peal. Skaala jaotused näitavad, mille võrra gaasirõhk on suurem (vastavalt vähem) õhurõhust.

### *Harjutus 20.*

1) Näidata, et hüdraulilise pressi (joon. 130) juures on liikumapaneva tungi töö võrdne takistuse tööga.

2) Millega võrdub rõhk vees sügavusel 10 m? 100 m?

3) Millega on võrdne petrooli[1] rõhumine tsisterni põhja 1 $m^2$-le 2 m sügavusel?

4) Kas voolab vesi veevärgi kraanist ühesuguse survega mitmekorruselise maja alumisel ja ülemisel korral?

5) Mispärast mõnikord veevärgi kraanist ülemisel korral vett ei saa, aga alumisel saab?

6) Mispärast purskkaevu vee nivoo kunagi ei saa olla nii kõrge kui purskkaevuga ühenduses olevas anumas?

7) Linnas on ehitusi kõrgusega kuni 45 m. Missuguse surve all peab olema maapinnal vesi, et seda vett saaks kasutada tulekahju puhul ülemistel korrustel.

8) Tõstetav meditsiiniline tool tõuseb vee survega ja seisab 10 cm-lise diameetriga kolvil. Tooli kaal koos inimesega on 100 kg. Kui suurt rõhku on vaja tooli ühtlaseks tõstmiseks (ilma hõõrdumiseta)? Kui rõhumist tekitatakse teise kolvi kaudu, mille diameeter on 2 cm, missugust tungi on tarvis siis rakendada teisele kolvile?

Vastus: 4 kG.

9) Ühendatud anumate alumises osas on elavhõbe; ühel pool on vesi kõrgusega 30 cm,. teisel pool aga piiritus. Määrata piiritusesamba kõrgus, kui elavhõbe seisab mõlemal pool ühel kõrgusel (piirituse $d = 0{,}8$).

Vastus: 37,5 cm.

10) Piirtusesamba kõrgus ühendatud anumates on 30 cm, seda tasakaalustava teise vedeliku samba kõrgus 28 cm. Leida teise vedeliku erikaal.

Vastus: 0,84 $G/cm^3$.

---

[1] Tiheduste tabel V — raamatu lõpus.

11) Ühendatud anumate alumine osa on täidetud elavhõbedaga. Elavhõbeda peal on ühel pool piiritus, teisel pool hape, mille erikaal on 1,2 G/cm$^3$. Määrata elavhõbeda nivoode vahe, kui piirituse ja elavhõbeda ülemised pinnad on ühel ja samal horisontaalil ja happesamba kõrgus on 30 cm.

Vastus: 0,94 cm.

12) Mispärast sile puust plaat, mis on tihedalt surutud anuma põhjale, ei tõuse pinnale, kui anumasse kallata vett (proovige!)?

13) Kas on üleslüke ühesugune, kui lasta kaaluviht veeämbrisse mitmesugustele sügavustele.

14) Kui suur on vee üleslüke 1 kG-lisele rauatükile? 1 kG-lisele korgitükile?

15) Missugust lisaraskust kannab silindrikujuline tükk korki, mille kaal on 1 kG, kui ta vajub vette kuni ülemise aluseni?

16) Kui suur on 1 dm$^3$ alumiiniumi tõeline kaal õhuta ruumis?

17) Kaalukangi otsadesse on tasakaalustatud vasest ja klaasist kerad. Kas tasakaal rikutakse, ja kui, siis kuhu poole, kui see riist asetada õhuta ruumi? Ruumi, mis on täidetud süsihapu gaasiga? Vette?

18) Missugune osa jääpangast on allpool jõevee pinda (jääpanka võib kujutella risttahukana).

19) Archimedesele tehti ülesandeks selgitada, kas kroon, mis oli valmistatud kuningas Hiero jaoks, on puhtast kullast. Krooni kaal õhus oli 1 kG, vees 0,94 kG. Missuguse vastuse pidi andma Archimedes?

20) Et leida vees lahustuvate kehade erikaalu Archimedese seaduse järgi, ei lasta neid mitte vette, vaid mingisse teise vedelikku, mille erikaal on teada ja milles antud keha ei lahustu.

Tükk vasevitrioli kaalub õhus 22 G, petrooleumis aga 14 G. Leida vasevitrioli $d$.

Vastus: 2,2 G/cm$^3$.

21) Missugune koormus tuleb asetada puust rööptahukale, mille pikkus on 20 cm, laius 10 cm ja paksus 5 cm, et see vajuks ülemise ääreni vette (puidu $d = 0,6$)?

Vastus: 400 G.

22) Raudtala tõstetakse merevees. Tala kaal on 5 000 kG. Missuguse tungiga peame teda vees tõstma, kui merevee $d = 1,03$ G/cm$^3$?

Vastus: 4350 kG.

23) Veepinnal on auriku ristlõike pindala $S = 3000$ m$^2$. Aurik vajus laadimisel 2 m võrra. Leida laadungi kaal (merevee $d = 1{,}03$).

Vastus; 6180 $T$.

24) Auriku lõike keskmine pikkus on veepinnal 150 m, laius 30 m. Kui palju vajub laev tema laadungi suurendamisel 2000 T võrra, kui laev asub merevees? magedas vees?

Vastus: 0,43 m; 0,44 m.

25) 4000 m$^2$-lise lõikepinnaga aurik kaalub 6000 T. Kuidas muutub auriku vajumise sügavus jõest merre sõitmisel?

Vastus: 4,5 cm võrra.

26) Õhulaeva kogukaal on 15 000 kG, tema ruumala — 20 000 m$^3$. Õhulaeva kambrites on 19 700 m$^3$ vesinikku. Leida õhulaeva tõstejõud, kui 1 m$^3$ vesinikku kaalub 100 G ja õhu $d = 0{,}00129$ G/cm$^3$.

Vastus: 8830 kG.

27) Muulide ehitamisel kasutatakse tänapäev järgmist võtet. Raudbetoonist valmistatakse õõnsad kuubid, mis lastakse vette ja pukseeritakse muuli ehitamiskohale, kus nad täidetakse kividega ja lastakse ettenähtud kohal põhja.

Kui sügavale vajub vette selline kuup, kui selle serv on 2 m, keskmine seina paksus 10 cm, raudbetooni $d = 3{,}5$ ja vee $d_0 = 1{,}03$?

Vastus: 0,97 m.

28) Täisnurksel söepraamil pinnaga 100 m$^2$ on vertikaalsed pardad. Söega laadimisel on lubatud vajumine 1,5 m. Kui suur on söelaadung?

Vastus: 150 m$^3$.

29) Ujuva jääpanga ruumala on 10 000 m$^3$. Jää erikaal on 0,9 G/cm$^3$. Leida vee all oleva osa ruumala, kui merevee erikaal on 1,02 G/cm$^3$.

Vastus: $\approx$ 8820 m$^3$.

30) Tuletada Archimedese seadus risttahukakujulise keha abil, arvutades rõhku igale tahule.

31) Areomeeter on määratud veest tihedamate vedelikkude mõõtmiseks. Kus asub sellise areomeetri skaalal „1“, kas all või ülal?

32) Kus vajub areomeeter sügavamale, kas jõe- või merevees?

33) Kui suur on õhu rõhumine inimese keha pinnale, mis on keskmiselt 1,6 m$^2$?

34) Maapinnast tõusmisel langes elavhõbe baromeetris 3 mm võrra. Kui suur oli tõus?

35) Piiritusmanomeetri ühendamisel gaasiga täidetud anumaga tekkis nivoode vahe 27,2 cm. Kui suur on gaasirõhk, kui õhurõhk on 750 mm Hg?

36) Kui baromeetrisse allpool elavhõbeda nivood teha avaus, kas hakkab siis elavhõbe voolama välja või õhk sisse?

37) Kuidas määrata veest kergemate kehade tihedust? Tehke selline määramine katseliselt.

38) Miks elavhõbedasamba kõrgus baromeetris ei olene samba laiusest?

39) Miks baromeetri toru kallutamisel elavhõbe voolab torusse?

40) 80 kG kaaluga sõdur, kes ei oska ujuda, vajab vee peal hoidmiseks tõstetungi. Kui oletada, et sõduri ruumalast $^3/_4$ on vee all, siis on tarvis tõstetungi ainult $^1/_4$ kaalu jaoks. 12 sõdurit, kes ei oska ujuda, võivad üle jõe minna, hoides kinni vaadist (lati abil). Kui suure ruumala võrra vajub vaat sellejuures vette?

## *KONTROLLKÜSIMUSI.*

1) Mis on rõhk?

2) Missuguseid rõhuühikuid tarvitatakse?

3) Kuidas annab rõhku edasi vedelik, gaas?

4) Millest oleneb rõhumine vedeliku sees?

5) Kas oleneb rõhumine vedeliku sees pinna asendist?

6) Missuguse valemiga arvutame rõhumist vedeliku sees?

7) Missuguste katsetega tõestatakse, et rõhumine pinnale alt üles on sama suur kui ülalt alla?

8) Kuidas seletada seda, et rõhumine põhjale ei olene anuma kujust?

9) Miks on rõhumine põhjale väiksem vedeliku raskusest ülespoole laienevates anumates ja suurem kitsenevates?

10) Missugune on erisuguste vedelikkude tasakaalu tingimus ühendatud anumais?

11) Milles seisab Archimedese seadus?

12) Kui suur on tung, millega sukeldunud keha mõjutab vedelikku?

13) Missugust kolme asendit võib võtta vedelikku lastud keha, olenevalt keha ja selle poolt väljatõrjutud vedeliku kaalust?

14) Missugusel tingimusel keha ujub vedeliku pinnal?

15) Mis on laeva tonnaaž?

16) Kuidas määrata tahke keha erikaalu hüdrostaatilise võtte abil?

17) Kuidas määrata vedeliku erikaalu hüdrostaatilise võtte abil?

18) Kuidas on ehitatud areomeeter ja kuidas teda kasutada?

19) Millistest nähtustest võib järeldada õhurõhumise olemasolu?

20) Missuguse võttega mõõdetakse õhurõhku?

21) Kuidas arvutada õhurõhumist mingile pinnale?

22) Kuidas muutub õhurõhk maapinnast kõrgemale tõusmisel?

23) Missugune on baromeetri ehitus, ülesanne ja kuidas teda kasutada?

24) Missugune on manomeetri ehitus, ülesanne ja kuidas teda kasutada?

**Kirjandus.** Васильев, Аэронавтика. Виноградов, Водопровод и канализация в нашем жилище. Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I, гл. III, IV, V. Дюрнбаум, Гидравлический пресс и его применение. Рубель, Манометр.

**109. Vedelikkude ja gaaside sisehõõrdumine.** Vedeliku ja gaasi liikumisel torus, vee voolamisel jões ja õhumasside liikumisel atmosfääris on osakeste liikumise kiirused erinevates kihtides erisugused. Selle poolest erineb vedelikkude ja gaaside liikumine tahkete kehade liikumisest.

Jões on vastu põhja ja kaldaid asetsevate vedelikukihtide kiirused kõige väiksemad, kuna siin on tegemist jõesängi kivimite ja vee vahelise hõõrdumisega.

Kuid põhjast ja kallastest kaugenedes kasvab vee kiirus järjest ja saavutab suurimat väärtust jõe keskel (kallastest arvates) ja pinnale lähemal.

Vee üksikud kihid, liikudes järjest kasvava kiirusega, liuguvad teisi kihte mööda. Selle liugumise juures nad mõjutavad üksteist tungiga, mida nimetatakse sisehõõrdumistungiks.

Kui vedelik või gaas voolab mööda toru, siis on kõige väiksem kiirus vastu toru seina olevail kihtidel. Igal järgmisel õõnsal silindrikujulisel kihil on kiirus suurem ja teljel asuv täissilindrikujuline kiht voolab suurima kiirusega.

Üksikud kihid, liugudes üksteist mööda, mõjutavad üksteist tungidega, mis on sarnased hõõrdumistungidega tahkete kehade liuglemise juures. Olenevalt sisehõõrdumise ehk viskoossuse (püdeluse) suurusest, tehakse vahet väiksema (vesi, piiritus) või suurema (määrdeõli, siirup) viskoossusega ainete vahel.

Gaaside viskoossus on vedelikkude omaga võrreldes väga väike. Õhu viskoossuse olemasolus veenab meid tuntud nähtus, et tuul on kõvem (õhk liigub kiiremini) maapinnast kõrgemal, sarnaselt veega, mille kiirus on seda suurem, mida kõrgemal see on põhjast.

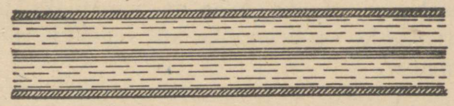
Gaaside viskoossust näitab järgmine katse. Väike silinder riputatakse üles või asetatakse alusele nii, et ta võiks pöörelda ümber telje. Silindri sisse riputatakse niidi otsas teine väiksem silinder, nii et seinad ei puutuks kokku. Kui panna välimine silinder pöörlema, siis hakkab pöörlema ka sisemine. Esimese silindri sisemisele seinale kleepuv õhukiht mõjutab sisehõõrdumistungiga ehk viskoossusega naaberkihti ja tõmbab selle kaasa; teine tõmbab kolmandat jne.; lõpuks kiht, mis on kleepunud sisemise silindri välimisele seinale, paneb ka selle liikuma.

**110. Keerised liikuvas vedelikus ja gaasis.** Sisehõõrdumistung oleneb liuguvate kihtide kiiruste vahest. Seni kui kiiruste muutumine ühest kihist teise on väike, ei muutu voolava vedeliku kihtide suhteline asetus ja vedeliku (või gaasi) voolamine on niisugune, nagu see on kujutatud joonisel 143-a. Sellist vedeliku voolamist nimetatakse laminaarseks.

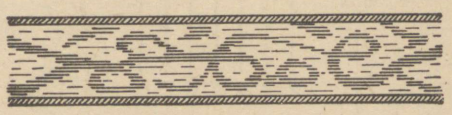
Kui aga kiirus ületab teatud piiri, mida nimetatakse kriitiliseks kiiruseks, siis liuguvate kihtide vastastikune mõju muudab vedeliku- või gaasiosakeste suhtelist asendit ja tekivad keerised, nagu on kujutatud joonisel 143-b. Sellist vedeliku voolamist nimetatakse turbulentseks.

Sellest joonisest nähtub, et ühes keerise osas langeb pöörlevate aineosakeste kiirus ühte voolu kiirusega, teistes osades on sellele vastassuunaline.

Keerised teevad kiiruse ja sellega seotud rõhumise jaotumise keerulisemaks.



Joon. 143-a. Laminaarne voolamine.



Joon. 143-b. Turbulentne voolamine.

**110-a. Gaasi ja vedeliku takistus liikuvale kehale. Voolujoonelisus.** Kehade õhutakistuse kindlakstegemiseks kasutatakse joonisel 144 kujutatud riista.

Riista olulisemaks osaks on kang — kaalukangiga sarnane, ainult painutatud. Kangi üks osa hoiab varba *B*, mis lõpeb pesaga; teises osas on nihutatav koormus *A*, mida kasutatakse selleks, et seada osuti nulli peale, kui varva pessa asetatakse mitmesuguse kujuga kehi.

Nende kehade kujud on joonisel näidatud nr. 1—8 all. Takistus oleneb ainult õhu ja keha suhtelisest liikumisest. Seepärast võib liikuva keha ja seisva õhu asemel võtta liikuva õhu ja seisva keha.

Õhu liikumist tekitatakse nn. fööni abil. Föön on elektriventilaator kitsa avausega katte sees (skeem on joon. 144 vasakul ülal).

Voolutugevuse muutmisega mootoris võime muuta fööni tuule kiirust.

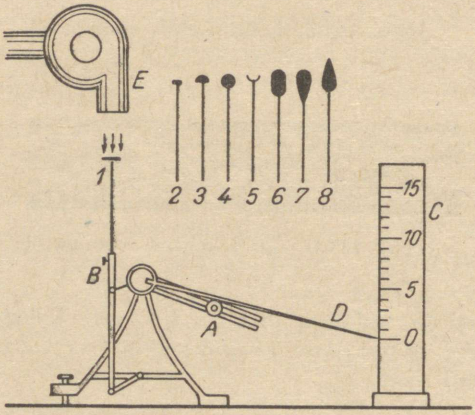
Uurimiseks võetakse mitmesuguse kujuga, kuid võrdsete frontlõigetega kehad. Keha frontlõikeks nimetatakse liikumise suunaga ristiseisvale tasandile saadud projektsiooni.

Asetades varva *B* pessa mitmesuguseid kehi kogust 1—8 ja juhtides nende esipinnale ühe ja sama tugevusega õhuvoolu, võime osuti *D* asendi järgi võrrelda erineva kujuga kehade takistusi.

Säärased katsed on näidanud, et suurimat takistust osutab avausega ülespoole õõnes poolkera nr. 5; kõige väiksemat — nr. 7.

Seda keha, mille takistus antud frontlõike juures on väiksem võrreldes teiste kehadega, nimetatakse v o o l u j o o n e l i s e m a k s.

Millest tuleneb see, et üks keha on suuremaks takistuseks kui teine? Selle selgitamiseks vaatleme õhu või vedeliku voolamist mitmesuguste kehade ümber.




