

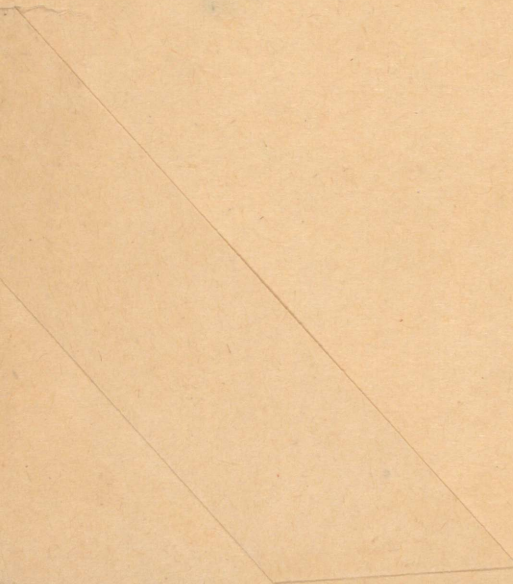
FÜÜSIKA PRAKTIKUMI

tööjuhendid

I

Tallinn 1970

ARVA



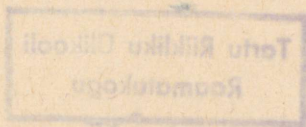
A-30602 "

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT

Füüsika kateeder

FÜÜSIKA PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID

I



7-808
102000

ARHIIVKOGU

Tallinn
1970

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра физики

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ФИЗИКЕ I

На эстонском языке

Коостajad: M. Jaagus
T. Ruus
Ü. Uder

Heaks kiidetud kateedri koosolekul
20. nov. 1969. a.

ARHIIVKOGU

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

76806
109066

Vastutav toimetaja G. Peets

Trükkimisele antud 20.III 1970. Paber 60x84/16.
Trükipg. 8,75. Tingpg. 8,13. Tiraaz 1500. MB- 03428.
TPI rotaprint, Tallinn, Koskla 2/9. Tell. 133

Hind 24 kop.

Eessõna

Põhiliseks eestikeelseks Tallinna Polütehnilises Instituudis kasutatavaks praktikumi tööjuhendite koguks oli J. Langi, G. Metsa ja A. Pae "Füüsika praktikum", Tallinn, 1960. Selle trükk on aga juba rida aastaid otsas. Pealegi esineb nendes juhendites rida puudusi: kogumikus puuduvad viimastel aastatel praktikumides üles seatud tööde juhendiä sageli on kasutatud mittesüsteemseid ühikuid, esineb sisulisi puudusi jms.

Nende asjaolude tõttu oli vaja seni kasutusel olnud juhendeid põhjalikult ümber töötada, täiendada uute juhenditega ning anda välja nii eesti kui ka vene keeles. Töösse lülitusid praktiliselt kõik kateedri õppejõud. Konkreetse tööjuhendi ümbertöötaja või koostaja nimi on näidatud sisukorras.

Praktikumi tööjuhendite I osa sisaldab mehaanika ja molekulaarfüüsika alaseid töid.

Töökord füüsika praktikumides

1. Töö praktikumis toimub tunniplaani alusel. Konkreetsete tööd üliõpilastele planeerib praktikumi juhendaja. Üliõpilane on kohustatud juhendaja juures hiljemalt eelmises praktikumis välja selgitama järgmise töö ja selle vastavalt ette valmistama. Ettenähtud ajal tegemata jäänud töö sooritatakse semestri lõpul.

2. Tööle lubatakse üliõpilased, kes on vastavaks laboratoorseks tööks teoreetiliselt ette valmistunud ning esitavad teostatava töö protokoll.

3. Laboratoorse töö protokoll koosneb järgmistest osadest:

- 1) tiitelleht;
- 2) töö teoreetilised alused;
- 3) töö käik;
- 4) katseandmete tabelid;
- 5) arvutused koos veaarvutusega;
- 6) järeldus.

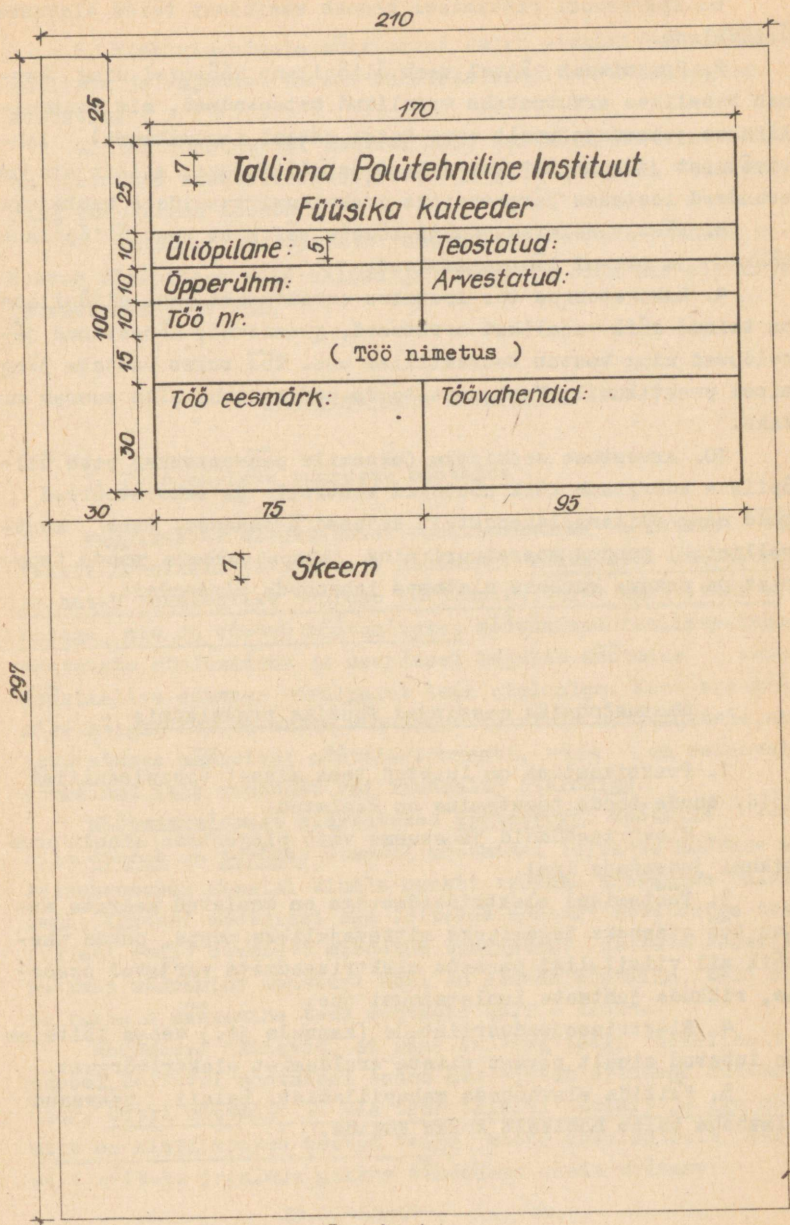
Tiitelleht kujundatakse standardkirjas vastavalt näidisele (joon.1). Töö protokoll kirjutatakse tindiga paberile formaadis 11 (297x210 mm). Katseskeemid ja muud joonised peavad olema korrektsed ning vastavuses üldkasutatavate tingmärkidega.