Joon. 144.

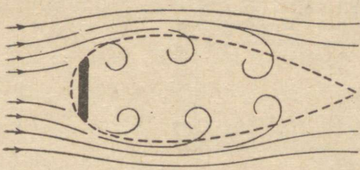
Katsed on näidanud, et kui asetada plaat voolusuunaga risti, siis võime näha joon. 145 kujutatud pilti; tekivad keerised, milles vesi liigub ringjooni mööda ümber vertikaalse telje. Voolud mõlemal pool plaati ei ühti plaadi keskel, vaid liiguvad mõne aja inertsi tõttu sirgjooneliselt. Toimub voolu lahtirebimine keha pinnast.

Kui aga tarvitada voolujoonelist keha, siis on, nagu näitab katse põhjal tehtud joon. 146, voolujooned keha küljes kuni lõpuni, lahtirebimist ei ole ja keeriseid ei teki, ainult viimases otsas tekib turbulentsus.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et l i i k u v a k e h a t a k i s t u s o n s e d a v ä i k s e m, m i d a v ä h e m s e l l e t a g a o n k e e r i s e i d. Vedeliku osad keerises saavad võrreldes rahulikult liikuvate osadega suurema kineetilise energia, mille nad saavad liikuvalt kehalt. Seetõttu keha liikumisenergia väheneb ja keha nagu kannataks keeriste tõttu lisatakistuse all.

Keeriste puudumise tõttu ongi voolujoonelise keha takistus väiksem.

**111. Voolukiiruse ja rõhu vaheline seos.** Eespool (§ 98) oli märgitud, *et seisvas vedelikus ühel ja samal horisontaalsel nivool on rõhumine kogu anuma või ühendatud anumate ulatuses ühesugune.*



Joon. 145. Plaat.

Joon. 146. Voolujooneline keha õhuvoolus.

Et uurida rõhkude jaotumist liikuvas vedelikus, võib koostada ahela pumbast ja kõveraks painutatud klaastorust (joon. 147). Klaastoru külge on võrdsetel kaugustel sulatatud lahtised torud (manomeetri ülesandega).

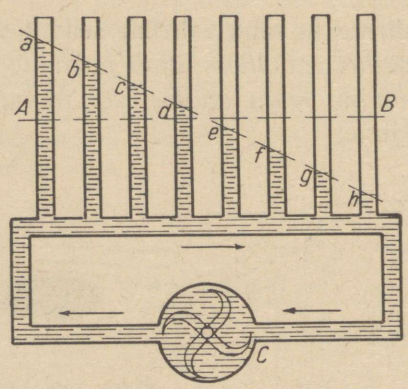
Ahela täitmisel veega tõuseb vesi kõikides torudes ühesugusele kõrgusele *AB* sel juhul, kui pump ei tööta.

Vaatame, mis toimub siis, kui pump paneb vee torusid mööda liikuma.

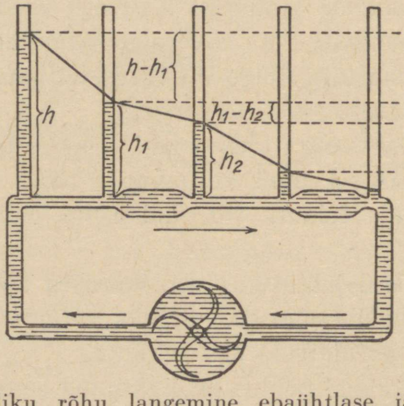
Vaatleme algul juhtu, kus voolukiirused kõikides toru ristlõikekohtades on ühesugused. Selleks võtame toru, mille diameeter oleks kogu ulatuses üks ja sama.

Sel juhul tekkinud nähtus on kujutatud samal joonisel. Sellest näeme, et ühel ja samal kõrgusel vedeliku rõhk seintele väheneb järk-järgult voolu suunas. Pumbaga tekitatud rõhk kulub nähtavasti vedeliku kihtide vahelise sisehõõrdumise ületamiseks. Mida suurem on kihtide kokkupuutepind, seda suuremat tungi on tarvis sisehõõrdumise ületamiseks ja seda väiksem osa jääb seintele rõhumiseks.

Pumba kiiruse suurenemine toob endaga kaasa rõhu muutuse suurenemise, ja joone *ah* kalle suureneb.




Joon. 147. Rõhu langemine ühtlases torus.




Joon. 148. Vedeliku rõhu langemine ebaühtlase jämedusega torus.

Katse andmetest saadud joonisest võime järeldada: *jääva kiirusega voolava vedeliku rõhu langemine torus on võrdeline toru pikkusega* [1].

[1] Võrdelisust võime näha sellest, et rõhku mõõtvate vedelikusammaste otsad asuvad ühel sirgjoonel.

Kuidas muutub nähtus, kui kiirus torus ühest kohast teise muutub?

Et vastata sellele küsimusele, võtame samasuguse veeahela nagu varemgi, ainult selle vahega, et ahelas on mitmesuguste diameetritega torusid (joon. 148).

Igast ahela toru ristlõikest (läbi vesiküttetorude ristlõigete, läbi jõe ristlõigete) läbib ajaühikus üks ja sama hulk vedelikku; vastasel korral tekiks kestvama voolamise puhul ühes kohas vedeliku kuhjumine ja teises kohas voolu katkemine.

Kui laia ja kitsa ristlõike võivad võrdsed vedelikuhulgad läbida ühes ajaühikus ainult siis, kui kitsas lõikes on kiirus suurem kui laias. Meenutame kärestikke jõgede madalamates kohtades.

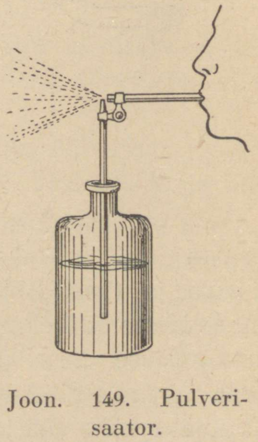
Seega võime meie katses väiksema ristlõikega toru osades tähele panna suurimat kiirust ja suurimat vedelikusamba langust vertikaalses torus.

*Vedeliku- või gaasijoa rõhk on suurim seal, kus on väikseim kiirus, ja väikseim seal, kus on suurim kiirus.*

Seal, kus kiirus suureneb, läheb suurem osa vedelikku või gaasi liikumapanevast tungist kiirenduse andmiseks ja väiksem osa rõhumise tekitamiseks.

Sellest põhinähtusest saab teha järgmise järelduse: kui teha ristlõige väga kitsas, siis võib kiirus suureneda sellevõrra, et rõhk vastavas kohas jääb atmosfäärist väiksemaks.

Kui sellesse kohta teha avaus, siis ei hakka vedelik sealt välja voolama, vaid vastupidi, õhurõhu üle-

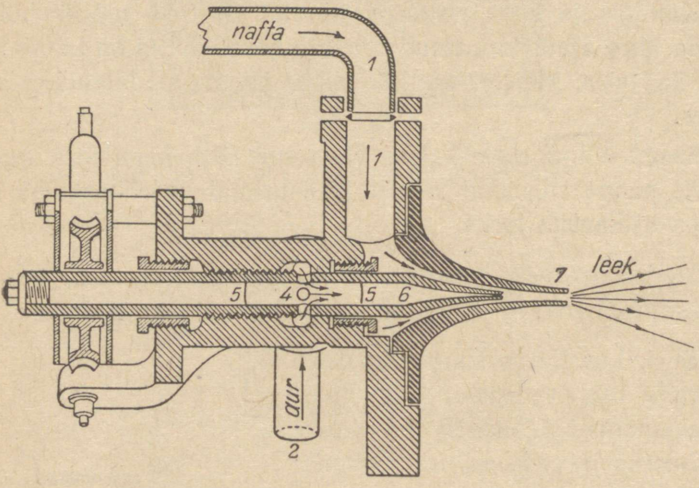


Joon. 149. Pulverisaator.

kaal surub sinna sisse õhku. Selles avaldub kiiresti voolava joa i m e v toime.

Missugused lihtsad katsed peale kirjeldatu räägivad veel sellest?

K a t s e p u l v e r i s a a t o r i g a (j o o n. 149). Tugeva puhumise korral langeb rõhk vertikaalse toru ülemises otsas alla atmosfääri, õhurõhk tõstab anumast vedelikku kuni ülemise ääreni, kus õhuvool selle pihustab.



Joon. 150. Pihusti.

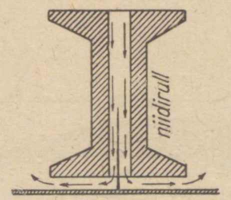
Seda printsiipi kasutatakse i n j e k t o r i s, millega tugeva aurujoa abil imetakse reservuaarist vett aurukatlasse, ja p i h u s t i s (joon. 150), millega õhujoa abil nafta imetakse küttekoldesse. Vedelküte voolab toru (1) kaudu koonusesse (7); sinnasamasse toru (2), avause (4) ja aurutoru (5) kaudu surub aur, mis tüüsis (6) suure kiirusega läheb tüüsi (7), haarab kaasa kahe tüüsi vahel oleva vedeliku ja pihustab selle.

Joonisel näidatud kruvi ja kraanid on vedelkütteaine ja auru juurdevoolu reguleerimiseks.

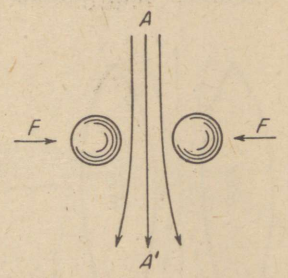
Analoogiliselt töötab ka injektor.

Sellesama imeva toimega on seletatav ka tuule parendav mõju tehaste korstnate tõmbele.

K a t s e  p a p i s t  k e t t a  j a  n i i d i r u l l i g a. Asetame lauale väikese papist ketta, mille keskele on pistetud nööpnõel. Lähendame kettale niidirulli, nii et nööpnõel läheks rulli auku




Joon. 151. Õhujoa imev toime.




Joon. 152. Õhujuga kahe kuuli vahel lähendab neid.

(suuna andmiseks) ja puhume tugevasti rulli ülemisest otsast, nagu näidatud joonisel 151. Me näeme ketta tõmbumist rulli külge.

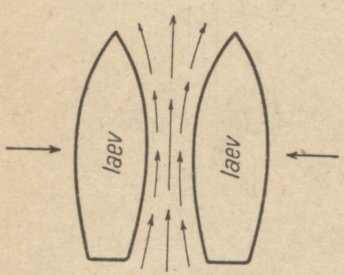
Ketta ja rulli kitsas vahes muutub õhujoa kiirus nii suureks, et selle rõhk kettale saab atmosfäärist väiksemaks ja õhk surub ketta vastu rulli.

K a t s e  k u u l i d e g a. Riputame kaks kerget kuuli niidi otsa umbes 5 cm kaugusele teineteisest (joon. 152) ja puhume nende vahelt läbi tugeva õhujoa. Õhurõhu ülekaal väljastpoolt surub kuulid kokku.

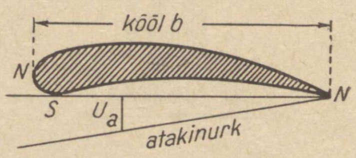
Nii võivad teineteise lähedal paralleelsete kurssidega sõitvad laevad kokku põrgata (joon. 153). Nende vahele kujunenud kärestik tekitab laevade vahel väiksema rõhu kui väljastpoolt ümbritseva vee oma ja kutsub välja kokkupõrke.

**112. Voolu kiirusest oleneva rõhu tehniline rakendamine.** Peale eespool toodud voolava joa rakendamiste tehnikas peatume veel kahel.

1. L e n n u k i  t õ u s. Lennuki tõus toimub kahel põhjusel: esiteks tuule toimel, mis tekib lennuki liikumisel õhu suhtes, ja teiseks lennuki tiiva kujust oleneva ülemise ja alumise pinna vahel tekkinud õhurõhkude jaotumise tõttu.




Joon. 153. Laevade vahele tekkinud kärestik lähendab laevu.




Joon. 154. Lennuki tiiva profiil.

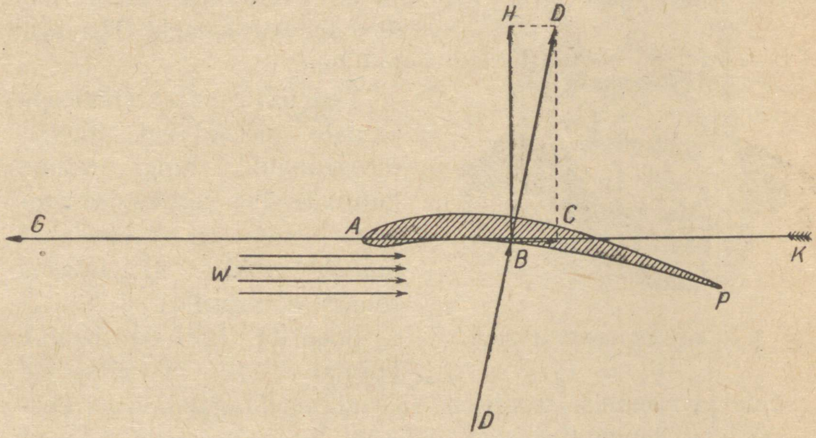
Tuule mõju tiivale on analoogiline tuule mõjuga laeva purjele. Tänapäeva lennukite tiivad tehakse ülespoole kumerad. Ristlõiget nimetatakse p r o f i i l i k s (joon. 154).

Profiili kõõlu $SK$ ja lennusuuna vahelist nurka nimetatakse atakknurgaks. Erinevate atakknurkade puhul on õhuvoolud tiiva ümber erinevad.

Joonisel 155 kujutab $AP$ ühte lennukitiiba. $AP$ on suunatud üles, nii et tekitab liikumise suunaga $GK$ väikese nurga. Õhutakistus mõjub lennuki tiiva alumisele küljele noolte $W$ suunas. Kuna õhk lööb $AP$ vastu, siis ta ise kaldub kõrvale, aga ühtlasi mõjub lennuki tiiva alumisele pinnale täisnurga all sihis

*BD*. Seda teatud punktis rakendatud tungi võib lahutada kaheks ristiseisvaks komponendiks, millest üks, *BC*, takistab lennuki edasiliikumist, aga teine, *BH*, tõstab lennukit.

Tungi *BH* suurus ei ole ühesuurune igas tiiva alumise pinna punktis, kuid antud kuju kohta võime mitmesugustesse punktidesse mõjuvad tungid asendada ühe vertikaalselt ülessuunatud resultandiga.




Joon. 155. Tuule mõju lahutamine lennuki tiiva juures.

Ülemise pinna kumeruse tõttu suurendab rõhu vähenemine seal omakorda vertikaalset resultanti.

Alarõhk tiiva peal on tublisti suurem ülerõhust tiiva all.

Nende rõhkude suhe oleneb suuresti profiili kujust ja nurgast, mille ta moodustab horisondiga. Kuid tüüpiliste profiilide ja keskmiste nurkade jaoks võib rõhu vähenemine ülemisele pinnale olla kaks ja rohkem korda suurem rõhu suurenemisest alumisele pinnale. Seega moodustab alarõhk üleval kaks kolmandikku ja ülerõhk all ühe kolmandiku tõstvast tungist.

Paralleelsetes õhuvooludes tekib tiiva vahetus läheduses, nn. piirkihis, palju keeriseid (joon. 156-a).

Nende voolude resulteerivaks vooluks on kinniste kõverjoonte vool, nn. tsirkuleeriv vool (joon. 156-b). Tsirkuleerival voolul on ülalpool lennuki kiirusesuunaga ühtiv suund, aga all — vastupidine, nagu näidatud joonisel 156-b. Sellise tsirkuleeriva voolu tekkimise juures on lennuki all kiirus väiksem ja järelikult rõhk suurem kui üleval; tekib lennuki tiiba tõstev tung.

N. J. Žukovski[1] (1847—1921).

Lennuki tiiva alumisele pinnale rakendatud lõpliku ülessuunatud tungi võime kujutada ühe vertikaalse joonega, mis on rakendatud punkti, mida nimetatakse rõhumise tsentriks.

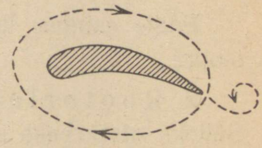
Joonisel 157 on lennuk kujutatud nii, et ülespoole mõjuv ja rõhumise tsentrisse rakendatud tung läbib või peaaegu läbib lennuki raskuskeskpunkti. Seda ülespoole mõjuvat tungi nimetatakse tõstetungiks; kui lennuk liigub paralleelselt maapinnaga, on see täpselt võrdne lennuki kaaluga.

Teine *DB* komponent *BC* (joon. 155), mis mõjub edasiliikumisele takistavalt, liitudes teiste lennukiosade takistustega, moodustab kogutakistuse, nn. frontaalse takistuse.