Katseandmed esitatakse tabelitena. Eksimuse korral kriipsutatakse ebaõige arv läbi nii, et teda võib vajaduse korral taastada. Õige arv kirjutatakse läbikriipsutatud arvu kõrvale.

Järelduses olgu antud hinnang katse tulemuste kohta ja vigade analüüs.

4. Üliõpilasi, kes ei ole laboratoorseks tööks ette valmistunud, ei lubata tööd alustada.

5. Koostatud skeemi ja aparatuuri võib tööle rakendada ainult juhendaja loaga. Kuni selle loa saamiseni peavad elektroseadmed olema voolusallikaga ühendamata.



Joonis 1.

6. Aparatuuri rikkumisel kannab vastutust täies ulatuses üliõpilane.

7. Praktikumil vältel teeb üliõpilane mõõtmisi ning kannab tabelisse arvutusteks vajalikud katseandmed, mis kontrollitakse juhendaja poolt enne katse skeemi (aparatuuri) lah-tivõtmist ja kinnitatakse juhendaja allkirjaga. Allkirjata katseandmed loetakse järgnevateks praktikumi tundideks kehtetuks.

8. Pärast eelmise punkti nõuete täitmist seab üliõpilane töökohta ja skeemi lähteseisukorda.

9. Laboratoorne töö loetakse arvestatuks, kui üliõpilane on teinud kõik vajalikud arvütused, graafikud, sõnastanud järeldused ning vastab teoreetilise osa. Töö tuleb vastata järg-misel praktikumil. Vastamata tööde arv ei tohi olla suurem kui kaks.

10. Arvestuse saamiseks (eksamile pääsemiseks) peab üliõpilane sooritama kõik nõutavad kontroll- ja laboratoorsed tööd ning esitama lahendatult kodused ülesanded. Peab kontrollimisel tundma aparatuuri ning laboratoorsete tööde teo-riat ja oskama kursuse ulatuses lahendada ülesandeid.

Ohutustehnika eeskirjad füüsika praktikumis

1. Praktikumides on lubatud teha ainult õppeplaani-lisi töid. Muude tööde teostamine on keelatud.

2. Elektriseadmeid ja skeeme võib pingestada ainult prak-tikumi juhendaja loal.

3. Töötamisel elektriseadmetega on keelatud keerata an-tud töö otseseks tegemiseks mittevajalikke nuppe, püüda üks-kõik mil viisil ligi pääseda elektriseadmete varjatud osade-le, rikkuda juhtmete isolatsiooni jne.

4. Elektrisoojendusriistade (kannude jt.) veega täitmine on lubatud ainult pärast riista eraldamist elektrivõrgust.

5. Vältida elavhõbeda mahapillamist. Laiali pääsenud elavhõbe tuleb hoolsalt kokku koguda.

6. Elektriseadmete süttimisel tuleb elektrivool välja lülitada ja vajaduse korral kasutada ainult süsihappegaas-kustutit.

7. Töö lõpetamisel kontrollida, kas kõik elektriseadmed on eraldatud elektrivõrgust, vee- ja gaasikraanid suletud, ning korrastada töökoht.

8. Tutvunud käesolevate ohutustehnika eeskirjadega, kohustub üliõpilane neid täitma ja fikseerib seda oma allkirjaga vastavas päevikus.

MÕÕTMISVIGADE ARVUTAMINE

1. Füüsikaliste suuruste mõõtmine

Füüsikalise eksperimendi põhiülesandeks on ühtede või teiste füüsikaliste suuruste mõõtmine. Mõõtmiseks nimetatakse antud füüsikalise suuruse võrdlemist teise sama liiki suurusega, mis on võetud mõõtühikuks. Mõõtühikud realiseeritakse vastavate etalonidena ja seepärast kujutab mõõtmine antud füüsikalise suuruse võrdlemist tema etaloniga. Kuna aga mõõtmise käigus etalon kulub või allub teistele muudatustele, siis kasutatakse mõõtmisel mõõteinstrumenti, mida on eelnevalt võrreldud (kas otseselt või kaudselt) etaloniga.

Mõõtmistulemust nimetatakse mõõtarvuks. Mõõtmine võib olla otsene ja kaudne. Otsesel mõõtmisel leitakse mõõtarv mõõteinstrumenti skaalal kindla punkti asukoha määramise tulemusena. Kaudsel mõõtmisel aga leitakse mõõtarv arvutamise teel (valemi abil) otseselt mõõdetud suurustest. Näiteks vedeliku ruumala määramine mensuuri abil on otsene mõõtmine, kuid keha ruumala määramine tema mõõtmete abil - kaudne.

Kogemused näitavad, et sama suuruse isegi võimalikult täpsel korduval mõõtmisel saame üksteisest erinevad tulemused. Seega ühtki mõõtmist ei saa teha täiesti täpselt ja iga mõõtmine on alati seotud teatud veaga. Mõõta absoluutselt täpselt näiteks joonlaua pikkus tähendaks saada mõõtarv

25,7246850017..... cm,

milles esineksid numbrid mistahes kohas peale koma (lõpmatult palju kümnendkohti). On selge, et selline mõõtmine on teostatamatu nii praktiliselt (ei ole nii täpselt mõõteriista) kui ka põhimõtteliselt - ühegi joonlaua (ja mitte ainult joonlaua) otspunktid ei ole nii täpselt määratletud.

Absoluutselt täpse tulemuse võime saada ainult loendamisel.

Ükski mõõtjarv ei ole väärtuslik, kui ei ole teada selle viga. Seega mõõtmise ülesandeks ei ole mitte ainult mõõtjarvu leidmine, vaid ka täpsuse (vea) hindamine, millega antud tulemus on saadud.

2. Mõõtmisvead

Mõõtmisvead liigituvad:

- 1) jämedad vead ehk eksitused, 2) süstemaatilised vead, 3) juhuslikud vead.