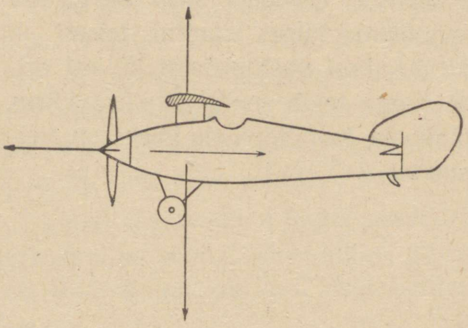
[1] Nikolai Jegori p. Žukovski — 1878. a. alates Moskva tehnilise kooli professor ja 1885. a. Moskva ülikooli professor — oli geniaalne õpetlane, kes on kirjutanud üle poolesaja töö mehaanikast, „vene lennuasjanduse isa", Aerohüdrodünaamilise Keskinstituudi ja tema nime kandva sõjaõhuasjanduse akadeemia looja. Aerohüdrodünaamiline Keskinstituut töötas välja lennu- ja lennukite teooria. Tema tööde hulgast põhiliseks lennuteooria jaoks osutub töö „Ühendatud keeristest". Lennukite teooriale ta tuli lindude lendamise uurimisega, mille tulemusena ilmus tema töö „Lindude liuglennust".

See on võrdne propelleri veotungiga. Kui lennuk liigub rõhtsalt ja ühtlaselt, siis on tõstetung võrdne kaaluga ja veotung frontaalse takistusega.

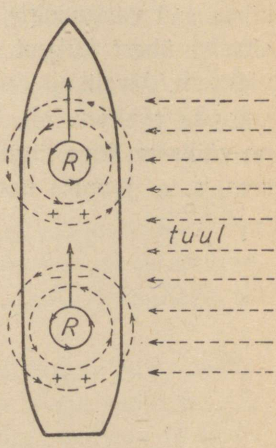

Joon. 156-a. Keeriste tekkimine lennuki tiival.



Joon. 156-b. Õhu voolamine lennuki tiiva ümber.



Joon. 157. Horisontaalselt vasakule suunatud vektor kujutab veotungi; horisontaalselt paremale suunatud vektor kujutab liikumise takistust; vertikaalselt alla suunatud vektor — lennuki kaalu; vertikaalselt üles — tõstetungi; kui lennuk liigub paralleelselt maapinnaga, siis on tõstetung võrdne lennuki kaaluga.




Joon. 158. Rootorlaeva liikumise seletamise juurde.

Tõstetungi ja frontaalse takistuse suhe muutub iga lennuki juures atakknurga muutumisega. Mitmesuguste lennukite juures ta muutub olenevalt lennuki tiiva profiili kujust.

Sõja ajal täienes lennukite konstruktsioon õige kiiresti, suurenesid kiirus, kõrgus, lennukaugus ja kandevõime.

7. juulil 1941. a. teatas «Izvestija», et ameerika hävitaja «Curtiss P-40» saavutas pikeerimisel 1057 km/h-lise kiiruse.

Peale esimesi lende täiendati veel selle lennuki konstruktsiooni.

2. Rootorlaev. See laev kasutab tuult ilma purjedeta. Selleks otstarbeks seatakse laevalaele kaks suurt silindrit, mis pannakse masinate abil pöörlema (joon. 158).

Kui laev asetseb tuule suhtes nii nagu joonisel, siis silindrite antud pöörlemissuuna juures joonise ülemises osas iga silinder suurendab õhuvoolu kiirust, aga alumises osas silindri kiirus kui vastupidine tuule kiirusele vähendab seda. Seega iga silindri ühest küljest on õhu üldine kiirus suurem, teisest — väiksem. Järelikult on silindrid kahest vastupidisest küljest erisuguste rõhkude all. Üldine tõuge tekib sealtpoolt, kus kiirus on väiksem; laev liigub sinnapoole, kus õhuvoolu kiirus on suurem, s. o. joonise noolte suunas.

## IV. Pöörlev liikumine.

**113. Ühtlane ringliikumine.** Eelmistes mehaanika peatükkides vaatlesime punkti ja keha translatoorse liikumise seadusi.

Läheme nüüd üle juhule, kus punkti trajektor on kõverjooneline.

Üks sellistest juhtudest, visatud keha liikumine, esines meil juba. Visatud keha trajektor tekkis kõverjoonelisena sellepärast, et kiiruse suhtes nurga all olev tung mõjutas kiirust saanud keha. Need kaks tingimust — keha kiiruse olemasolu ja kiirusega nurga all mõjuv tung — on alati vajalikud kõverjoonelise liikumise tekkimiseks.

Laual asetsev kuul liigub saadud tõukest sirgjooneliselt; kui aga kuul on seotud nööri külge, mille ots on kuhugi kinnitatud, siis tõukest hakkab kuul niidi tõmbe tõttu kõverjooneliselt liikuma.

Kaldrenni mööda vabalt veerev kuul jätkab sirgjoonelist liikumist laual. Kui aga tema teele panna nõgus takistus, siis takistuse vastava asendi puhul ta hakkab liuguma mööda takistust kõverjoonelist trajektorit mööda (joon. 159).

Kui lasta raudkuul kaldrenni mööda liikuma ja asetada tema sirgjoonelise tee lähedusse tugev magnet, siis trajektor kõverdub magnettungi tõttu (joon. 160).

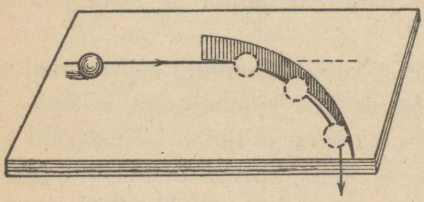
Kõverjoonelistest liikumistest lihtsaim on ühtlane ringliikumine.

Selle liikumisliigiga on tegemist keha pöörlemisel.

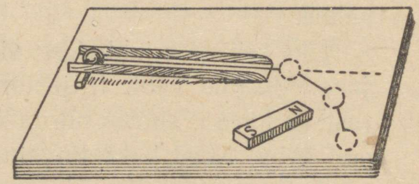
Tehnikas ja looduses on sageli näha pöörlevat liikumist. Nii on hooratta, käia, transmissioonvõlli, turbiini ja veskitiibade punktide liikumine ringliikumine.

Samuti liiguvad ringjoont mööda kõik Maa punktid tema ööpäevase pöörlemise tõttu ümber telje. Ligikaudselt võib lugeda ringjooneliseks ka planeetide keskpunktide liikumist ümber Päikese ja planeetide kuude liikumist ümber planeetide.

Keha liikumist nimetatakse pöörlevaks, kui kõik selle punktid liiguvad ringjooni mööda, mille tasapinnad on rööbikud ja



Joon. 159. Nõgusa takistuse tõttu muundub kuuli sirgjooneline liikumine kõverjooneliseks.

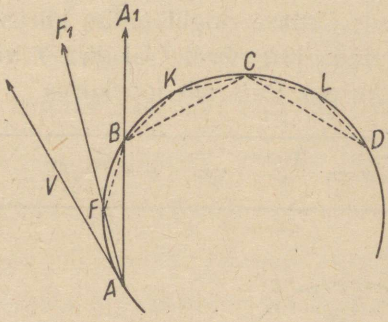


Joon. 160. Magnet kõverdab raudkuuli teed.

keskpunktid asuvad ühel liikumatul sirgel, mida nimetatakse pöörlemisteljeks.

**114. Kõverjoonelise liikumise kiiruse suund.** Kuidas on suunatud kiirus kõverjoonelise trajektori suhtes?

Sirgjoonelise liikumise juures on kerge leida kiiruse suunda: ta ühtib liikumise suunaga. Et leida kõverjoonelise liikumise kiiruse suunda, võib antud kõvera (joon. 161) ajutiselt asendada mingi murdjoonega $ABCD$, oletusega et suuna muutmine toimub murdjoone tippudes. Siis $AB$ ulatuses on kiirus suunatud $AB$-d mööda ja ta suurus on näiteks $AA_1$. Kuid võetud murdjoone asemel võime võtta teise $AFBKCLD$ suurema lõikude arvuga ja suurema murdjoone ja kõverjoone ühiste punktide arvuga. Sel juhul on kujuteldav liikumine murdjoont mööda lähemal tõelisele liikumisele kõverjoont mööda. Esimese lüli kiirus punktis $A$ võtab $AF$ suuna ja ta suurus on näiteks $AF_1$. Et läheneda tõelisele liikumisele, tuleb suurendada murdjoone lülide arvu. Iga kord on kiirusel punkti $A$ läbiva lõikaja suund, millejuures kaks lõikepunkti kõveraga lähenevad teineteisele. Piirjuhul, tõelise kõverjoone liikumise jaoks, sulavad mõlemad




Joon. 161. Kõverjoonelise liikumise kiirus on suunatud piki puutujat.

lõikaja punktid ühte ja lõikajast saab kõverjoone puutuja punktis $A$. Seega *kõverjoonelise liikumise igas punktis on kiirus puutujasuunaline*. Selles võime veenduda, kui vaatleme smirgelkäiast hõõguma löönud metalliosakeste lendu puutuja suunas.

**115. Pöörlemise periood, pöörete või tiirude arv ja joonkiirus.** Punkti ühtlane ringliikumine on määratud järgmiste suurustega. Ühe täistiiru tegemise aega nimetatakse tiirlemise perioodiks. Perioodi tähistatakse $T$-ga. Perioodi asemel võib tiirlemist määrata tiirude arvuga sekundis $\nu$[1]. Siis periood

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

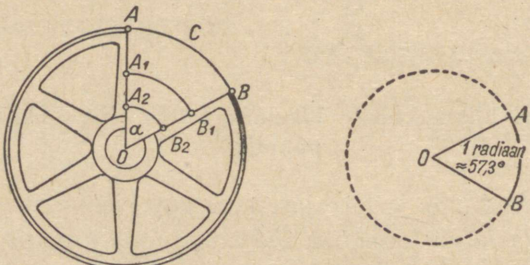
[1] Kreeka täht „nüü".

Tõepoolest, kui tiirude arv ühes sekundis on 50, siis $T = \frac{1}{50} = 0{,}02$ sek; ümberpöördult, kui $T = 2$, siis tiirude arv sekundis $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2}$ tiiru 1 sek-s. Tehnikas võetakse harilikult tiirude arv $n$ minutis, siis

$$\nu = \frac{n}{60}.$$

Kui selle ringjoone raadiuse, mida mööda liigub punkt, tähistame $R$-ga, siis ühtlase ringliikumise kiirust või nn. joonkiirust võime arvutada järgmiselt. Täistiiru $T$ vältel käib punkt läbi ringjoone pikkusega $2\pi R$, siit joonkiirus

$$\boxed{v = \frac{2\pi R}{T} \quad \text{või} \quad v = 2\pi R\nu.} \qquad \text{(XXIX-a)}$$




Joon. 162. Nurkkiiruse jäävus ja joonkiiruse muutlikkus raadiuse mitmesugustes punktides.

**116. Nurkkiirus.** Keha pöörleva liikumise iseloomustamiseks pole küllaldane teada joonkiirust, mida mõõdab 1 sek-s läbikäidud kaare pikkus. Ringliikumise juures on igal raadiuse punktil isesugune joonkiirus; ühesuguse aja jooksul nad käivad läbi erinevad teed, näiteks $AB$, $A_1B_1$ ja $A_2B_2$ (joon. 162). Olgugi et igal punktil on oma joonkiirus, on nende kõikide jaoks pöördumisnurk üks ja sama. Selle põhjal iseloomustatakse ringliikumist nurkkiirusega. *Nurkkiirust pöörlemisel mõõdab raadiuse poolt ühes sekundis moodustatud nurk.*

Nurkkiiruse mõõtmise juures nurki ei mõõdeta kraadides, vaid r a d i a a n i d e s. *Radiaaniks nimetatakse nurka, millele vastav kaar on võrdne raadiuse pikkusega.*

Järelikult radiaani saame väljendada kraadides, kui 360° jagame terve ringjoone pikkusega $2\pi R$-ga ja korrutame kaare pikkusega $l = R$, nimelt:

$\frac{360° l}{2\pi R}$; $l = R$; radiaan on võrdne $\frac{360° R}{2\pi R} = \frac{360°}{2\pi} = 57{,}3°$.

Ühe punkti ümber olevate nurkade radiaanide arv on $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$; ühel pool diameetrit olevate nurkade radiaanide arv on $\pi$; täisnurk on $\frac{\pi}{2}$ radiaani.

Ühe täispöörde ($T$) jooksul raadius moodustab nurga $2\pi$ radiaani. Kui märkida nurkkiirus $\omega$-ga (omega), siis

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ ehk } \omega = 2\pi\nu.} \qquad \text{(XXX)}$$

Siis joonkiirus $v = 2\pi\nu R = \omega R$;

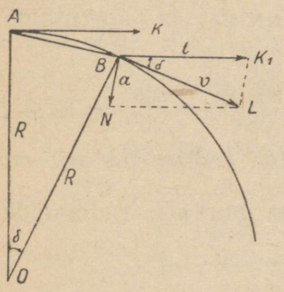
$$\boxed{v = \omega R.} \qquad \text{(XXX-a)}$$

*Nurkkiiruse ühikuks võetakse niisugune nurkkiirus, kus 1 sek. jooksul toimub pööre 1 radiaani võrra.*

Tähistatakse: $\frac{\text{radiaan}}{\text{sekund}}$.

**117. Kesktõmbe kiirendus.** Ühtlasel ringliikumisel kiiruse arvuline suurus on j ä ä v, kuid järjest muutub kiiruse suund, kuna see igal momendil on suunatud piki puutujat. (Peame meeles, et kiirus on vektor.) Seepärast peame ühtlase ringliikumise kiirust lugema muutuvaks suuruseks. Sel juhul on tegemist kiiruse muutumisega igas ajavahemikus, s. o. kiirendusega.

Sirgjooneliselt liikumiselt kõverjoonelisele siirdumisega laieneb kiirenduse mõiste. Mitteühtlase sirgjoonelise liikumise kiirendus muudab ainult kiiruse suurust, mitte selle suunda. Ühtlase ringliikumise kiirendus ei muuda suurust, vaid selle suunda. Mitteühtlases kõverjoonelises liikumises muutuvad nii kiiruse suurus kui ka suund. Siit nähtub, et kõverjoonelise liikumise kiirenduse vektor ei ühti kiiruse vektoriga.



Joon. 163. Kesktõmbe kiirendus.

Kiiruse muutuse kindlaks tegemiseks punktist $A$ kuni punktini $B$ (joon. 163) tõmbame läbi punkti $B$ joone $BK_1$ paralleelselt kiirusega punktis $A$ ja asetame talle lõigu $BK_1$, võrdse $AK$-ga. Asend $B$ on võetud väga väikese ajavahemiku $t$ tagant ja väga lähedal asendile $A$; ainult joonise selguse mõttes on võetud kaar $AB$ suurem. Seega $BK_1$ näitab, milline oleks olnud kiirus punktis $B$, kui poleks olnud vahepeal mingit muutust, aga $BL$ kujutab tegeliku kiiruse suurust ja suunda samas punktis.

Et kindlaks teha, kuidas sai vektorist $BK_1$ vektor $BL$, lahutame vektori $BL$ parallelogrammi reegli järgi kaheks komponendiks, millest üks olgu võrdne $BK_1$-ga; siis teiseks on $BN$.

Nagu joonisel näha, kiiruse $BL$ saame esialgse kiiruse $BK$ liitmisest teatud vektoriga $BN$ parallelogrammi reegli järgi. Järelikult vektor $BN$ kujutab seda kiiruse muutust, mis tuleb liita kiirusega punktis $A$, et saada kiirust punktis $B$.

Kiirendus $a$ on arvuliselt võrdne lõigu $BN$-ga, jagatud kaare $AB$ läbimiseks kuluva ajaga $t$ ($a = \frac{BN}{t}$). Selle juures saadud suurus kujutab otsitavat kiirendust punktis $A$ seda täpsemalt, mida väiksem on ajavahemik. $BN$ arvutamiseks võrdleme kahte kolmnurka $BLN$ ja $AOB$; need on võrdhaarsed: $AO = BO = R$ (raadiused;) $BL = LN = BK_1 = v$ (joonkiirus); nendes kolmnurkades on tipunurgad võrdsed: $\angle AOB = \angle BLN$ (kui ristiseisvate haaradega nurgad). Need kolmnurgad on sarnased. Nende vastavad küljed on võrdelised:

$$\frac{BN}{BL} = \frac{AB}{AO}.$$

Kõõlu $AB$ võib asendada kaarega $AB$, kui ajavahemik on kaduvväike (matemaatika annab võimaluse selle asendamise juures arvutada vea suurust: 1′ kaare jaoks ilmneb viga kaheteistkümnendas kohas pärast koma).

Kaar $AB$ on ühtlasel liikumisel aja $t$ jooksul läbitud tee pikkus, s. o. $\overset{\frown}{AB} = v \cdot t$; $\frac{BN}{t} = a$; kust $BN = a \cdot t$;

$$BL = v; \quad AO = R; \text{ siis } \frac{a \cdot t}{v} = \frac{v \cdot t}{R};$$

$$\boxed{a = \frac{v^2}{R}.} \qquad \text{(XXXI-a)}$$

Valem näitab, et kiirenduse suurus oleneb ainult pöörlemise kiirusest ja raadiusest. *Kiirendus on võrdeline joonkiiruse ruuduga ja pöördvõrdeline ringi raadiusega.*

Et määrata kiirenduse vektori suunda, tuleb arvutada, kui suur on parallelogrammi külgede $BN$ ja $BL$ vaheline nurk, kui ajavahemik $t$ muutub nulliks ja punkt $B$ ühtib punktiga $A$. Kui tähistada nurk $AOB$ $\delta$-ga, siis $\angle BLN = \delta$ ja nurk $NBL = \frac{180 - \delta}{2} = 90 - \frac{\delta}{2}$. Aja $t$ vähenedes kaar $AB$ ja kesknurk $\delta$ lähenevad nullile ja asendis $A$ on nurk $NBL = 90°$. Järelikult igas punktis on *ühtlase ringliikumise kiirendus suunatud keskpunkti,* mispärast nimetataksegi seda kesktõmbekiirenduseks.

Asendades kiirenduse valemis $v$ väärtused, saame järgmised valemid $a$ jaoks:

$$a=\frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R}=\frac{4\pi^2R^2}{T^2R}; \qquad \boxed{a=\frac{4\pi^2R}{T^2}.}$$

$$a=\frac{(2\pi\nu R)^2}{R}; \qquad \boxed{a=4\pi^2\nu^2R.} \qquad \text{(XXXI-b)}$$

$$a=\frac{(\omega R)^2}{R}; \qquad \boxed{a=\omega^2R.}$$

**118. Kesktõmbe- ja kesktõrjetung**[1]. Me nägime eespool, et ühtlase ringliikumise juures on tegemist kesktõmbekiirendusega. Järelikult igasse ringliikumises olevasse kehasse peab mõjuma tung.

Selle suund ühtib kesktõmbekiirenduse suunaga.

Sellepärast nimetataksegi seda tungi k e s k t õ m b e t u n g i k s. Iga tung võib tekitada kiirendust ainult iseenda suunas ja liikumine oleks sirgjooneline, kui ei oleks antud tungi suunaga mitte ühtivat algkiirust.

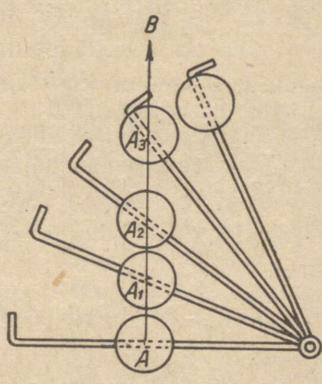
Järelikult masspunkti ühtlaseks ringliikumiseks on tarvilikud kaks tingimust: algkiiruse olemasolu ja suuruselt konstantse, kiirusega ristiseisva kesktõmbetungi tekkimine.

Ringliikumisel tung muudab kiiruse suunda, painutades teed kogu aja, kuid mitte mingil tingimusel ei lähenda keha ringi tsentrile, vaid ümberpöördult, hoiab seda kõrvalekaldumatult ringjoonel.

Kesktõmbetungi tekkimise seletamiseks võtame ühe lihtsaima juhu. Kuul on pandud teljel-pöörlevale vardale; varda ots on keeratud konksu (joon. 164). Kui pöörata varrast joonisel näidatud horisontaalsest asendist kellaosuti liikumise suu-

[1] Kesktõmbetungi nimetatakse ka tsentripetaaltungiks ja kesktõrjetungi — tsentrifugaaltungiks. Tõlkija.

nas, siis esimesel momendil saavad varda kõik punktid ja kuul kiiruse, mille suund kuuli jaoks on kujutatud noolega $AB$. Kuuli inertsi tõttu liigub kuul piki varrast ja võtab üksteisele järgnevalt asendid $A_1$, $A_2$ ja $A_3$, nihkudes varda otsa. Liikumine esialgses suunas lakkab, kui kuul puudutab konksu. Säilitades inertsi tõttu kiirust, kuul surub konksule; see tung on raadiuse sihis ja väljapoole. See tekitab konksule deformatsiooni, kus ka tekib elastsustung. Viimane tung mõjutab kuuli.




Joon. 164. Kesktõmbetungi tekkimine.

Mehaanika kolmanda seaduse järgi mõjub konks kuulile tungiga, mis on suuruselt võrdne, kuid vastassuunaline, järelikult raadiuse sihis keskpunkti poole. Tung, millega konks mõjutab kuuli, ongi kesktõmbetungiks. Seega *kesktõmbetung on tung, millega kinnihoidev keha mõjub ringliikumises olevasse kehasse*. See on rakendatud pöörlevasse kehasse ja suunatud keskpunkti.

Mõju takistusele aga tekib pöörleva keha inertsi tõttu. *Tungi, millega ringliikumises olev keha inertsi tõttu mõjub kinnihoidvasse kehasse, nimetatakse kesktõrjetungiks ja selle mõjumise siht on keskpunktist kaugemale. Kesktõmbe-*

*ja kesktõrjetungid on rakendatud kahesse erinevasse kehasse ja neid ei saa asendada ühe resultandiga.*

Kesktõmbe- ja kesktõrjetungid tekivad ja kaovad mõlemad ühel ajal.

Mehaanika kolmanda seaduse järgi on nad võrdsed ja vastassuunalised.

Vaatleme teisi ringliikumise näiteid. Nööri otsas rippuv kaaluviht saab käe liikumisest nööri kaudu tõuke; tal tekib kiirus $v$; inertsi tõttu püüab viht liikuda kiiruse suunas ja kutsub nööris välja tõmbe — see on kesktõrjetung. Nööris tekkinud elastsustung mõjub vihisse — see on kesktõmbetung.

Ringrennil asetsev kuul saab tõuke; saadud kiiruse säilitamine inertsi tõttu tekitab rennile survet (rennile rakendatud kesktõrjetung). Renni mõju kuulisse on kesktõmbetung; see on rakendatud kuulisse. Analoogilise juhuga on tegemist vagunite liikumisel mööda kurvi.

Kesktõmbetung on alati rakendatud pöörlevasse kehasse ja kesktõrjetung seotisesse.

Kesktõmbetungi suurus määratakse mehaanika teise seaduse järgi: $F = ma$. Asendades $a$ kesktõmbetungi kiirendusega §-st 117, saame kesktõmbetungi jaoks järgmise avaldise:

$$F = \frac{mv^2}{R}; \quad F = \frac{4\pi^2 mR}{T^2}; \quad F = 4\pi^2\nu^2 mR; \quad F = \omega^2 mR.$$

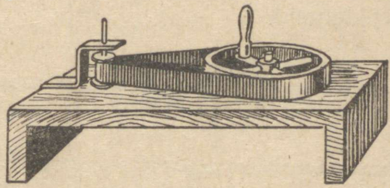
Kesktõrje- ja kesktõmbetunge saab mõõta, kui siduda nöör vihiga dünamomeetrile ja panna see pöörlema. Dünamomeeter näitab tungi suurust.

Katsed kooskõlas eelmiste valemitega näitavad, et *ühe ja sama ringi raadiuse puhul on tung võrdeline kiiruse ruuduga; ühe ja sama perioodi puhul on tung võrdeline selle ringi raadiusega, mida mööda pöörleb keha.*

Alguses näib, nagu poleks esimesed kaks tungiavaldist omavahel kooskõlas. Esimeses on raadius nimetajas, teises — lugejas. Erinevate kiirustega ühel ja samal kurvil sõitvad rongid avaldavad rööbastele, olenevalt kiirusest, erinevat mõju.

Teiselt poolt, erinevatel kaugustel teljest käivad hooratta punktid läbi erinevate raadiustega ringjooned; nende kiirused on võrdelised raadiustega. Sellepärast esimeses $F$-i valemis, asendades $v$ raadiuse abil, peab lugejasse tulema raadiuse ruut ja peale murru taandamist $R$-ga ilmub $R$ ainult lugejasse.

Kiiruse kasvades kahe-, kolme-, nelja- jne. kordseks kasvab kesktõmbetung 4, 9, 16 jne. korda.



Joon. 165. Tsentrifugaalmasin.

Sellepärast võivad üle teatud piiri võetud kiirused saada kardetavaks pöörlevatele kehadele, näiteks turbiinidele, hooratastele jt.

Kiiruse ülemmäära juures saab kesktõmbetung võrdseks materjali tugevuse piiriga.

Tugevuspiir on suurim deformeeriv tung, mille puhul keha säilitab veel oma terviklikkuse.

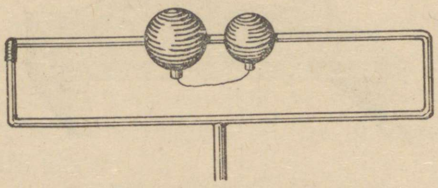
Kui kiirus kasvaks ülemmäärast suuremaks, siis oleks kehaosakeste pöörlemise jätkamiseks tarvis tugevuse piirist suuremat kesktõmbetungi.

Seda pole aineosakesed võimelised andma. Seepärast puudub tung, mis saaks muuta osakeste kiiruse suunda, ja osakesed lendavad puutujaid mööda laiali. Sellest tulenevadki pöörlevate kehade purunemised liigselt suurest kiirusest, nagu näiteks niitide katkemised, rööbaste, hoorataste ja rennide murdumised jne.

Purunemise või katkemise momendil kaovad üheaegselt omavahel võrdsed kesktõmbe- ja kesktõrjetungid ja kehaosad jätkavad oma teed inertsi tõttu, esialgu puutujat mööda.

Eespool tuletatud tungi, massi ja tiirude arvu vahelist sõltuvust võib kontrollida nn. tsentrifugaalmasinaga (joon. 165).

Tsentrifugaalmasin koosneb lauast, millele on kinnitatud kahe ratta teljed. Rattad on ühendatud rihmaga. Väiksema ratta tsentrisse on tehtud pesa, millesse saab asetada mitmesuguste riistade pidemeid.



Joon. 166. Kesktõmbetungi olenevus massist.

Joonisel 166 kujutatud riistal saab näidata keha massi mõju kesktõmbetungi suurusele.

Kaks erinevate massidega kuuli, mis on niidiga ühendatud, asetatakse vardale nii, et nende tsentrid asetseksid pöörlemisteljest ühesugusel kaugusel. Kui rattad panna pöörlema, siis paiskuvad mõlemad kuulid suurema poolele. Mõlemad mõjuvad niidile, kuid suurema mõju osutub suuremaks.

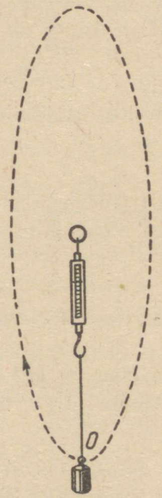
Lähendades suuremat tsentrile, võib leida sellise asendi, kus enam ei teki ühele poolele paiskumist. Selline asend saab tekkida ainult võrdsete kesktõrjetungide $F_1$ ja $F_2$ puhul.

Tungide võrdumisest saame võrduse:

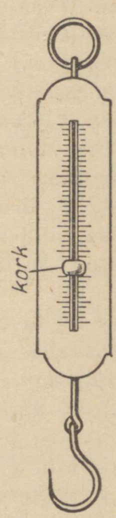
$$4\pi^2\nu^2 m_1 R_1 = 4\pi^2\nu^2 m_2 R_2,$$

kust $m_1 R_1 = m_2 R_2$, s. o. kuulide kaugused pöörlemisteljest on sel juhul pöördvõrdelised kuulide massidega, mida ka mõõtmised kinnitavad.

Kui lõpuks kinnitada tuntud massiga kuul niidi otsa, niit siduda dünamomeetri külge (joon. 167) ja panna pöörlema, siis




Joon. 167. Kesktõrjetungi mõõtmine dünamomeetri abil.




Joon. 168. Dünamomeeter korgitükiga.

saame dünamomeetri abil mõõta igale massile, raadiusele ja tiirude arvule vastavat kesktõmbetungi.

Et oleks võimalik saada dünamomeetri näitamist, asetatakse tema pilusse tükk korki, mis jääb seisma dünamomeetri suurima näitamise kohale (joon. 168).

*Harjutus 21.*

1) Rong sõidab kurvil, mille raadius $R = 200$ m, kiirusega 36 km/h. Leida kesktõmbekiirendus.

Vastus: 0,5 m/sek$^2$.

2) Ratas, mille diameeter on 80 cm, teeb 3000 tiiru/min. Leida kesktõmbekiirendus ja äärmisel pinnal asuva punkti joonkiirus.

Vastus: 39 480 m/sek$^2$.

3) Kuul, mille mass $m = 20$ g, pöörleb 60 cm-lise niidi otsas vertikaalses tasapinnas ja teeb 60 tiiru/min. Mitu düüni on kesktõmbetung? Võrrelda seda kuuli kaaluga.

Vastus: 47 374 dn; 2,4 korda suurem.

4) Mitu tiiru minutis peab tegema eelmise ülesande kuul, et kesktõmbetung oleks võrdne selle kaaluga?

Vastus: 38 tiiru minutis.

5) Kui pika niidi peame võtma, et kuuli pöörlemisel niidi tasapinnas kiirusega 120 tiiru/min kesktõmbetung oleks kolm korda kaalust suurem?

Vastus: $\approx$ 18 cm.

6) Arvutada Maa pöörlemise kesktõmbekiirendus ekvaatoril; Maa raadius — 6370 km.

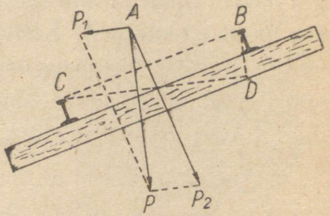
7) Mitu korda kiiremini peaks Maa pöörlema, et ekvaatoril asetsevatel kehadel ei oleks kaalu, s. o. kesktõmbetung võrduks Maa külgetõmbega (võtta $g = 980$)?

Vastus: 17 korda.

8) Kas kõigil veereva ratta punktidel on ühesugune kiirus; kui ei ole, siis kus on suurim ja kus on väikseim?

**119. Pöörlemise inertsiga seletatavaid nähtusi; tsentrifugaalmehhanismid.** 1. Kurvidel asetatakse välimine rööbas sisemisest kõrgemale. Sellest tekib vaguni kaldumisel raskustungi $P$ komponent $P_1$ (joon. 169), mis ongi kesktõmbetungiks ja muudab sirgjoonelise liikumise ringliikumiseks. Elavad olendid tekitavad pöördel ise oma lihastega tarviliku keha kalde. Autod, mis ei saa teha kallet, peavad kurvidel oma liikumist tublisti aeglustama, muidu autokere tagumine osa jätkab sirgjoonelist liikumist ja auto võib ümber pöörduda.

Vagun, liikudes raudteetammil, avaldab rööbastele raudteetammiga ristiseisvat survet, muidu tekiks rööbastele külg-surve ja nad kuluksid ruttu läbi. Horisontaalset sirget mööda liikudes tekitatakse surve vaguni raskusega ja sellejuures teostub tungi ja tee ristiseis. Kurvil annab vaguni raskus ühe komponendi kesktõmbetungi näol ja teise, mis tekitab survet. Et surve oleks seejuures risti rööbastele, on tarvis tõsta välimist rööbast. Kaldenurga suurusest oleneb kesktõmbetungi lubatud suurus, aga viimane on seotud kiirusega; järelikult on iga kalde jaoks lubatud ainult teatud kiirus. Suurema kiiruse juures tekib surve välimisele, väiksema juures sisemisele rööpale. Tegelikult kõiguvad raudteekurvidel kiirused suures vahemikus. Kui aga kiirus väga palju ületab normaalse, siis rööpa elastsusest tekkinud kesktõmbetungist ei piisa sirgjoonelise liikumise muutmiseks ringliikumiseks ja rong jookseb inertsi tõttu rööbastest välja.



Joon. 169. Vaguni liikumine käänakul.

Kiiruse sõltuvust kaldnurgast määratakse järgmiselt: $\triangle\ APP_1 \backsim \triangle\ BCD$. Kolmnurkade sarnasusest: $\frac{P_1}{P} = \frac{BD}{CD}$.

Kui rööbaste laius on $d$[1], välimise rööpa tõusu kõrguse sisemise suhtes on $h = BD$, kõverusraadius $R$, siis $\frac{P_1}{P} = \frac{h}{d}$; aga

$$P_1 = \frac{mv^2}{R}; \qquad P = mg \text{ ja } \frac{mv^2}{R} = \frac{mgh}{d};$$

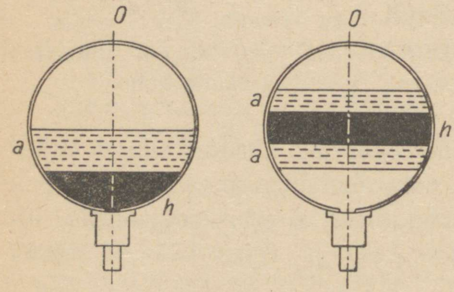
kust

$$v = \sqrt{\frac{ghR}{d}} \text{ ja } h = \frac{dv^2}{Rg}.$$

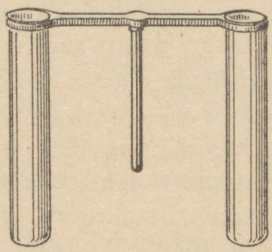
2. Kui kallata kerakujulisse klaasnõusse mitmesuguse tihedusega vedelikke, näiteks (joon. 170) õli, vett ja elavhõbedat;

[1] Seetõttu et nurk on väike, võib rööbaste laiust $CB$ võtta täisnurkse kolmnurga küljeks $CD$.

lisada veel korgitükikesi ja panna kõik pöörlema tsentrifugaalmasinal, siis võime näha, et vedelikud asetuvad rõngastena: välimine — elavhõbe, järgmine — vesi, edasi — õli (sisemisele õlipinnale paigutuvad korgitükikesed) ja lõpuks keskel — õhusammas. Üldse, mida tihedam vedelik, seda kaugemale asetub see pöörlemisteljest. Samalaadne nähtus toimub ka juhul, kui vedelikus on mitmesuguseid pulbreid. Seejuures jällegi, mida suurem on pulbri aineosakeste tihedus, seda kaugemale eemalduvad nad teljest. Sellist pöörlemist tsentrifugaalmasinal ehk




Joon. 170. Erinevate tihedustega vedelikkude jagunemine pöörlemisel.