Jämedad vead ehk eksitused on tingitud valest lugemi võtmisest mõõteriista skaalalt, tulemuse valest üleskirjutamisest jne. Et neid vältida, on tarvis töötada väga tähelepanelikult ja protokollida mõõtmistulemused maksimaalse korralikkusega. Eksitused on tavaliselt hästi tähelepanevad, sest nendele vastavad mõõtjarvud on järsult erinevad teistest mõõtjarvudest, mis on saadud antud eksperimendis.

Süstemaatilisteks nimetatakse vigu, mis on tingitud mõõteriista mittekorrasolekust, mitteõigetest mõõtmisvõtetest, eksperimentaatori vilumatusest jne. Süstemaatilised vead ilmuvad näiteks siis, kui mõõteriista skaala on nihutatud, osuti on paindunud, skaala mastaap on vigane või jaotiste väärtus ei ole õieti määratud; kui elektrilistel mõõtmistel jätame arvestamata ühendusjuhtmete takistuse, rõhu mõõtmisel ei arvesta baromeetri näidu olenevust temperatuurist jne.

Süstemaatilised vead võib jaotada kolme gruppi: 1) vead, mille olemus on meile tuntud ja mille suurused võivad olla küllaldase täpsusega määratavad. Selliseid vigu nimetatakse parandusteks (näiteks temperatuurist olenevad parandused metallmõõdulindile), 2) tuntud päritoluga vead, kuid tundmatute suurustega (näiteks mõõteriista vead, mis antakse mõõte-

riista täpsusklassiga - vea suurus ei ole teada, täpsusklass määrab ära ainult vea ülemmäära), 3) vead, mille olemasolust me ei ole teadlikud, kuigi nad võivad olla üpris suured (näiteks materjali tiheduse määramine eksemplari järgi, milles esineb tühimikke).

Süsteematilistele vigadele on iseloomulik see, et nad on kindla märgiga, s.t. nad mõjustavad mõõtmise tulemust ühes kindlas suunas, seda suurendades või vähendades. Mõõtmiste kordamisel need vead jäävad muutumatuteks või muutuvad kindla seaduspärasuse järgi.

Süsteematilisi vigu võib avastada või vähendada erinevaid mõõteriistu või mõõtmismeetodeid kasutades. Sellisel viisil on mõnikord võimalik muuta süsteematilisi vigu juhuslikeks. Näiteks, kui mõõta antud voolutugevust kümne samasse täpsusklassi kuuluva ampermeetriga, siis üksikmõõtmiste vead ei ole enam sama suuruse ja märgiga.

Juhuslikeks nimetatakse vigu, mille tekkimiseks on palju erinevaid põhjusi. Need vead on aga sellised, mis eksperimendis ei avaldu nii selgelt, et neid võiks märgata ja arvestada. Iga üksikmõõtmise juures mõjuvad need põhjused erinevalt ja seepärast on nendest tingitud vead ühe ja sama füüsikalise suuruse mitmekordsel mõõtmisel (samal meetodil) nii märgilt kui ka suuruselt erinevad. Näiteks kaalumisel on juhuslike vigade põhjuseks õhu liikumine, kaalukausile langev tolmukübe, kaalukangi ebaühtlane soojenemine käe lähendamisel sellele, muutuv hõõrdumine toetuspunktides jne.

Juhuslike vigade põhjusi ei ole võimalik kõrvaldada ja seepärast esinevad igasuguste mõõtmiste juures juhuslikud vead. Neid võib ainult vähendada, kasutades täiuslikumaid mõõteriistu, täpsemaid mõõtmismeetodeid või parandades mõõtmistingimusi.

Juhuslikud vead on tingitud põhjustest, mida ei saa täpselt ette näha. Järelikult ei saa ka ette näha antud üksikmõõtmises tekkinud viga. Ühe või teise juhusliku vea ilmumine on nn. juhuslikeks sündmuseks. Sellised juhuslikud sündmused on käsitletavad ainult tõenäosusteooria seisukohtadelt lähtu-

des. Seepärast tuleb juhuslike vigade hindamisel ka vastavaid seisukohti arvestada.

3. Mõõtarvu absoluutne ja relatiivne (suhteline) viga

Mõõdetava suuruse tõelise väärtuse x ja mõõtmisel saadud mõõtarvu A vahet nimetatakse mõõtarvu absoluutseks tõeliseks veaks α :

$$x - A = \alpha .$$

Kuna mõõdetava suuruse tõeline väärtus on tundmata, siis ei ole võimalik leida ka tõelise vea α suurust. Üksikmõõtmiste analüüs, mõõteriista kohta teada olev täpsus või rea mõõtmisseeriaste tulemuste kriitiline läbitöötamine võimaldavad leida määra, milleni ülimalt võib küündida absoluutne tõeline viga. Absoluutsete tõeliste vigade ülemmäära nimetame mõõtarvu absoluutseks veaks. Mõõtarvu absoluutse vea tähistame

ΔA . See tähendab, et mõõdetava suuruse tõeline väärtus x asub vahemikus

$$A - \Delta A \leq x \leq A + \Delta A .$$

Seda kirjutatakse lühidalt nii:

$$x = A \pm \Delta A .$$

Näiteks $x = (2,74 \pm 0,07)$ cm.

Eespool antud absoluutse vea mõiste määratlust tuleb võtta järgmise reservatsiooniga. Kui on tegemist mõõtmistega, milles juhuslik viga on kaduvväike, võrreldes süstemaatilise veaga (mõõteriista viga jne.), s.t. kui esineb ainult süstemaatiline viga, siis on võimalik leida absoluutsele tõelisele veale (selle annab näiteks mõõteriista täpsusklass) ülemmäär, millest ta suurem olla ei saa. Kui aga juhuslikud vead on ülekaalus või nad on suuruselt võrreldavad süstemaatiliste vigadega, siis sellise täpse ülemmäära leidmine ei ole võimalik. See selgub järgnevast.

Olgu füüsikalist suurust x mõõdetud n korda ja saadud n mõõtarvu:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n .$$

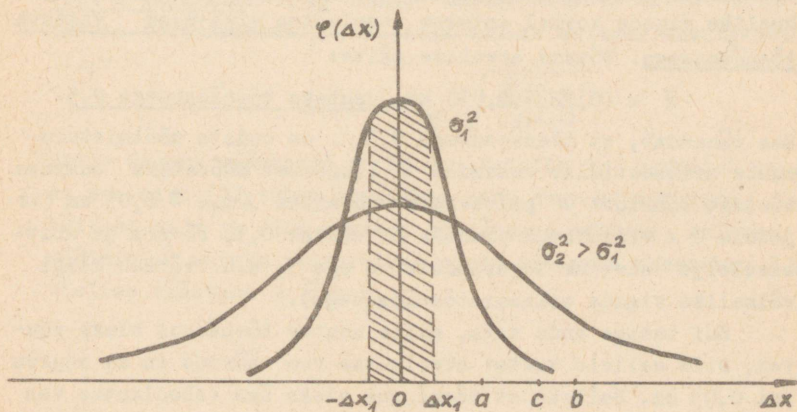
Kui süstemaatilised vead praktiliselt puuduvad, siis suurus

$$\Delta x_1 = x - x_1$$

kujutab endast mõõtmiseeria i-nda mõõtmise juhuslikku viga. Ühe või teise vea tekkimine on juhuslik nähtus. Suuruselt erinevad juhuslikud vead omavad erinevaid esinemistõenäosusi. Mistases mõõtmiseerias esineb ühtesid vigu rohkem kui teisi. Suuremas enamikus füüsikalistes eksperimentides alluvad juhuslikud vead Gaussi normaalsele vigade jaotusseadusele:

$$\varphi(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{\sigma}\right)^2},$$

kus $\varphi(\Delta x)$ on juhuslike vigade jaotusfunktsioon, mis iseloomustab vea Δx esinemistõenäosust, ja σ^2 on mõõtmistulemuste dispersioon - iseloomustab mõõtmistulemuste hajuvust. Viimane on näha jooniselt 2. Mida väiksem on σ^2 , seda väiksem on suurte vigade esinemistõenäosus. Mida suurem on dispersioon, seda rohkem on mõõtmistulemused hajutatud.



Joonis 2.

Toodud juhuslike vigade jaotusseadusest tuleb teha järgmine järeldus. Kui mõõtmiste arv n on väike suurus (5...10), siis mõõtmistulemuste aritmeetiline keskmine

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

mis loetakse tavaliselt mõõtmiste lõppresultaadiks (tõenäolisim väärtus), ei pea isegi ligilähedaselt kokku langema mõõdetava suuruse tõelise väärtusega, mida kujutab joonise 2 abstsissiteljel (kui arvteljel) punkt O . Seda näiteks siis, kui kõik n lugemit on langenud vahemikku a ja b ja keskvaartust \bar{x} kujutab mingi punkt c selles vahemikus - tõenäosusteooria ei eita niisugust võimalust. Muidugi on iseküsimus, kui suur on sellise võimaluse tõenäosus. Aritmeetiline keskmine läheb tõelisele väärtusele seda enam, mida suurem on n .

Järelikult on põhimõtteliselt võimalik kuitahes suure vea tekkimine ja seepärast ei ole mõtet rääkida ka juhuslike vigade ülemmäärast selle sõna otseses tähenduses. Seetõttu juhuslike vigade korral antakse absoluutne viga koos vastava tõenäosusega. Võtame arvulise näite:

$$\bar{x} = (0,72 \pm 0,03) \text{ mm, usutava tõenäosusega } 0,5.$$

See tähendab, et tõenäosusega 0,5 on oodata mõõtmistulemuste aritmeetilise keskmise \bar{x} langemist mõõdetava suuruse tõelist väärtust x piiravasse vahemikku $\Delta x_1 = \pm 0,03$ mm (vt. joonis 2 : viirutatud pindala on võrdne 0,5, kõvera ja abstsissitelje vaheline kogupindala on aga 1, s.o. võrdub kõigi võimalike vigade esinemistõenäosusega).

Kui tahame anda viga, mille usutav tõenäosus oleks suurem, siis sellele vastav absoluutse vea väärtus on ka suurem kui 0,03 mm. Selleks et tõenäosus oleks üks (absoluutse vea ülemäär), tuleb võtta $\Delta x_1 \rightarrow \infty$, sest joonisel 2 kujutatud kõveratel on abstsissitelje suunas lõpmatu ulatus.

Mõõtmisvigade teoorias, mis toetub tõenäosusteooriale, on leitud valemid, mis võimaldavad määrata mistahes usutavaid

tõenäosusi omavaid absoluutse vea väärtusi. Väga suure arvuga n mõõtmiseeria korral nimetatakse absoluutset viga, mille usutav tõenäosus on 0,683, ruutkeskmiseks veaks. Ruutkeskmise viga arvutatakse järgmiselt

$$\Delta x_r = \pm \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

See on aritmeetilise keskmise \bar{x} ruutkeskmise viga. Mõõtmiseeria üksiktulemuse x_i ruutkeskmiseks veaks on

$$\Delta x_r' = \sqrt{n} \cdot \Delta x_r$$

ja selle kaudu on defineeritud ka dispersioon

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} (\Delta x_r')^2.$$

Kui mõõtmiste arv n ei ole suur (teoreetiliselt peaks $n \rightarrow \infty$), siis valemi (2) abil arvutatava vea usutav tõenäosus on ka väiksem kui 0,683. Et väikese n väärtuse korral valemi (2) annaks vea endise usutavuse tõenäosusega, siis tuuakse valemisse parandustegur $t_{n\beta}$. Seda tegurit nimetatakse Student'i teguriks. $t_{n\beta}$ oleneb üksikmõõtmiste arvust n ja usutavuse tõenäosusest β , millega tahame esitada arvutatava vea Δx_r :

$$\Delta x_r = \pm t_{n\beta} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Selle teguri väärtused on toodud tabelis 1. Tabelist on näha, et avaldist (2) tuleb korrutada seda suurema teguriga, mida väiksem on n ja mida suurema tõenäosuse esitame, selleks et mõõtarv \bar{x} satuks leitava vea poolt määratud vahemikku $2 \Delta x_r$ tõelise väärtuse x ümber.

Tabel 1

Student'i teguri $t_{n\beta}$ väärtused

$n \backslash \beta$	0,3	0,5	0,7	0,99
2	0,51	1,00	2,0	63,7
3	0,45	0,82	1,3	9,9
4	0,42	0,77	1,3	5,8
5	0,41	0,74	1,2	4,6
6	0,41	0,73	1,2	4,0
7	0,40	0,72	1,1	3,7
8	0,40	0,71	1,1	3,5
10	0,40	0,70	1,1	3,3

Absoluutse vea iseloomustamiseks kasutatakse ka aritmeetilist keskmist viga:

$$\Delta x_k = \pm \frac{\sum_i |\bar{x} - x_i|}{n} \quad (3)$$

mis on küll lihtsamini arvutatav kui ruutkeskmise viga (2), kuid mille usutavat tõenäosust β ei ole praktikiliselt võimalik määrata ja seepärast saadaval tulemusel ei ole väärtust. Avaldist (3) võib kasutada ainult suurte n väärtuste korral ($n > 30$) ruutkeskmise vea arvutamise lihtsustamise eesmärgil:

$$\Delta x_r = \frac{1,25}{\sqrt{n}} \Delta x_k \quad (4)$$

Tulemusele (4) vastab siis usutav tõenäosus 0,683. Kui tahame suurema usutava tõenäosusega viga leida, tuleb avaldis (4) korrutada Student'i teguriga (siis peab olema käepärast tabel $t_{n\beta}$ jaoks, milles on antud ka suuremad n väärtused).