Joon. 171. Pulbrite analüüs.

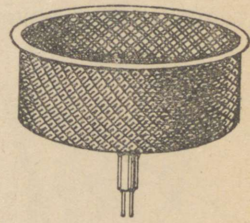
nn. tsentrifuugimist kasutatakse pulbrite eraldamiseks terakeste suuruse järgi, vere analüüsil ja mitut liiki kõvade kehade eraldamisel uriinist jts. (joon. 171). Tsentrifugaalmasinat, mida kasutatakse väiksema tihedusega rasvaine eraldamiseks teistest piima osadest, nimetatakse s e p a r a a t o r i k s ehk koorelahutajaks.

Auklikkude seintega tsentrifuugi kasutatakse mee eraldamiseks kärgedest, vee eraldamiseks suhkrust (suhkru kuivatamine), vee eraldamiseks märjast riidest, pesust jts. (joon. 172).

3. T s e n t r i f u g a a l r e g u l a a t o r. Kesktõrjeregulaatori ehitust näeme joonisel 173. Muhv on kangi abil ühen-

datud klapiga, mis reguleerib auru juurdevoolu aurumasina silindrisse. Regulaator pöörleb ühes võlliga.

Kiiruse suurenemisel kaugenevad inertsi tõttu kerad $M$ ja $M_1$ teineteisest ja tõstavad muhvi kõrgemale; sellega ühenduses olev kang pöörab klappi, vähendab sellega auru juurdevoolu silindrisse ja masina kiiruse kasvamine lakkab. Kiiruse vähenemisel on nähtuse käik vastupidine.



Joon. 172. Kesktõrjekuivati.

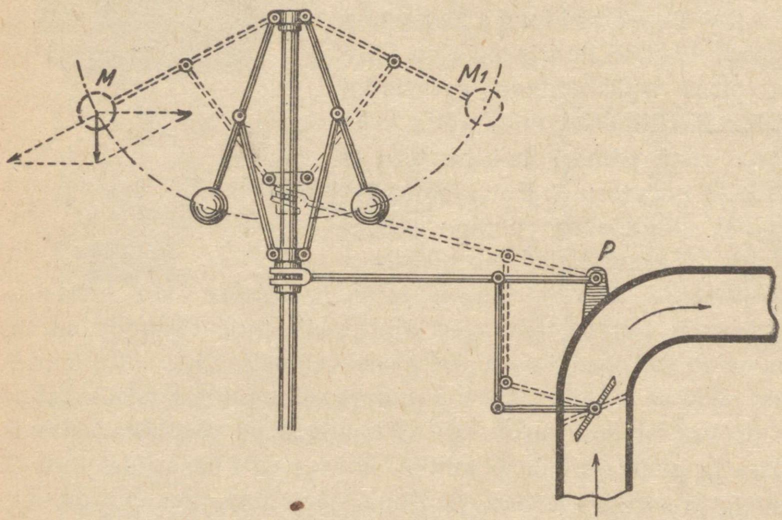
4. T s e n t r i f u g a a l p u m p (joon. 174). Silindris pöörleb telje $A$ otsas labidakestega varustatud ratas $B$. Silindrist tuleb välja kaks toru: risti silindri teljega toru $D$ ja telje sihis toru $C$. Enne töötamise algust täidetakse pump veega. Ratta pöörlemisel hakkab pöörlema ka vesi ja saadud kiiruse tõttu paisatakse see inertsiga torusse $D$. Pumba töötamise ajal tekib torus $D$ tugev surve, mis ajab vee üles. Samal ajal peaks vee väljavoolu tõttu silindrist sellesse tekkima vähendatud õhurõhumine, kuid õhurõhumine väljastpoolt surub toru $C$ kaudu uued veehulgad silindrisse ja pump jätkab töötamist, imedes vett basseinist toru $C$ kaudu ja surudes torusse $D$. Kuna tsentrifugaalpumbal puuduvad klapid, siis võib ta läbi lasta ka sogast vett ja isegi liiva.

Tsentrifugaalpumpa kasutatakse nii veevärgis kui ka kanalisatsioonivõrgus.

Seda võib kasutada ka õhu imemiseks ja surumiseks. Selliseks otstarbeks kasutatud pumpa nimetatakse v e n t i l a a t o r i k s.

5. V e t r u v a r õ n g a p ö ö r l e m i n e. Kui asetada tsentrifugaalmasinale vetruvad rõngad, mis on alt kinnised ja ülevalt libisevad varrast mööda (joon. 175), ja panna masin pöörlema, siis rõngas laieneb pöörlemisteljega ristiseisvat dia-

meetrit mööda ja võtab ovaalse kuju. Rõnga iga punkt saab pöörlemisel isesuguse joonkiiruse: teljel enesel nulli ja suurima ekvaatoril. Et muuta inertsi tõttu tekkivat sirgjoonelist liikumist ringliikumiseks, on tarvis seal suurimat kesktõmbetungi, kus on suurim kiirus; kuid suurim kesktõmbetung saab tekkida elastsuse arvel suurima venituse juures; sellepärast suurim väljavenimine tekib ekvaatoril ja kera surutakse telje sihis kokku.

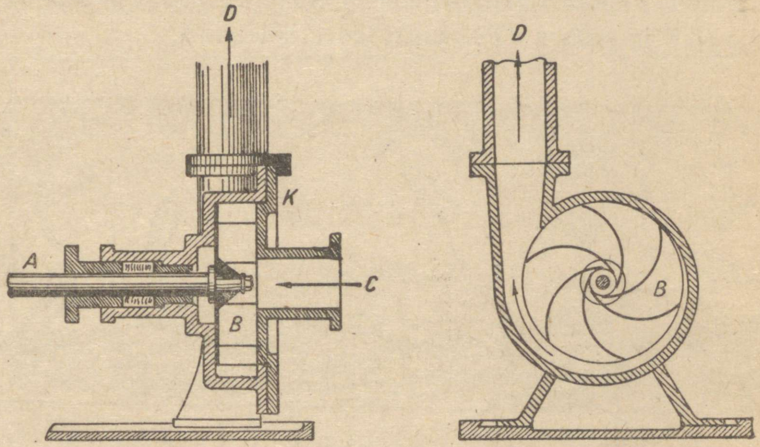



Joon. 173. Tsentrifugaalregulaator.

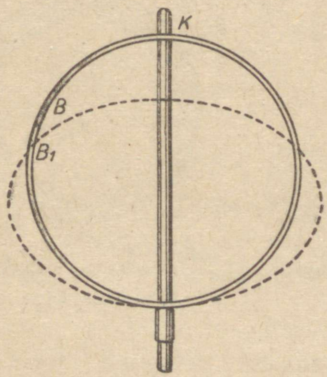
See katse seletab kõikide planeetide juures tähelepandavat lapikust pöörlemistelje sihis. See võis tekkida sel ajal, kui planeedid läksid üle vedelast olekust tahkesse.

6. Pöörlemistelje sihi säilimine. Kõik pöörleva keha punktide kiirused asetsevad pöörlemistasapinnas (joon. 176). Keha inerts avaldub kiiruse suuruse ja suuna säilimises. Pöörleva keha inerts viib sellele, et pöörlemistasapind ja pöörlemistelg säilitavad oma sihi. Kui võtta pöörleva ratta

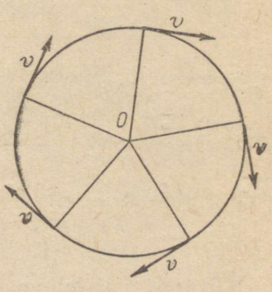
telg laagritelt, siis ta veereks teed mööda, säilitades pöörlemistelje sihti, kuni hõõrdumine selle kiirust ei vähenda. Pöörleva keha inertsil põhjeneb vurrilaskmine.




Joon. 174. Tsentrifugaalpump.



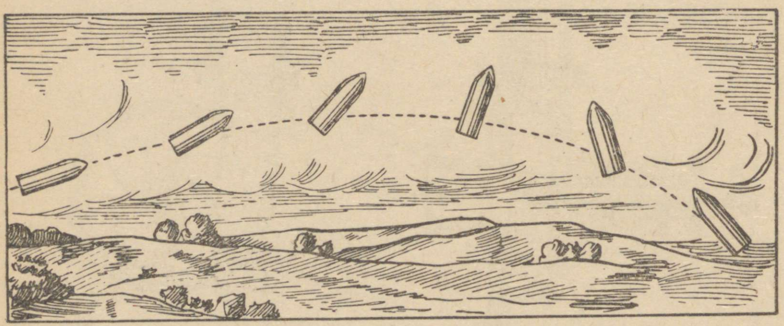

Joon. 175. Vetruva rõnga pöörlemine.



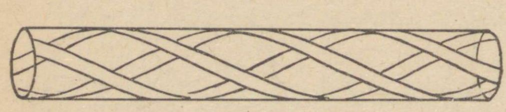

Joon. 176. Kiiruse suuna ja pöörlemistelje sihi säilimine.

Samuti kasutatakse seda nähtust laevadele ja üheröörpaga raudtee vagunitele stabiilsuse andmiseks.

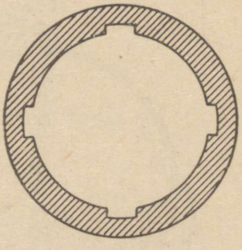
Et vähendada laeva kõikumist, asetatakse tema sisemusse telje ümber pöörlev massiivne keha. Keha inerts püüab säilitada telje sihti ja sellega vähendabki laeva kõikumist.



Joon. 176-a. Mittepöörleva pikerguse kuuli lend õhus.



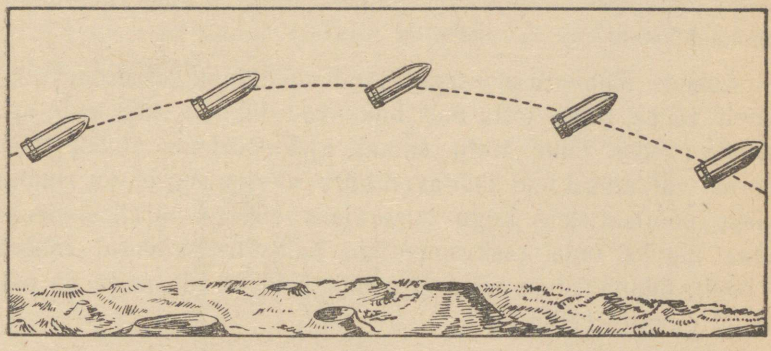
Joon. 176-b. Kruvijooneline lõige vintpüssi sisemisel seinal.



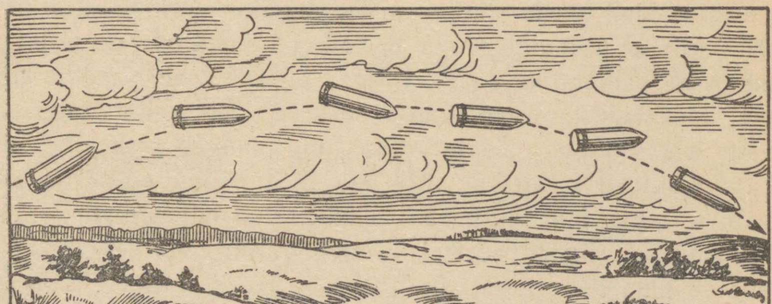
Joon. 176-c. Vintpüssi toru ristlõige.

Kiiresti pöörleva keha omadustel põhjeneb v u r r - k o m p a s s i tegevus, mida kasutatakse meridiaani tõelise asendi määramiseks. Vurrkompassi olulisem osa pannakse pöörlema kiirusega kuni 20 000 tiiru minutis; vastavate seadeldiste abil tuleb selle telg alati meridiaani sihti ja säilitab seda pöörleva keha inertsi tõttu.

Pöörlemistelje sihi jäävust kasutatakse lasketabavuse tõstmiseks. Kui asendada kerakujuline mürsk terava otsaga silindri-



Joon. 176-d.



Joon. 176-e. Pöörleva mürsu liikumine õhus.

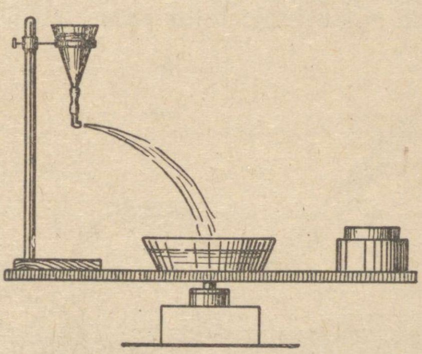
kujulise mürsuga, siis õhutakistus märksa väheneb. Säärase kujuga kuulid teeksid õhus uperpalli ja tabaksid märki kas küljega või põhjaga, aga mitte teravikuga (joon. 176-a). See puudus kõrvaldatakse nii, et mürsule või kuulile antakse raua sees peale translatoorse liikumise veel ümber telje pöörlev liikumine.

Selleks otstarbeks tehakse toru sisemisele seinale kruvijooneline lõige, mis on kujutatud joonisel 176-b ja mille ristlõige — joonisel 176-c.

Laengu plahvatusel saab kuul või mürsk püssirohu gaasidelt tõuke, mille tõttu nad hakkavad liikuma piki toru, aga kruvijoonelise lõike tõttu samal ajal pöörlema ümber telje. Torust väljumisel nad säilitavad kiire pöörlemise; õhuta ruumis jääks pöörlemistelg kogu lennuajaks endaga paralleelseks ja keha liiguks oma raskuspunktiga ballistilist kõverat mööda (176-d). Õhutakistuse tõttu aga mürsk liigub nii, nagu on näidatud joonisel 176-e.

7. Maakera pinnal liikuvate kehade kaldumine Maa pöörlemise tõttu. Kinnitame tsentrifugaalmasina pessa pika laua keskele seatud pideme (joon. 177). Asetame laua otsale statiivi, mille rõngasse on kinnitatud lehter vertikaalse kummitoruga ja millesse omakorda on pistetud nurga all painutatud klaastoru (laua teisele otsale paneme statiivi tasakaalustamiseks mingi raskuse). Kui kallata lehtrisse vett, siis joonisel näidatud juhul juga langeb keskpaika, niikaua kui laud on paigal. Kui aga laud panna pöörlema, siis juga ei lange laua keskpaika, vaid kaldub kõrvale pöörlemissuunas. Kui, ümberpöördult, asetada statiiv laua keskpaika ja juhtida juga ääre poole, siis jääb juga lauast maha. Esimesel juhul on lehtrist voolaval joal suurem joonkiirus kui laua keskmisel osal, ta säilitab selle inertsi tõttu ja ennetab keskpunktile ligemalseisvad osad. Teisel juhul on joal väiksem kiirus kui laua äärel ja ta jääb sellest maha.

Niiviisi jõgede vesi või õhumassid, mis liiguvad põhjapoolkeral põhjast ekvaatori poole, s. o. väiksema joonkiirusega kohtadest suurema joonkiirusega kohtade poole, jäävad neist maha, ja kalduvad läände (Maa pöörleb läänest itta), s. o. kalduvad paremale, kui vaadata liikumise suunas. Samasuguste masside liikumisel ekvaatorilt põhja poole tekib kaldumine itta, s. o. jällegi paremale[1]. Siit tekib põhjapoolkeral jõgede paremate kallaste uhtumine ja tuulte kõrvalekaldumine meridiaani sihist.



Joon. 177. Maa pöörlemise tõttu liikuvate kehade kõrvalekaldumise demonstreerimise seadeldis.

Maa pöörlemine põhjustab veel terve rea sarnaseid kõrvalekaldumisi. Sellega on näiteks seletatav rööbaste erinev kulumine kahe paari rööbastega raudteel. Põhjapoolkeral suruvad rongirattad rohkem liikumise suhtes paremale rööpale; sellepärast kulub parem rööbas küljelt vasakust rohkem.

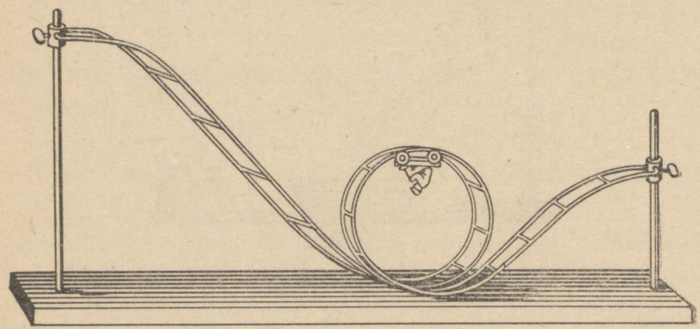
Vabalt langev keha kaldub vertikaaljoonest itta; see saab nähtavaks, kui keha kukub suuremalt kõrguselt, näiteks sügavasse šahti.