Lisaks eespoolmainitule kasutatakse absoluutse vea iseloomustamiseks tõenäolist viga, mille usutav tõenäosus on 0,5. Tõenäoline viga arvutatakse ruutkeskmise vea

(mille arvutamisel on arvestatud tegurit $t_{n\beta}$,
 $\beta = 0,683$) kaudu järgmiselt:

$$\Delta x_t = 0,683 \Delta x_r .$$

Kasutades tabelit 1, on siiski võimalik leida juhusliku-
le veale ülemäärana teatud mõttes. Kuna me loeme näiteks töö-
näoause 0,99 praktiliselt võrdseks ühega, siis võime valemi
(2) abil koos parandusteguriga $t_{n\beta}$ ($\beta = 0,99$) leitud vea lu-
geda mõõtarvu \bar{x} absoluutse vea ülemääraks. Tulemusel on
mõtet midugi ainult siis, kui see ei osutu liialt suureks
(mõõtarvu endaga võrreldes), mis võib juhtuda, kui mõõtmistu-
lemuste seerial on suur dispersioon σ^2 .

Absoluutne viga ei iseloomusta mõõtmistäpsust täielikult.
Oletame, et oleme mõõtnud pliatsi pikkust ja töölaua serva
pikkust ühe ja sama absoluutse veaga $\Delta x = 1$ cm. On selge, et
mõõtmised ei ole tehtud ühe ja sama täpsusega, kuigi absoluut-
sed vead on võrdsed. Kaks või enam mõõtmistulemust on saadud
ühesuguse täpsusega, kui nende relatiivsed (suhtelised) vead
on võrdsed.

Relatiivseks veaks nimetatakse mõõtarvu ühiku kohta tule-
vat absoluutset viga:

$$E_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} . \quad (5)$$

4. Süsteemaatilise vea arvutamine otsesel mõõtmisel

Siin vaatleme ainult juhtu, kus ainsa süsteemaatilise vea-
na esineb mõõteriista- ehk instrumendiviga. Juhuslikud vead
olgu kaduvväikesed - korduvatel mõõtmistel saame praktiliselt
ühesugused tulemused või mõõtmistulemused kõiguvad riistavea
piires. Sellisel juhul piisaks ainult ühekordsest mõõtmisest.
Mõõtmistulemuse vea saame siis mõõteriista täpsusklassi arves-
tades.

Elektrimõõteriistadele märgitakse täpsusklass mõõteriista-
ta numbrilauale. Näiteks number 1,0 voltmeetril näitab, et

mõõteriista lugemi absoluutne viga ei ületa 1% skaala lugemi maksimaalväärtusest. Kui viimane on näiteks 150 V, siis mõõteriista lugemi absoluutne viga on $0,01 \cdot 150 = 1,5 \approx 2$ V. Kui osuti jääb pidama lugemile 141 V, siis $x = (141 \pm 2)$ V.

Maksimaalsed vead, mida omavad mõõtejoonlauad, mikromeetrid, varbsirkliid, kaaluvihid, mensuurid, termomeetrid, aja-mõõtjad jne. on mõnikord kantud mõõteriistadele endile, tavaliselt aga antakse riista passis. Kui pass puudub ega ole ka vastavat viidet vea kohta mõõteriista skaalal, mõõteriist aga on tehniliselt korras (on kontrollitud ja kasutamisel ning hoidmisel on kinni peetud vastavatest eksploateerimisreeglitest), siis absoluutse vea ülemmääraks loetakse nn. mõõteriista standardviga, mis võrdub poolega mõõteriista skaala vähima jaotuse väärtusest. Näiteks millimeeterskaala abil saab mõõta standardveaga $\pm 0,5$ mm, $0,5^\circ$ jaotistega termomeetriga $0,25 \approx 0,3^\circ$ täpsusega jne.

Kui mõõtary võetakse mõõteskaala kahele punktile vastavate näitude vahena, siis tuleb ka vastav viga võtta kahekordsena (näiteks pikkuse mõõtmisel joonlaua abil).

Nooniusega varustatud mõõteriistade standardveaks on tavaliselt pool nooniuse täpsusest, s.o. pool mõõteriista väikseima jaotise (või jaotiste) ja nooniuse jaotise pikkuste vahest.

Laboratoorseses töödes esineb sageli varem mõõdetud suurusi, milledele viga ei ole juurde kirjutatud. Sellisel juhul loetakse absoluutseks veaks pool viimase koha ühikust. Näiteks valgusallika tugevus $I = 1,2$ cd tuleb lugeda $I = (1,2 \pm 0,05)$ cd.

5. Süsteemaatilise vea arvutamine kaudsel mõõtmisel

Enamikul juhtudel ei saa füüsikalisi suurusi otseselt mõõta. Tegelikult mõõdetakse rida abisuurusi A, B, C, \dots , mis on seotud otsitava suurusega x vastava matemaatilise seose kaudu:

$$x = f(A, B, C, \dots). \quad (6)$$

Kaudse mõõtmistulemuse viga sõltub mitte ainult otseste mõõtmistulemuste vigadest $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$, vaid ka abisuurustega sooritatavatest matemaatilistest tehetest arvutuseeskirjas (6).

Antud punktis vaatleme juhtu, kus iga suurus $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$ kujutab instrumendi vea ülemmäära. Siis tuleb ka suurusele x leida nendest vigadest tingitud vea ülemmäär Δx . Matemaatilises mõttes tähendab see, et tuleb summeerida kõik funktsiooni x väärtuse muutused, mis on tingitud argumentide A, B, C, \dots väärtuste muutustest $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$. Kui suuruse A suhteline viga $\frac{\Delta A}{A}$ ei ole suur (kuni mõni protsent), siis võib argumenti A muutusest ΔA tingitud funktsiooni x muutuse arvutada osatuletise kaudu järgmiselt:

$$\Delta x_A = \frac{\partial f}{\partial A} \cdot \Delta A \quad (7a)$$

Kõigi argumentide muutustest tingitud funktsiooni muutuse ülemmäära saame, kui leiame summa

$$\Delta x = \left| \frac{\partial f}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial f}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial f}{\partial C} \right| \Delta C + \dots \quad (7)$$

Summa või vahe korral

$$x = A \pm B \pm C \pm \dots$$

saame valemit (7) kasutades

$$\Delta x = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots \quad (8)$$

Kui valem (6) näeb ette ainult korrutamise ja jagamise tehted, kaasa arvatud ka astendamise ja juurimise, siis on kasulikum leida esmalt avaldis relatiivse vea jaoks. Näiteks, kui

$$x = \frac{A \cdot B^2 \cdot \sqrt[3]{C}}{D \cdot E^3 \cdot \sqrt{F}},$$

siis arvutuseeskirja (7) kasutades saame:

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta A}{A} + 2 \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{3} \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D} + 3 \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F} \quad (9)$$

Absoluutse vea arvutame siis seosest $\Delta x = x \cdot E_x$.

Näide

Pooli induktiivsuse ja vahelduvvoolu võimsusteguri määramine.

Mõõtmistulemused olgu esitatud järgmises tabelis:

Mõõdetud suuruse tähis	Väärtus	Mõõtmistäpsus
Efektiivpinge U_e	220 V	Kasutati voltmeetrit mõõtepiirkonnaga 300 V ja täpsusklassiga 1,0. $\Delta U_e = 3 \text{ V}$
Voolutugevuse efektiivväärtus I_e	2,52 A	Kasutati ampermeetrit mõõtepiirkonnaga 3 A ja täpsusklassiga 1,5. $\Delta I_e = 0,045 \text{ A}$
Vahelduvvoolu sagedus f	50,5 Hz	Sagedusmõõtja võimaldas mõõta sageduse diskreetseid väärtusi, mis erinevad üksteisest 0,5 Hz võrra. $\Delta f = 0,25 \text{ Hz}$
Pooli aktiivtakistus R	40,2 Ω	Mõõdeti oommeetri abil mõõtepiirkonnaga 100 Ω ja täpsusklassiga 0,5. $\Delta R = 0,5 \Omega$

Pooli induktiivsus arvutatakse järgmiselt (mahtuvus $C \rightarrow \infty$):

$$L = \frac{1}{2\pi f \cdot I_e} \cdot \sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2};$$

$$L = \frac{1}{2 \cdot 3,142 \cdot 50,5 \cdot 2,52} \cdot \sqrt{(220)^2 - (2,52 \cdot 40,2)^2} = 0,2442.$$

Kuigi valemis esineb suurus π , mille väärtust ei mõõdetud, tuleb selle ligikaudse väärtuse kasutamisest tingitud viga arvutada. Seda viga pole tarvis arvestada juhul, kui väärtus on võetud ühe suurusjärgu võrra täpsemalt kui mõõdetud suuruste väärtused (nii on toimitud ka antud näites). Vea arvutamiseks vajaliku avaldise leidmisel kasutame reeglist (7) tulenevat järeldust, mille järgi korrutamisel ja jagamisel liituvad suhtelised vead:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta I'}{I} + \frac{\Delta(\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2})}{\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}}$$

On tarvis leida veel avaldis juurega tähistatud teguri veale. Kasutades osatuletiste meetodit (7) funktsiooni muutuste leidmiseks, saame:

$$\Delta(\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}) = \frac{1}{2\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}} (2U_e \cdot \Delta U_e + 2I_e R^2 \Delta I_e + 2I_e^2 R \Delta I_e)$$

Asendades saadud avaldise eelmises valemis, saame:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta I'}{I} + \frac{U_e \cdot \Delta U_e + I_e R(R \cdot \Delta I_e + I_e \Delta R)}{U_e^2 - (I_e R)^2}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{0,25}{50,5} + \frac{0,045}{2,52} + \frac{220 \cdot 3 + 2,52 \cdot 40,2(40 \cdot 2 \cdot 0,045 + 2,52 \cdot 0,5)}{220^2 - (2,52 \cdot 40,2)^2} =$$

$$= 0,0482 = 4,8\%$$

$$\Delta L = 0,244 \cdot 0,0482 = 0,0117.$$

Vastus:

$$L = (0,244 \pm 0,012) \text{ H, usutavuse tõenäosusega 1.}$$

Vahelduvvoolu võimsustegur $\cos \varphi$ avaldub mõõdetud suuruste kaudu järgmiselt:

$$\cos \varphi = R \frac{I_e}{U_e};$$

$$\cos \varphi = 40,2 \cdot \frac{2,52}{220} = 0,461;$$

$$\Delta(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi}) = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta I_e}{I_e} + \frac{\Delta U_e}{U_e};$$

$$\frac{\Delta(\cos \varphi)}{\cos \varphi} = \frac{0,5}{40,2} + \frac{0,045}{2,52} + \frac{3}{220} = 0,044 = 4,4\%$$

$$(\cos \varphi) = 0,461 \cdot 0,044 = 0,0202.$$

Vastus:

$$\cos \varphi = 0,461 \pm 0,021, \text{ usutavuse tõenäosusega 1.}$$

6. Juhusliku vea arvutamine otsesel mõõtmisel

Olgu nüüd tegemist juhuga, millal juhuslikud vead ülevavad tunduvalt mõõteriista vigu. Mõõtmiste kordamisel saame tulemusi, mis erinevad üksteisest rohkem kui mõõteriista täpsusklassi järgi määratav riistaviga.

Sellisel juhul tuleb mõõtmisi korrata n korda (füüsika praktikumis on soovitatav võtta 5...10 lugemit) ja arvutada absoluutne viga, kasutades valemit (2) koos parandusteguriga $t_{n,\beta}$.

Näide. Mõõdeti metallplaadi paksust d seitsmest eri kohast varbsirkli abil, mille nooniusse täpsus on 0,1 mm.