---

[1] Veevoolude kaldumise põhjapoolkeral paremale avastas vene õpetlane Baer ja see kannab Baeri seaduse nime.

Analoogiliselt jõeveele ja tuulele kalduvad kahurimürsud kõrvale, kui laskmine toimub meridiaani või sellele lähedases sihis, mida märkilaskmisel tuleb arvestada.

8. Liikumine vertikaalset sõlme mööda. Tsirkustes liiguvad sagedasti autod ja jalgrattad vertikaalsesse ringsõlme keeratud teed mööda (joon. 178). Selline liikumine on võimalik ainult suurema algkiiruse juures. Kui kiiruse suurus on tõusu algul sõlme juures arvuliselt suurem sellest vähenemisest, mis tekib raskustungi tõttu sõlme läbimõõdu kõrgusel,



Joon. 178. Liikumine vertikaalset sõlme mööda.

siis ka kõrgeimas sõlmpunktis on kehal tung liikuda inertsi tõttu puutujat mööda. Sõlme elastsusest tekitatud kesktõmbetung hoiab keha sõlme peal. Kui lasta keha veerema madalamalt, siis kiirus pole piisav ja keha kukub sõlmelt alla. Analoogilist katset võib teha kopsiku ja veega: tiirlemise küllaldase kiiruse juures vesi ei voola kopsikust välja ka siis, kui kopsikul on põhi ülal.

1. näide. Arutame läbi küsimuse, missuguselt kõrguselt peame kuuli renni mööda alla laskma, et ta, tehes 20 cm läbimõõduga ringsõlme, ei kukuks kõrgeimast sõlmepunktist alla.

| | |
|---|---|
| Antud: Sõlme raadius $r$, vabalangemise kiirendus $g$. Leida langemiskõrgus $h$. | Kuul ei kuku kõrgeimast sõlmepunktist sel juhul, kui tema kaal on võrdne selle kesktõmbetungiga, mis on vajalik kuuli ringliikumiseks. |

Siis saab keha enda kaalu arvel kesktõmbekiirenduse ja ei jää üle tungi, mis kutsuks välja vaba langemise. Kui tähistame keha massi $m$-ga, kaalu $P$-ga ja kesktõmbetungi $F$-ga, siis selleks tingimuseks, et kuul ei kukuks sõlme kõrgeimast punktist, on võrdus:

$$P = F.$$

Kuid $P = mg$ ja $F = \frac{mv^2}{r}$, kus $v$ on kiirus sõlme kõrgeimas punktis, järelikult:

$$mg = \frac{mv^2}{r} \text{ ehk } v = \sqrt{gr}.$$

Kuid oma kiiruse saab kuul kaldpinnast allaveeremisel.

Kui algkiirus on null, siis langemiskiirus ei olene tee kujust ja on võrdne $v = \sqrt{2gs}$.

Kuul langeb alguses kõrguselt $h$ ja siis tõuseb sõlme diameetri $2r$ kõrgusele.

Selline liikumine vastab kuuli langemisele kõrguselt $h - 2r$. Seepärast selle kiirus sõlme kõrgeimas osas on:

$$v = \sqrt{2g(h - 2r)}.$$

Mõlemad kiiruse avaldised peavad olema võrdsed:

$$\sqrt{gr} = \sqrt{2g(h - 2r)};$$

$$gr = 2g(h - 2r); \quad r = 2h - 4r; \quad 5r = 2h; \quad h = \frac{5}{2} r;$$

$$h = \frac{5}{2} \cdot 20; \quad h = 50 \text{ cm}.$$

(Arvutamisel on eeldatud kuuli hõõrdumiseta liugumist, aga mitte veeremist).

2. n ä i d e. Kui suur peaks olema kahurist lastud mürsu horisontaalne kiirus $v$ (kahur asub mittekaugel maapinnast), et mürsk ei langeks maha, vaid hakkaks liikuma ringjoont mööda ümber Maa, saades viimase satelliidiks.

A n t u d: Maa raadius $R$, vabalangemise kiirendus $g$.

L e i d a $v$.

Horisontaalselt visatud keha hakkab liikuma ringjoont mööda raadiusega $R$ ainult sel juhul, kui sellele mõjub kesktõmbetung $F$.

See tung peab hoidma keha ringjoonel, s. o. andma temale kesktõmbekiirenduse $\frac{v^2}{R}$.

Kust saab tulla selline tung? Ainult keha kaalust. Ülesande tingimuste kohaselt annab keha kaal kehale ainult kesktõmbekiirenduse, kuid ei pane teda vabalt langema Maa tsentri poole.

Seega et kehast saaks Maa kaaslane, on vaja, et kesktõmbetung saaks kaaluga võrdseks $F = P$:

$$\frac{mv^2}{R} = mg; \quad v = \sqrt{gR}.$$

Kui võtta $R = 6300$ km $= 63 \cdot 10^5$ m ja $g \approx 10$ m/sek$^2$, siis:

$$v = \sqrt{63 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{sek}^2}; \quad v = 7{,}9 \text{ km/sek}.$$

3. n ä i d e. Missuguse nurga võrra horisondi suhtes peab kalduma inimene, kui ta tahab joosta kiirusega $v$ ringjoont mööda, mille raadius on $R$ (joon. 179)?

A n t u d: Joonkiirus $v$, raadius $R$, vaba langemise kiirendus $g$.

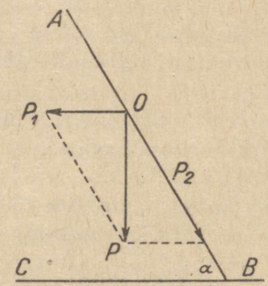
L e i d a kaldenurk $\alpha$.

Et tiirelda ringjoont mööda, mille raadius on $R$ kiirusega $v$, peab kesktõmbekiirendus olema $\frac{v^2}{R}$.

Missugune tung saab anda sellist kiirendust?

Kesktõmbetung saab tekkida keha kaalu arvel, kuid ei saa sellega võrdseks nagu eelmistes näidetes.

Lahutame keha kaalu $P$ kaheks komponendiks: üks suunaga toetuspunkti $B$, teine horisontaalses suunas ringi tsentri poole.




Joon. 179.

Esimene tung $P_2$ hävib toetuspunkti vastumõju tõttu; teine $P_1$ saab kesktõmbetungiks. $P_1 = P \cot \alpha$ (kolmnurgas $OPP_1$) $P_1 = = \frac{mv^2}{R}$ (kui kesktõmbetung); $P = mg$.

Siit $\frac{v^2}{R} = g \cot \alpha$; $\cot \alpha = \frac{v^2}{gR}$ ehk $\tan \alpha = \frac{gR}{v^2}$.

Kui kiiruse asemel on antud tiirude arv $\nu$ ($v = 2\pi R\nu$), siis $\tan \alpha = \frac{g}{4\pi^2\nu^2 R}$.

Sellest seosest võib määrata iga suurust: $\alpha$, $\nu$ ja $R$, kui teised on antud. Samasugust mõttekäiku rakendame Watt'i regulaatori kerade kõrvalekaldumise nurga määramisel jts.

### *Harjutus 22.*

1) 100 g massiga kuul tiirleb horisontaalset ringjoont mööda 1 m pikkuse niidi otsas ja teeb 60 tiiru minutis; niit moodustab selle juures koonuse külgpinna. Leida kesktõmbetung.

Vastus: 380 600 dn.

2) Missuguse nurga all vertikaali suhtes peaks olema eelmises ülesandes niit, et kesktõmbetung oleks 60 000 dn?

Vastus: umbes 33°.

3) Kui pikk peaks olema niit, et kuul teeks 60 tiiru minutis ja pingutaks niiti 30° all vertikaali suhtes?

Vastus: 28,8 cm.

4) Uisutaja liigub kiirusega 10 m/sek ringjoonel raadiusega $R = 40$ m. Missuguse nurga all horisondi suhtes ta peab kalduma?

Vastus: umbes 75°.

5) Hobune jookseb areenil ringjoont mööda raadiusega $R = 10$ m 25 sek-ga. Leida kaldenurk horisondi suhtes.

Vastus: umbes 86°.

6) Pendli niidi pikkus $L = 25$ cm. Mitu tiiru minutis peab pendel tegema ringjoont mööda, et niit moodustaks pöörlemisteljega nurga 30°, 45°, 60°?

Vastus: 1,0; 1,2; 1,4.

7) Arvutage Maa pöörlemise kesktõmbekiirendus ekvaatoril ja Kiievi laiusel ($\varphi = 50°$). Maa raadius võtta 6350 km.

Vastus: 2,2 cm/sek$^2$.

8) Reisija sõidab kinnises autos kõverat teed mööda raadiusega 40 m ja kiirusega 4 m/sek. Tee on horisontaalne. Millisena (sirge, kõver, kuidas suunatud) paistab reisijale autos kukkuva raske kera tee? Millisena paistab sama tee väljaspool autot seisvale vaatlejale? Kuidas ripub kera, kui see riputada pendlina auto lakke?

9) Lendur, kelle kaal $P = 75$ kG, lennates kiirusega $v = 160$ km/h, teeb vertikaalses tasapinnas surmasõlme raadiusega 60 m.

a) Kui suur on lenduri surve lennukile kõige madalamas sõlme punktis?

Vastus: 327 kG.

b) Kui suur on surve kõrgeimas punktis?

Vastus: 177 kG.

10) Missugune rööbas — kas parem või vasak liikumise suunas — kulub rohkem lõunapoolkeral?

11) Miks on ühe rööpapaariga teel mõlema rööpa kulumine ühesugune?

**Kirjandus.** Павша А. В., Центробежная сила и её техническое использование. Перри, Вращательный волчок.

## *KONTROLLKÜSIMUSI.*

1) Missugune on kõverjoonelise liikumise kiiruse suund igas kõverjoone punktis?

2) Missugust liikumist nimetatakse ühtlaseks ringliikumiseks?

3) Mida nimetatakse pöörlemise perioodiks? Kuidas on seotud pöörlemise periood pöörete arvuga sekundis?

4) Kuidas väljendub joonkiirus perioodi ja tiirude arvu kaudu?

5) Mis mõõdab nurkkiirust?

6) Mida nimetatakse radiaaniks?

7) Mis on nurkkiiruse ühikuks?

8) Kuidas joonkiirust avaldada nurkkiiruse kaudu?

9) Kas on ühtlasel ringliikumisel kiirendust?

10) Milles avaldub ühtlase ringliikumise kiirendus?

11) Kuidas tuletada ühtlase ringliikumise kiirenduse valemit?

12) Andke kõik kesktõmbekiirenduse valemid.

13) Missugune on kesktõmbe- ja kesktõrjetungide päritolu, suund, suurus ja toime?

14) Kuidas rakendatakse tehnikas ringliikumise inertsi?

15) Kas keha ühtlasel pöörlemisel kesktõmbetung teeb tööd?

## V. Üldine gravitatsiooniseadus.

**120. Taevakehade liikumise uurimine enne Kopernikust.** Juba kõige varajasematel kultuurielu aegadel oli inimkonna tähelepanu suunatud taevakehade liikumisele ja huvi selle vastu on kasvanud kultuuri arenemisega. Inimese tootmistegevuse laienemisega komplitseerusid ühiskondlikud suhted, mis omakorda nõudis ajamõõtu ja ajaarvutamist. Esimesed aastapikkuse mõõtmised, kalendri koostamised ja taevakehade vaatlused suuremal hulgal tekkisid neis mais, kus tootmistegevus saavutas suurima arengu, ja nimelt suurte jõgede orgude põllumajanduslikes maades: Egiptuses — Niiluse, Irakis — Tigrise ja Eufrati, Indias — Induse jõe ja Hiinas — Huangho ja Jangtsekiangi kallastel.

Kopernikus (1473—1543)

Kui tootmis-kultuurilise tegevuse tsenter siirdus kreeklastega asustatud maadesse, siis paljud silmapaistvad kreeka astronoomid rikastasid astronoomiat suurte avastustega.

Kreeka astronoom Ptolemaios (sünd. 70. või 77., surn. 147. a.) oma töös «Maailma hiigelehitus» arendas nn. g e o t s e n t r i l i s t (*geo* — kr. k. maa) süsteemi, asetades maailma keskpunkti liikumatu Maa, mille ümber ringlevad Päike, Kuu, planeedid ja tähed. Geotsentriline vaatepunkt sulas ühte antropotsentrilisega (kr. k. *antropos* — inimene), mida juhtis kristlik kirik. Selle õpetuse järgi on inimene kõige tsenter ja eesmärk, tema jaoks on looduses kõik, nii loomad kui taimed ja terve anorgaaniline loodus. Kirik võttis Ptolemaiose süsteemi oma kaitse alla ja toetas seda oma mitu sajandit kestnud võimu jooksul, läbi terve keskaja.

**121. Maailma ehitus Kopernikuse järgi.** Juba XV sajandil kasvas tugevasti Lääne-Euroopa kaubandus läbikäimise tõttu Idaga.

Kepler[1] (1571—1630).

Kaubavahetust toimetati peamiselt mereteed kaudu; meremehed määrasid oma teed lahtisel merel taevatähtede järgi. Kuid tol ajal olemasolnud planeetide ja tähtede asendite tabelid olid väga vananenud ja erinesid tublisti taevakehade tegelikust asendist. Tabelite parandamise vajadus oli väga suur, huvi astronoomiliste küsimuste vastu kasvas ja selle huvi pinnal tekkis uus maailma ehituse teooria, mille lõi poola astronoom Kopernikus (1473—1543).

Tarvitades tänapäeva keelt, võime Kopernikuse teooria peajooni väljendada järgmiselt.

---

[1] Kepler sündis Würtembergis vaeses perekonnas; 1594. aastast alates — matemaatika õpetaja Gratzi gümnaasiumis; 1600. a. peale tegeles Tycho Brahe asutatud observatooriumis uute planeetide tabelite koostamisega kuni 1627. a. Avastas planeetide liikumise seadused, leiutas pikksilma ja tegeles palju optika küsimustega, seletas nägemise protsessi, akommodatsiooni, lühinägevust, kaugenägevust ja oli lähedal murdumise seadusele.

1. Maailma tsentris on Päike (siit süsteemi nimi heliotsentriline, kuna päike on kreeka keeles *helios*).

2. Päikese ümber liiguvad Maa ja kõik teised planeedid mitmesugustel kaugustel järgmises järjekorras: Merkuur, Veenus, Maa, Marss, Jupiter ja Saturn (rohkem planeete polnud tol ajal teada). Planeetide taga on tähed, mis ei liigu Päikese ümber.

3. Taevavõlvi ööpäevane näiv liikumine koos kinnistähtede ja planeetidega seletub Maa tegeliku pöörlemisega ümber oma telje, mis seisab 66,5° all Maa tee ehk nn. orbiidi tasapinna suhtes.

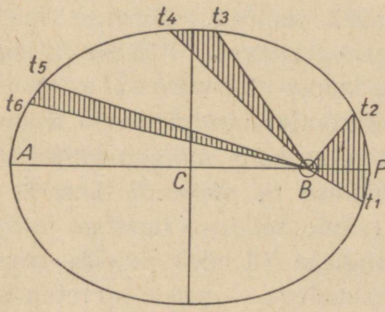
**122. Uue maailmavaate võitlus kiriku autoriteediga.** Kuna Kopernikuse teooria tõi suure lihtsustuse taevakehade liikumise seletusse ja sellega kergendas nende praktiliste ülesannete lahendamist, mida astronoomiale ette seadis kaasaja kaubanduslik-majanduslik elu, siis katoliku kirik kui merekaubanduse suur osanik suhtus algul soodsalt uude õpetusse. Kuid varsti sai ta aru, et Kopernikuse õpetus läheb kaugemale puhtastronoomiliste küsimuste lahendamisest ja paneb aluse uuele maailmavaatele. Maa, kiriku õpetuse järgi «jumala trooni» tugi ja inimese — «maailma loomise mõtte ja krooni» tegutsemise paik, kaotab oma liikumatuse ja hakkab samuti kui teisedki taevakehad kiiresti liikuma ümber Päikese. Kiriku õpetuse alus maailma loomise mõttest ja looja ülitarkusest sai seeläbi õõnestatud ja ühes sellega ähvardas langeda ka kiriku võim inimese mõistuse üle. Sellepärast algas sajandi lõpul kiriku pöörane võitlus uue õpetusega. Selle võitluse esimeseks ohvriks oli Bruno, kes põletati 1600. a. tuleriidal.

Kuid selles võitluses põrkas kirik kokku oma geniaalseima ja jõulisema vastasega Galileiga, kes oma teadusliku tegevuse ajal kuuekümne aasta jooksul paljudes loengutes ja töödes uut õpetust arendas ja läbi viis, esitades vastuvaidlematuid tõestusi selle kasuks ja lükates ümber vastuväiteid.