Nr.	d, cm	$ \bar{d} - d_i \cdot 10^2$	$(\bar{d} - d_i)^2 \cdot 10^4$
1.	9,25	3	9
2.	9,30	2	4
3.	9,27	1	1
4.	9,31	3	9
5.	9,26	2	4
6.	9,29	1	1
7.	9,27	1	1

$$\bar{d} = 9,27 + \frac{-2 + 3 + 0 + 4 - 1 + 2 + 0}{7} \cdot 10^{-2} = 9,28 \text{ (cm)},$$

$$\Delta d_r = \pm \sqrt{\frac{9 + 4 + 1 + 9 + 4 + 1 + 1}{7 \cdot 6}} \cdot 10^{-4} = \pm 0,0083 \text{ (cm)}.$$

Tabelist 1 leiame $n = 7$ korral usutavuse tõenäosusele 0,99 vastava teguri väärtuse $t_{n,\beta} = 3,7$. Järelikult mõõtmistulemuse absoluutse vea ülemmääraks p.3 antud mõttes saame:

$$\Delta d = \pm 3,7 \cdot 0,0083 = \pm 0,03 \text{ (cm)},$$

$$d = (9,28 \pm 0,03) \text{ cm, usutavuse tõenäosusega 0,99.}$$

7. Juhusliku vea arvutamine kaudsel mõõtmisel

Olgu valemis (6) esinevad suurused A, B, C, \dots mõõdetud nii, nagu on näidatud punktis 6. Asetades valemisse (6) mõõdetud suuruste keskväärtsused $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots$ leiame mõõtmistulemuse x . Saadud tulemuse absoluutne viga arvutatakse erinevalt p.5 toodud eeskirjast (7). Sel korral arvutame mõõdetud suuruste A, B, \dots vigadest $\Delta A, \Delta B, \dots$ kui funktsiooni x argumentide muutustest tingitud funktsiooni x muutused ikkagi valemit (7a) kasutades, kuid erinevate argumentide vigadest tingitud funktsiooni väärtuse muutused tuleb summeerida erinevalt eeskirjaga (7) antust. Eeskiri (7) annab maksimaalse vea, arvestades kõigi argumentide vigadest tingitud funktsiooni väärtuste muutusi ühemärgilistena. Kuid mõõtmisel esineva juhusliku vea korral ei ole juhuslik mitte ainult vea arvuline väärtus, vaid ka selle märk. Tõenäosusteooriale tuginedes on võimalik näidata, et kui puudub korrelatsioon funktsiooni erinevate argumentide vigade vahel, siis summeeruvad neist tingitud funktsiooni vigade ruudud:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C} \Delta C\right)^2 + \dots} \quad (10)$$

Valemit (10) kasutades tuleb näidetes lk. 17 valemite (8) ja (9) asemel kirjutada avaldised:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta C)^2 + \dots} \quad ; \quad (8')$$

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{4}{3} \frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(3 \frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{4}{2} \frac{\Delta F}{F}\right)^2} \quad (9')$$

Järelikult summa või vahe absoluutse vea ruut on võrdne liidetavate suuruste absoluutsete vigade ruutude summaga. Korrutamisel ja jagamisel liituvad suhteliste vigade ruudud.

Juhul kui suurused $\Delta A, \Delta B, \dots$ on arvatatud vigade ülemääradena p.3 lõpus antud mõttes (vt. näide p.6 lõpus), siis võib samas mõttes võetud vea ülemäära leida juhuslike vigade korral ka eeskirja (7) kasutades. Tulemuse usutavuse tõenäosus on siis suurem kui 0,99, kuid milline, see jääb teadmatuks.

Näide.

Vooluallika elektromotoorse jõu määramine kompensatsioonimeetodil.

Normaalelemendi elektromotoorne jõud on ette antud:

$$E_n = 1,018 \text{ V.}$$

Katseandmed ja arvutused olgu esitatud järgmise tabeli kujul:

Nr.	Normaalelement (E_n)			Mõõdetav vooluallikas (E_m)		
	l_1 (cm)	$ l_1 - \bar{l}_1 $ (cm)	$(l_1 - \bar{l}_1)^2 \cdot 10^2$ (cm ²)	l_2 (cm)	$ l_2 - \bar{l}_2 $ (cm)	$(l_2 - \bar{l}_2)^2 \cdot 10^2$ (cm ²)
1.	42,4	0,16	2,56	68,1	0,1	1
2.	42,6	0,04	0,16	68,0	0,2	4
3.	42,5	0,06	0,36	68,6	0,6	36
4.	42,7	0,14	1,96	68,2	0,0	0
5.	42,6	0,04	0,16	68,1	0,1	1
Keskmine	42,56			68,20		

Valemi (2) abil leiame:

$$\Delta l_1 = \pm t_{n\beta} \cdot \sqrt{\frac{(2,56 + 0,16 + 0,36 + 1,96 + 0,16) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 4}} = \pm 0,051 t_{n\beta}$$

$$\Delta l_2 = \pm t_{n\beta} \cdot \sqrt{\frac{(1 + 4 + 36 + 0 + 1) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 4}} = \pm 0,15 t_{n\beta}$$

Nõuame, et otsitaval veal oleks usutavuse tõenäosus 0,99. Siis, kuna $n = 5$, leiame tabelist 1:

$$t_{n\beta} = 4,6.$$

Järelikult

$$l_1 = (42,56 \pm 0,23) \text{ cm};$$

$$l_2 = (68,20 \pm 0,67) \text{ cm}.$$

Järgnevalt arvutame vooluallika elektromotoorse jõu valemist:

$$E_m = E_n \cdot \frac{l_2}{l_1};$$

$$E_m = 1,018 \cdot \frac{68,20}{42,56} = 1,632 \text{ (V)}.$$

Vea arvutamisel arvestame, et normaalelemendi elektromotoorne jõud on antud ~10 korda täpsemalt kui mõõtmistel saadud pikkused l_1 ja l_2 (ümardusreeglitele toetudes võime väita, et E_n on antud täpsusega $\pm 0,0005$ V) ja sellepärast võib selle vea võtta praktiliselt võrdseks nulliga. Vea arvutame eeskirja (10) kasutades:

$$\Delta E_m = E_m \sqrt{\left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_2}{l_2}\right)^2},$$

$$\Delta E_m = 1,632 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,23}{42,6}\right)^2 + \left(\frac{0,67}{68,2}\right)^2} = 0,0182.$$

Vastuse kirjutame kujul (vt. punkt 9):

$$E_m = (1,632 \pm 0,019) \text{ V, usutavuse tõenäosusega } 0,99.$$

=====

8. Tulemuse vea arvutamine juhul kui võrdväärsetena esinevad mõlemad - juhuslik ja süstemaatiline viga

Kui juhuslik viga on võrreldav mõõteriista veaga, siis on tarvis mõlemaid arvestada. Niisugusel juhul on kõige lihtsam määrata juhusliku vea ülemäär p.3 antud mõttes (vt.näide p.6 lõpus) ja liita sellele mõõteriista viga. Edaspidised

arvutused saadud tulemustega (kaudne mõõtmine) tehakse maksimaalse vea arvutamise reeglite järgi (vt. p.5).