**123. Kepleri seadus.** Sada aastat pärast Kopernikuse teooria ilmumist avastati planeetide liikumise seadused. Mitmeaastase töö tulemusena taani astronoomi Tycho Brahe (1546—1601) vaatlusandmete põhjal leidis saksa astronoom Kepler (1571—1630) üldised seadused planeetide liikumise kohta ümber Päikese ja kuude liikumise kohta ümber planeetide.

Esimene seadus. *Planeetide liikumise tee ümber Päikese on ellips, mille ühes fookuses asetseb Päike* (joon. 180).

Arvutamisel võib võtta esimeses lähenduses planeetide orbiitideks ringjooned.




Joon. 180. Kepleri teine seadus.

Teine seadus. *Planeetide raadius-vektorid moodustavad võrdsetes ajavahemikkudes võrdsed pindalad.*

Teise seaduse järgi on planeetide liikumise kiirused igas punktis erinevad. Need kiirused muutuvad nii, et raadius-vektorite poolt võrdsetes ajavahemikkudes moodustatud pinnad on võrdsed (joon. 180 — viirutatud pinnad). Jooniselt 180 on näha, et joonkiirus on seal väiksem, kus kaugus Päikesest on suurem, ja suurem seal, kus kaugus on väiksem. See on sektorkiiruse seadus.

Kolmas seadus. *Planeetide tiirlemisperioodide ruudud suhtuvad nagu nende keskmiste kauguste kuubid:*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3},$$

kus $T_1$ ja $T_2$ on kahe planeedi tiirlemisperioodid; $R_1$ ja $R_2$ — nende keskmised kaugused Päikesest.

Näiteks Veenuse[1] jaoks:

$R_V = 0{,}7233; \quad T_V = 0{,}61519;$

$$\frac{T_V^2}{T_M^2} = 0{,}37846; \qquad \frac{R_V^3}{R_M^3} = 0{,}37846.$$

Marsi jaoks:

$$R_{\text{Mars}} = 1{,}5237; \qquad T_{\text{Mars}} = 1{,}8808;$$

$$\frac{T_{\text{Mars}}^2}{T_{\text{Maa}}^2} = 3{,}5375; \qquad \frac{R_{\text{Mars}}^3}{R_{\text{Maa}}^3} = 3{,}5375.$$

**124. Päikese ja planeetide vaheline külgetõmme.** Kepleri seadused kirjeldavad planeetide liikumisi, kuid ei näita, missugused tungid neid tekitavad. Päikese ja planeetide vahelise tungi avastamine kuulub Newtonile.

Arvutades kesktõmbetungi planeedi liikumisel ümber Päikese, leidis Newton, et *tung, millega Päike tõmbab planeeti, on võrdeline Päikese ja planeedi masside korrutisega ja pöördvõrdeline nende kauguse ruuduga* (misjuures kerakujuliste masside kauguste all tuleb mõelda nende keskpunktide kaugust; teiste sõnadega — nende arvutamiste juures tuleb võtta kerakujulise keha massi koondatuna ühte punkti).

Kuna samad seadused on kehtivad ka kaaslaste kohta, siis planeetide ja kaaslaste vahel ja üldse kahe taevakeha vahel mõjuvad tungid, mis on võrdelised nende massidega ja pöördvõrdelised nende tsentrite vahelise kauguse ruuduga.

Kui võtta planeetide orbiidid ringjoontena, siis võime pöördvõrdelisust kauguse ruudust leida järgmise lihtsa võtte abil.

Olgu $R_1$ ja $R_2$ kahe planeedi keskmised kaugused Päikeselt; $T_1$ ja $T_2$ — nende tiirlemisperioodid ümber Päikese. Siis tung $F_1$, millega Päike mõjub 1 g massile esimese planeedi tsentris, kesktõmbetungi valemi järgi on:

$$F_1 = \frac{4\pi^2 R_1}{T_1^2}.$$

[1] Planeetide kaugused Päikesest ja tiirlemisperioodid on avaldatud Maa kauguse ja tiirlemisperioodi kaudu.

Teise planeedi 1 g massile mõjuv tung on:

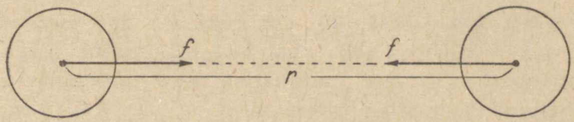
$$F_2 = \frac{4\pi^2 R_2}{T_2^2}, \quad \text{kust} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{4\pi^2 R_1 T_2^2}{T_1^2 \cdot 4\pi^2 R_2^2} \quad \text{ehk} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{T_2^2}{T_1^2},$$

kuid $\frac{T_2^2}{T_1^2}$ on Kepleri kolmanda seaduse järgi võrdne $\frac{R_2^3}{R_1^3}$. Tehes asenduse eelmises avaldises, saame:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2^3}{R_1^3} = \frac{R_2^2}{R_1^2}.$$

See võrdus väljendab tungi ja kauguse ruudu pöördvõrdelisust.

Selle gravitatsiooni-seaduse põhjal tehakse kõik taevakehade liikumiste arvutamised ja need langevad suure täpsusega ühte vaatlustega. Ei tule unustada, et mehaanika kolmanda seaduse järgi mõjuvad mõlemale kehale tungid, mis on võrdsed ja vastassuunalised.




Joon. 181. Massiosakeste tõmbumine.

**125. Kuu tõmme Maa poolt.** Kuu on Maa satelliit (kaaslane). Maa osutub kahe tungi allikaks: 1) Kuu tõmme Maa poolt; 2) raskustungid ehk maapealsete kehade tõmme Maa poole. Loomulikult tekib küsimus: kas need tungid on ühest või erinevaist liikidest? Esimene tung muutub pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga. Kas kehtib sama seadus ka teise tungi kohta?

Selle küsimuse lahendamiseks Newton oletas, et raskustung muutub samuti pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga. Ta arvutas raskustungi suuruse Kuu kaugusel Maa tsentrist ja võrdles saadud arvu selle kesktõmbetungi suurusega, millega Maa mõjutab Kuud. Mõlemad tungid osutusid võrdseteks.

Sel teel tegi Newton kindlaks, et Kuu tõmme Maa poolt ja maapealne raskus on identsed.

***Iga maapealse keha raskustung on võrdeline Maa ja keha masside korrutisega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga*** [1].

Tunge võib järgmiselt võrrelda. Maa pinnal, s. o. Maa raadiuse $R$ kaugusel tsentrist, massi iga gramm tõmbub Maa poole tungiga 980 düüni (keskmiselt). Kui see gramm viia Kuu kaugusele, mis on 60 korda suurem Maa raadiusest (täpsemalt 60,3 $R$), siis sellisel kaugusel Maa tõmbetung $F$ oleks $60^2$ korda väiksem, kui tungi vähenemine toimuks Newtoni sama seaduse järgi, siis

$$F = \frac{980}{60^2} = 0{,}27 \text{ düüni.}$$

Teiselt poolt, kuu tõmme Maa poolt arvutatakse kesktõmbetungi valemi järgi 1 g massi jaoks:

$$F = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

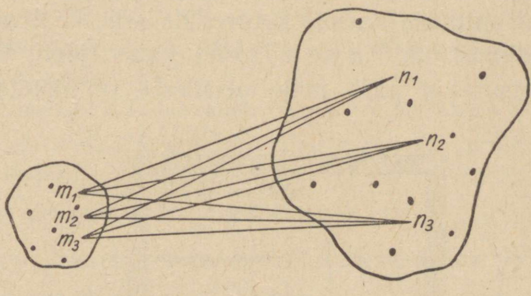
kus $R = 384\,400$ km $= 3844 \cdot 10^7$ cm, aga $T = 27$ ööpäeva 7 tundi 43 min. 11 sek. $= 2\,360\,591$ sek., kust $F = 0{,}27$ düüni. Seega, kui oletame, et maapealse raskuse muutumine on samasugune kui taevakehade-vahelise külgetõmbetungi muutumine, siis Kuu peal mõlemad tungid on väljendatud ühe ja sama arvuga. Sellega on kindlaks tehtud nende tungide identsus ehk samasus.

**126. Üldine gravitatsiooniseadus.** Kuna üks ja sama tung mõjub päikesesüsteemi kehade vahel, Maa ja iga aineosakese vahel, siis Newton tuli järeldusele, et tõmbetungid tekivad kõigi aineosakeste vahel. Tema poolt antud seadus kannab üldise tõmbe- ehk gravitatsiooniseaduse nime ja väljendub järgmiselt:

**Kaks masspunkti tõmbuvad teineteise poole tungiga, mis on võrdeline nende massidega ja pöördvõrdeline nende kauguse ruuduga (joon. 181).**

[1] Oletame, et kehal on kera kuju. Siis Maa ja kera vahelise kauguse all mõeldakse nende tsentrite vahelist kaugust.

Maa ja keha või mingi kahe taevakeha vaheline vastastikune mõju on nende kehade aineosakeste vaheliste tungide resultant (joon. 182). Mõlemad vastastikuse mõju tungid kahe keha juures on omavahel suuruselt võrdsed, vastassuunalised ja rakendatud kahesse eri kehasse.




Joon. 182. Kahe keha vastastikune mõju.

Üldise gravitatsiooniseaduse võime anda järgmise valemiga, kui tähistada $F$-ga masside $m_1$ ja $m_2$ vahelist tõmbetungi kaugusel $r$:

$$\boxed{F = f\,\frac{m_1 m_2}{r^2}.} \qquad \text{(XXXII)}$$

Koefitsient $f$ kannab Newtoni gravitatsiooni konstandi nime [1].

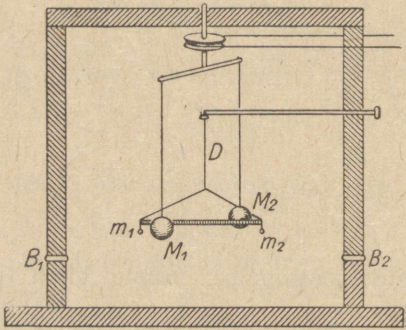
Kui massid $m_1 = m_2 = 1$ g, aga $r = 1$ cm, siis $F = f$. Siit järgneb, et $f$ on arvuliselt võrdne tungiga, millega teineteist tõmbavad kaks kera massiga 1 g, kui nende tsentrite vaheline

[1] Üleliidulise standardi OCT 6203 järgi.

kaugus on 1 cm. Tänapäeva mõõtmised annavad $f$-i suurusena $6{,}67 \cdot 10^{-8}$ ehk ligikaudu

$$\frac{1}{15\,000\,000}\ \frac{\mathrm{dn} \cdot \mathrm{cm}^2}{\mathrm{g}^2}\,^{1}.$$

**127. Üldise gravitatsiooniseaduse katseline kontroll.** Peale üldise gravitatsiooniseaduse kehtivuse kinnitamist astronoomilisel teel tehti mitmeid katseid kontrollida selle kehtivust katseliselt. Üks esimesi oli C a v e n d i s h i katse (joon. 183). Niidi $D$ otsa oli riputatud varb, mille otsadesse oli kinnitatud kaks




Joon. 183. Cavendishi katse.

väikest tinakuuli $m_1$ ja $m_2$. Siis ühe kuuli ette ja teise taha asetati kaks ühesugust suurt tinakera $M_1$ ja $M_2$ ning varb hakkas pöörduma ja pöördus, kuni kerade külgetõmbetung tasakaalustus niidi keerdumistungiga. Viimast tungi arvutati varva pöördenurga järgi, aga nurka ennast niidi külge kinnitatud peeglikese kujutise (heleda laigu) kaldumise suuruse järgi.

---

[1] Newtoni gravitatsiooni konstandi nimetuse võime saada **võrdu**sest $f = \frac{Fr^2}{m^2}$; $f$ avaldub $\frac{\mathrm{dn} \cdot \mathrm{cm}^2}{g^2}$ ehk $\frac{\mathrm{cm}^3}{g \cdot \mathrm{sek}^2}$.

Kerade vastastikune mõju arvutati valemi järgi ja seda võrreldi niidi keerdumistungiga. Muutes kerade kaugust ja masside suurust, võime kontrollida kõiki valemi osi ja leida $f$ suurust.

**128. Gravitatsiooniväli.** Ruumi, milles avaldub mingi massi külgetõmme, nimetatakse selle massi gravitatsiooniväljaks. Nii võime rääkida Päikese gravitatsiooniväljast, Maa gravitatsiooniväljast jne.

Iga gravitatsioonivälja iseloomustab eriline suurus, mida nimetatakse välja tugevuseks.

*Välja tugevust mõõdab ühele massiühikule mõjuv tõmme.*

Kuna iga keha külgetõmme Maa gravitatsiooniväljas väljendub selle keha kaaluga $P = mg$, siis maavälja tugevuse saame, kui võtame raskustungi ühe massiühiku kohta. Siis tugevus $\Pi = \frac{P}{m}$ ehk $\Pi = g$.

Järelikult maavälja tugevus on arvuliselt võrdne vaba langemise kiirendusega; ta väljendub $\frac{\text{düün}}{\text{gramm}}$-des.

**129. Raskustungi muutumine Maa peal.** Kuna Maa ei ole kera, vaid poolustelt kokkusurutud, ja tema pooluse-raadius ($R_p$ = 6357 km) on väiksem ekvaatori raadiusest ($R_e$ = 6378 km), siis ka külgetõmme ekvaatoril peab olema väiksem kui poolusel, pöördvõrdelisuse tõttu kauguse ruuduga. Sel põhjusel väheneb keha kaal pooluselt ekvaatorile.

Teiseks raskuskiirenduse muutumise põhjuseks on Maa pöörlemine telje ümber.

Poolusel on kesktõmbetung 0. Ekvaatoril on 1 g-le mõjuv kesktõmbetung võrdne

$$F_e = \frac{4\pi^2 \cdot 1 \cdot R_e}{T^2}.$$

Kui asendada $R_e$ = 6378 km = $6378 \cdot 10^5$ cm ja $T$ = 24 tundi = = $24 \cdot 3600$ sek., siis saame $F_e$ = 3,4 düüni.

See kesktõmbetung tekib Maa külgetõmbe arvel.

Kui ei oleks Maa pöörlemist, siis oleks vaba langemise kiirendus ekvaatoril arvuliselt võrdne eespool toodud arvuga (981 cm/sek$^2$) ja 1 g massi tõmbuks tungiga $\approx$ 981 düüni.

Seega **mõlemast põhjusest — Maa kujust ja selle ööpäevasest pöörlemisest tingituna keha kaal väheneb pooluselt ekvaatorile.**

$g$ väärtus Maa mitmesugustes punktides:

| | | | |
|---|---|---|---|
| ekvaator | 978,05 | Moskva ($\varphi = 55° 45'$) | 981,56 |
| $\varphi = 45°$ | 980,62 | poolus ($\varphi = 90°$) | 983,24 |

## *KONTROLLKÜSIMUSI.*

1) Milles seisab Newtoni gravitatsiooniseadus ja missugune on ta valem?

2) Kuidas muutub raskustung Maakera pinnal geograafilise laiuse muutudes?

3) Kuidas muutub raskustung kõrgusega Maakera pinnast?

4) Missugune katse kinnitab üldist gravitatsiooniseadust?

5) Mida nimetatakse Newtoni gravitatsiooni konstandiks ja kuidas seda mõõdetakse?

Tabel I. **Keskmised kiirused.**

| | | |
|---|---|---|
| Jalakäija | 1,5 | m/sek |
| Jalgrattur | 5 | „ |
| Hobuse galopp | 8 | „ |
| Kaubarong | 10 | „ |
| Kõva tuul | 10 | „ |
| Ristleja | 14,6 | „ |
| Miinilaev | 17,5 | „ |
| Sulgpilved | 20 | „ |
| Torm | 25 | „ |
| Auto | 30 | „ |
| Kiirrong | 33 | „ |
| Orkaan | 40 | „ |
| Pääsuke | 67 | „ |
| Võidusõiduauto kuni | 130 | „ |
| Lennuk . . . . kuni | 300 | „ |
| Hääl 0° juures | 332 | „ |
| Hääl 15° „ | 340 | „ |
| Maakera ekvaatori punkt ööpäevases pöörlemises | 465 | m/sek |
| Välikahuri mürsk torust väljumisel | 800 | „ |
| Kuul väljumisel | 880 | „ |
| Kuu liikumine orbiiti mööda | 1000 | „ |
| Kaugelaskekahuri mürsk väljumisel | 1600 | „ |
| Päikese ekvaatori punkt pöörlemisel ümber telje | 2000 | „ |
| Päikese liikumine maailmaruumis | 20 | km/sek |
| Maa liikumine ümber Päikese | 29,8 | „ |
| Mõnede tähtede liikumine | 150 | „ |
| Valgus | 300 000 | „ |

Tabel II. **Mitmesuguste süsteemide mehaanilised ühikud.**

| Nr. | Suuruse nimetus | CGS-süsteem | Tehniline süsteem |
|---|---|---|---|
| 1 | Pikkus | **cm** | **m** |
| 2 | Mass | **g** | kG sek$^2$/m |
| 3 | Aeg | **sek** | **sek** |
| 4 | Kiirus | cm/sek | m/sek |
| 5 | Kiirendus | cm/sek$^2$ | m/sek$^2$ |
| 6 | Tung | dn | **kG** |
| 7 | Töö ja energia | erg | kGm |
| 8 | Võimsus | gcm$^2$/sek$^3$ | kGm/sek<br>75 kGm/sek = 1 HJ |

Rasvase trükiga on märgitud põhiühikud.

## Tabel III. Hõõrdumiskoefitsiendid.

Liugumise hõõrdumine.

| | |
|---|---|
| Pronks pronksil | 0,20 |
| Pronks malmil | 0,21 |
| Raud raual | 0,14 |
| Raud malmil | 0,18 |
| Malm tammel (piki kiudusid) | 0,49 |
| Tamm tammel (piki) | 0,48 |
| Nahkrihm tammel | 0,27 |
| Nahkrihm malmil | 0,56 |
| Teras jääl | 0,014 |
| Puust jalased jääl | 0,035 |
| Raudjalased | 0,02 |

Veoki hõõrdumine.

| | |
|---|---|
| Rööpad | 0,003 |
| Asfalttee | 0,010 |
| Hea kivitee | 0,016 |
| Munakivitee | 0,02—0,03 |
| Kivitamata tee | 0,08—0,16 |
| Liiv | 0,15—0,30 |

## Tabel IV. Tihedus $\left(\frac{g}{cm^3}\text{ ehk }\frac{T}{m^3}\right)$.

Tahked kehad
(keskmised väärtused).

| | |
|---|---|
| Alumiinium | 2,58 |
| Grafiit | 2,10 |
| Gutapertš | 0,97 |
| Hõbe | 10,5 |
| Inglistina (valatud) | 7,2 |
| Klaas (pudeli) | 2,7 |
| Kork | 0,24 |
| Kuld | 19,3 |
| Malm | 7,00 |
| Marmor | 2,70 |
| Nikkel | 8,80 |
| Parafiin | 0,9 |
| Plaatina | 21,5 |
| Raud | 7,86 |
| Savi (kuiv) | 1,38 |
| Seatina | 11,4 |
| Steariin | 0,97 |
| Teras (valatud) | 7,86 |
| Tellis | 1,8 |
| Tsink | 7,05 |
| Vaha | 0,97 |
| Valgevask | 8,45 |
| Vask | 8,92 |

Vedelikud

(1 at rõhu ja $t = 15°$ juures).

| | |
|---|---|
| Eeter | 0,72 |
| Elavhõbe | 13,6 |
| Oliiviõli | 0,92 |
| Petrool | 0,79—0,82 |
| Piiritus (etüül) | 0,79 |
| Soolhape (40%) | 1,2 |
| Vesi (4° juures) | 1 |
| Väävelhape (50%) | 1,40 |

Gaasid

(normaalse rõhu ja $t = 0°$ juures)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Hapnik | 0,001429 | Süsiniku oksüüd | 0,001250 |
| Heelium | 0,000180 | Süsihapu gaas | 0,001977 |
| Kloor | 0,003214 | Vesinik | 0,000090 |
| Lämmastik | 0,001251 | Õhk | 0,001293 |

# Sisukord.

## Üldine sissejuhatus füüsikasse.

## Mehaanika.

### Sissejuhatus mehaanika osasse.


| | | |
|---|---|---|
| | | Lk. |
| 1. | Mehaaniline liikumine | 5 |
| 1-a. | Mehaanika jaotus | 5 |
| 2. | Mehaanilise liikumise suhtelisus | 6 |
| 3. | Suhteline paigalolek | 7 |
| 4. | Masspunkt | 7 |


## I. Kinemaatika ja dünaamika sirgjoonelises liikumises.

### 1. Sirgjoonelise liikumise lihtsamad liigid.


| | | |
|---|---|---|
| 5. | Punkti liikumise trajektor ja liikumiste liigitus trajektori järgi | 9 |
| 6. | Tee, aeg, kiirus ja liikumiste liigitus kiiruse järgi | 9 |
| 7. | Ühtlane sirgjooneline liikumine | 11 |
| 8. | Ühtlase liikumise kiirus | 12 |
| 9. | Kiiruse ühikud | 12 |
| 10. | Ühtlase liikumise võrrand | 13 |
| 11. | Keha translatoorne liikumine | 13 |
| 11-a. | Ülesannete lahendamine ühtlase liikumise kohta | 14 |
| | *Harjutus 1* | 15 |
| 12. | Kiirus — vektor | 16 |
| 13. | Ühtlase liikumise tee ja kiiruse graafikud | 17 |
| | *Harjutus 2* | 21 |
| 14. | Mitteühtlane liikumine | 22 |
| 15. | Mitteühtlase liikumise keskmine kiirus ja kiirus antud punktis | 22 |
| 16. | Kiirendus | 23 |

| | | Lk. |
|---|---|---|
| 17. | Kiirenduse ühikud | 25 |
| | *Harjutus 3* | 26 |
| 18. | Ühtlaselt kiirenev liikumine | 26 |
| 19. | Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse ja tee graafikud | 28 |
| 20. | Ühtlaselt kiireneva liikumise lõppkiiruse ja läbikäidud tee vaheline seos kui $v_0 = 0$ | 30 |
| 21. | Ühtlasel kiireneval liikumisel üksteisele järgnevates sekundites läbitud teed, kui algkiirus on $v_0 = 0$ | 31 |
| 21-a. | Ühtlaselt muutuv liikumine, millel on algkiirus | 33 |
| 22. | Algkiirusega ühtlaselt muutuva liikumise kiiruse graafik | 35 |
| 22-a. | Ühtlaselt muutuva liikumise teepikkuse võrrandi teine tuletamise viis | 37 |
| 22-b. | Mistahes algkiirusega ühtlaselt muutuva liikumise ülesannete lahendamine | 38 |
| | *Harjutus 4* | 39 |
| | *Kontrollküsimusi* | 41 |


## 2. Newtoni liikumise seadused.

| | | |
|---|---|---|
| 23. | Mehaanika arenemine | 42 |
| 23-a. | Mehaanika põhiülesanne | 43 |
| 24. | Esimene mehaanika seadus | 44 |
| | *Harjutus 4-a* | 48 |
| 25. | Tung | 48 |
| 25-a. | Looduses on olemas ainult kehade vastastikune mõjutus | 49 |
| 26. | Tungi ja kiirenduse vaheline olenevus | 50 |
| 26-a. | Keha massi mõiste | 53 |
| 27. | Mehaanika teine seadus | 55 |
| 28. | Tungi kestev ja momentaanne mõju | 57 |
| | *Harjutus 4-b* | 59 |
| 29. | Mehaanika kolmas seadus | 60 |
| 29-a. | Mehaanika kolmas seadus tehnikas | 65 |
| | *Harjutus 5* | 68 |
| | *Kontrollküsimusi* | 69 |
| 30. | Keha vaba langemine | 70 |
| 31. | Kõikide kehade vabalangemise kiirendused on ühesuurused | 73 |
| | *Harjutus 6* | 74 |
| 32. | Keha kaalu avaldamine massi ja kiirenduse kaudu | 75 |
| 33. | Masside võrdlemise viis | 75 |
| 34. | Massi ühikud | 76 |

Lk.
35. Aine tihedus . . . . . . . . . . . . . 77
36. Tungi dünaamiline ühik . . . . . . . . . . 77
37. Kilogramm-tungi ja düüni vaheline seos . . . . . . . 78
38. Ühikute süsteem CGS . . . . . . . . . . . 78
39. Tehniline ühikute süsteem . . . . . . . . . . 79
*Harjutus 6-a* . . . . . . . . . . . . . 82
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . . 85

### 3. Liikumiste liitmine.

40. Tungi mõju olenematus kehaliikumise olekust . . . . 86
41. Kahe ühtlase sirgjoonelise liikumise tee liitmine . . . 86
42. Kiiruste liitmine . . . . . . . . . . . . 91
43. Kiiruse lahutamine kaheks komponendiks . . . . . 91
*Harjutus 7* . . . . . . . . . . . . . 94
44. Vertikaalselt ülesvisatud keha liikumine . . . . . . 95
45. Horisontaalselt visatud keha liikumine . . . . . . 96
46. Kaldu horisondiga visatud keha liikumine . . . . . 97
47. Ballistiline kõverjoon . . . . . . . . . . 99
48. *Laboratoorne töö 1* . . . . . . . . . . . 101
*Harjutus 8* . . . . . . . . . . . . . 102
49. Kiirenduste liitmine . . . . . . . . . . . 103
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . . 104

### 4. Mehaaniline energia.

50. Töö mõiste . . . . . . . . . . . . . 105
51. Töö mõõtmine . . . . . . . . . . . . . 107
52. Töö ühikud . . . . . . . . . . . . . 108
53. Mitmesuguste süsteemide tööühikute vahelised seosed . . 109
54. Võimsus . . . . . . . . . . . . . . 109
55. Võimsuse ühikud . . . . . . . . . . . . 110
56. Energia . . . . . . . . . . . . . . 112
57. Kineetilise energia valem . . . . . . . . . . 113
57-a. Kineetilise energia ja töö vahelise seose tuletamine juhu jaoks, kui keha liigub mingi algkiirusega . . . 115
*Harjutus 9* . . . . . . . . . . . . . 118
58. Potentsiaalne energia . . . . . . . . . . . 119
59. Energia jäävuse seadus . . . . . . . . . . 122
*Harjutus 10* . . . . . . . . . . . . . 126
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . . 128

## II. Staatika.

### 1. Tungide liitmine ja lahutamine.


Lk.

60. Tungi kolm tunnust . . . . . . . . . . . 129
60-a. Tasakaalustuvad tungid . . . . . . . . . . . 130
61. Tungi rakenduspunkti ülekanne kõvas kehas . . . . . 131
62. Resultanttung . . . . . . . . . . . . . 132
63. Ühel sirgel ja ühes suunas mõjuvate tungide liitmine . . 132
64. Ühel sirgel ja vastassuunaliselt mõjuvate tungide liitmine 133
65. Kehale nurga all mõjuva kahe tungi liitmine (tungide parallelogramm) . . . . . . . . . . . . 134
66. Keha kahte punkti rakendatud kahe tungi liitmine . . . 138
67. Keha peale mõjuva mitme tungi liitmine . . . . . . 139
*Harjutus 11* . . . . . . . . . . . . . 139
68. Tungi lahutamine komponentideks . . . . . . . . 140
*Harjutus 12* . . . . . . . . . . . . . 146
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . . 149
69. Ühesuunaliste paralleelsete tungide liitmine . . . . . 149
70. Paralleelsete tungide keskpunkt . . . . . . . . . 153
71. Tungi lahutamine kaheks paralleelseks komponendiks . . 154
72. Kahe paralleelse ja vastassuunalise tungi liitmine . . . 155
73. Tungipaar . . . . . . . . . . . . . . 157
*Harjutus 13* . . . . . . . . . . . . . 159


### 2. Keha raskuspunkt ja asendi stabiilsus.


74. Keha raskuspunkt . . . . . . . . . . . . 160
75. Lihtsama geomeetrilise kujuga kehade raskuspunkti määramine . . . . . . . . . . . . . . 160
*Harjutus 14* . . . . . . . . . . . . . 162
76. Toetuspunkti- või telge evivate kehade stabiilsus . . . 164
77. Toetuspinda evivate kehade stabiilsus . . . . . . . 166
77-a. Potentsiaalse energia miinimum kui keha asendi stabiilsuse tingimus . . . . . . . . . . . . 169
78. Toe vastumõju . . . . . . . . . . . . . 170
*Harjutus 15.* . . . . . . . . . . . . . 171


### 3. Tungi momendi mõiste.


79. Tungi mõju telje ümber pöörlevasse kehasse . . . . . 171
80. *Laboratoorne töö 2* . . . . . . . . . . 174
81. Tungide tasakaalu üldine tingimus . . . . . . . 175

4. T u n g i d e t a s a k a a l u t i n g i m u s e d j a l i h t s a t e m a s i n a t e t ö ö s e a d u s.


| | | Lk. |
|---|---|---|
| 82. | Tööriist, mehhanism, masin | 177 |
| 83. | Hõõrdumine ja selle tekkimine | 179 |
| 83-a. | Hõõrdumise liigid | 180 |
| 83-b. | Hõõrdumisseadused | 181 |
| 83-c. | Hõõrdumise tähtsus looduses ja tehnikas | 185 |
| 83-d. | Kahjuliku hõõrdumise vähendamise ja kasuliku suurendamise viisid | 185 |
| | *Harjutus 15* | 187 |
| | *Kontrollküsimusi* | 188 |
| 84. | Tungi töö koormuse tõstmisel kaldpinda mööda | 189 |
| 85. | Raskustungi ületamiseks tehtav töö, kui keha viiakse ühest horisontaalasendist teise | 190 |
| 86. | Kasutegur | 192 |
| 87. | *Laboratoorne töö 3* | 193 |
| | *Harjutus 16* | 195 |
| 88. | Teine viis tungi tasakaalustamiseks kaldpinnal | 196 |
| 89. | Kiil | 197 |
| 90. | Kruvi | 200 |
| | *Harjutus 17* | 203 |
| 91. | Plokk | 204 |
| 92. | Liitplokk | 207 |
| 93. | Pöör | 209 |
| | *Harjutus 18* | 211 |
| 94. | Kang | 213 |
| | *Harjutus 19* | 215 |
| 95. | Tööhulga jäävuse seadus masinate juures | 216 |
| | *Kontrollküsimusi* | 218 |


**III. Hüdro-aeromehaanika.**


| | | |
|---|---|---|
| 96. | Vedelikkude kokkusurutavus | 219 |
| 96-a. | Rõhumise edasiandumine vedelikkudes ja gaasides | 219 |
| 96-b. | Hüdrauliline press | 221 |
| 97. | Rõhumine vedeliku sees | 224 |
| 98. | Vedeliku nivood ühendatud anumates | 228 |
| 99. | Vedeliku mõju vedelikku asetatud kehasse | 228 |
| 100. | Kehade ujumine vedeliku pinnal | 230 |
| 101. | Erikaalu määramine Archimedese seaduse põhjal | 231 |
| 102. | Areomeeter | 232 |
| 103. | *Laboratoorne töö 4* | 233 |

Lk.
104. *Laboratoorne töö 5* . . . . . . . . . . . . . 235
105. Õhu rõhumine . . . . . . . . . . . . . 236
106. Baromeetrid . . . . . . . . . . . . . 238
107. Altimeeter . . . . . . . . . . . . . 240
107-a. Atmosfääri ehitus . . . . . . . . . . . . 241
108. Manomeetrid . . . . . . . . . . . . . 243
*Harjutus 20* . . . . . . . . . . . . . 245
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . 248
109. Vedelikkude ja gaaside sisehõõrdumine . . . . . . . 249
110. Keerised liikuvas vedelikus ja gaasis . . . . . . . . 250
110-a. Gaasi ja vedeliku takistus liikuvale kehale . . . . 251
111. Voolukiiruse ja rõhu vaheline seos . . . . . . . . 253
112. Voolu kiirusest oleneva rõhu tehniline rakendamine . . 258

## IV. Pöörlev liikumine.

113. Ühtlane ringliikumine . . . . . . . . . . . 263
114. Kõverjoonelise liikumise kiiruse suund . . . . . . 264
115. Pöörlemise periood, pöörete või tiirude arv ja joonkiirus . 265
116. Nurkkiirus . . . . . . . . . . . . . 266
117. Kesktõmbe kiirendus . . . . . . . . . . . 267
118. Kesktõmbe- ja kesktõrjetung . . . . . . . . . 270
*Harjutus 21* . . . . . . . . . . . . . 276
119. Pöörlemise inertsiga seletatavaid nähtusi; tsentrifugaalmehhanismid . . . . . . . . . . . . . 276
*Harjutus 22* . . . . . . . . . . . . . 289
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . 291

## V. Üldine gravitatsiooniseadus.

120. Taevakehade liikumise uurimine enne Kopernikust . . . 292
121. Maailma ehitus Kopernikuse järgi . . . . . . . . 293
122. Uue maailmavaate võitlus kiriku autoriteediga . . . . 294
123. Kepleri seadus . . . . . . . . . . . . 295
124. Päikese ja planeetide vaheline külgetõmme . . . . 296
125. Kuu tõmme Maa poolt . . . . . . . . . . . 297
126. Üldine gravitatsiooniseadus . . . . . . . . . 298
127. Üldise gravitatsiooniseaduse katseline kontroll . . . . 300
128. Gravitatsioonivali . . . . . . . . . . . . 301
129. Raskustungi muutumine Maa peal . . . . . . . . 301
*Kontrollküsimusi* . . . . . . . . . . . 302
*Lisad* . . . . . . . . . . . . . . . 303

Tõlkinud M. Usai.
Vastutav toimetaja R. Kalling.
Keeleline toimetaja J. Pedari.

Ladumisele antud 7. VII 1948. Trükkimisele antud 22. IX 1948. Trükiarv 5000. Paber 56×79, $^{1}/_{16}$. Trükipoognaid $11^{5}/_{8}$. Trükitähti trükipoognas 36 875. Arvutuspoognaid 10,6. MB 07685. Trükikoda „Noor-Eesti“, Tartu, Kastani 38. Tellimise nr. 714.

На эстонском языке.

И. И. Соколов. Курс физики. Часть I. 2-я тетрадь. Механика.
Учебник для VIII класса.

Rbl. 3.50