Võib osutada, et eelneva reegli rakendamisel juhusliku vea ülemmääraks p.3 antud mõttes saame liiga suure arvu (20-100%). Sellisel juhul oleme lihtsalt olukorda valesti hinnanud ja tegemist on juhuga, kus juhuslik viga on domineeriv (vt. p.6).

Laboratoorsete tööde juures, mis viiakse läbi füüsika praktikumides, võib esineda veel selline juht, et osa suuruste mõõtmise juures antud eksperimendis on ülekaalus juhuslik viga, teistel aga süstemaatiline. Kuidas arvutada kaudselt mõõdetava suuruse viga?

Sellisel juhul leiame jällegi juhuslikele vigadele ülemmäära p.3 antud mõttes ja arvutame kaudselt mõõdetava suuruse maksimaalse vea p.5 antud viisil. Kui siinjuures jällegi osutuvad ühe või mitme suuruse juhusliku vea ülemmäärad liiga suureks, siis tuleb ülejäänud suuruste vead võtta praktiliselt võrdseks nulliga ja arvutada kaudse mõõtmise viga p.7 esitatud viisil.

Et selgitada, millised vead antud mõõtmise juures on domineerivad, on enne mõõtmisele asumist tarvis määrata riistaviga ja seejärel teha mõned mõõtmised, et veenduda, kas juhuslikud vead ületavad riistaviga või mitte. Seejärel, asudes mõõtmistele, tuleb mõõta neid suurusi, kus domineerivad juhuslikud vead, mitu korda (5..10). Teiste suuruste mõõtmisel piisab ühest korrast. (Tavaliselt on juba laboratoorse töö juhendis antud, milliseid mõõtmisi on tarvis korrata ja milliseid mitte.)

9. Aritmeetilised tehted ligikaudsete arvudega.

Lõppresultaadi esitusviis. Ümardusreeglid

Espooltoodust järeldub, et iga mõõtmise tulemusena saadud arv on ligikaudne. Seepärast on mõõtavar täisväärtuslik ainult siis, kui on teada selle viga. Vea suurust ei ole aga omakorda võimalik täpselt määrata - see on samuti ligikaudne arv. Sellest tuleneb järeldus, et aritmeetilisi tehteid mõõt-

arvude ja nende vigadega ei ole mõtet arvutada absoluutselt täpselt - kümnendkohtade suure arvuga.

a. Tehet mõõtarvudega

Tehetel mõõtarvudega tuleb kinni pidada järgmisest reeglist:

Kõigi aritmeetiliste tehete resultaadid leiame ühe võrra suurema kümnendkohtade arvuga, kui on mõõtarvudel kümnendkohti.

Näiteks takistuse arvutamisel Ohmi seadust kasutades leiame:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6,45}{0,0273} = 236,3 \text{ } (\Omega) . \quad (11)$$

Kui kõik mõõtarvud ei ole antud ühesuguste kümnendkohtade arvuga, siis tuleb eespool antud reegli rakendamisel silmas pidada väiksemat arvu kümnendkohti omavat mõõtarvu. Siinjuures on tähtis veel see, et suuremate kümnendkohtadega mõõtarvud on otstarbekas eelnevalt ümardada kümnendkohtade arvule, mis on ühe võrra suurem väikseima arvu kümnendkohtadega mõõtarvu omast. Näiteks, kui eelnevas näites volutugevuse väärtus on 0,02 A, siis

$$R = \frac{6,45}{0,02} = \frac{6,5}{0,02} = 320 \text{ } (\Omega) . \quad (12)$$

(Vt. reegel I käesoleva punkti lõpus.) Kuna arvus 320 ei ole 0 kehtivaks numbriks, vaid näitab tulemuse järku, siis tuleb viimane tulemus tegelikult kirjutada nii:

$$R = 3,2 \cdot 10^2 \text{ } \Omega . \quad (13)$$

b. Mõõtarvu vea arvutamine

Mõõtarvu vea arvutamisel tuleb kinni pidada järgmisest reeglist, mis on vigade teoorias täpselt põhjendatud (kehtib juhul kui $n \leq 10$):

mõõtarvu viga tuleb anda ühe kehtiva numbriga, kui see on 3-st suurem, ja kahe kehtiva numbriga, kui esimene neist on väiksem kui 4.

Näiteks, kui arvutuste tulemusena oleme saanud vead 1,4; 0,39; 0,041; 4,7, siis kirjutame need lõppkujus järgmiselt: 1,4; 0,39; 0,04; 5.

Järelilikult kõigis aritmeetilistes tehetes, mis on seotud vea arvutamiselega, on viimased tarvis sooritada ainult kolme kümnendkoha täpsusega (arvutame lükatiga).

Kehtivateks numbriteks nimetatakse kõiki numbreid 1, 2, 3, ... 9 ja null, kui ta asub numbrite 1...9 vahel või täisarvu ja kümnendmurru lõpus. Nulle kümnendmurru numbritest vasakul ei loeta kehtivateks numbriteks ja neid ei tule ka kümnendkohtade arvu määramisel arvestada reeglis a. Kui nullid asuvad arvu lõpus ja ei ole kehtivad [näide (12)], siis kirjutatakse tulemus kujul (13).

c. Lõpptulemuse esitusviis

Kui mõõtariiv ja selle viga on eelmiste reeglite kohaselt leitud, siis ümardatakse mõõtariiv kuni absoluutse vea paremalt esimese kehtiva numbrini. Näiteks: $(15,19 \pm 0,03)$ cm, $(127 \pm 2) \cdot 10^2$ m. Ei ole lubatud kirjutada $(15,1947 \pm 0,03)$ cm, (12715 ± 200) m, (12700 ± 200) m. Kui näites (11) on absoluutseks veaks saadud arv 6, siis kirjutatakse resultaat

$$(236 \pm 6) \Omega;$$

kui absoluutseks veaks on 2,3, siis

$$(236,3 \pm 2,3) \Omega$$

(vt. reegel b).

d. Ümardusreeglid

I. Viimane säilitatav number suurendatakse ühe võrra, kui temale järgnev ärajäetud number on 5 või üle selle, või jäetakse muutmatuks, kui ärajäetav number on väiksem kui 5. Erandiks on juhtum, kus ärajäetav number 5 on saadud ümardamise teel. Sellisel korral jäetakse eelnev number muutmatuks. Näiteks 0,6345 ümardatakse 0,635; 0,63 (mitte 0,64).

II. Absoluutse ja relatiivse vea ülemmäära leidmisel ümardatakse alati nii, et viga suureneks. Vastasel korral võib ülemmäär osutada väiksemaks tõelisest veast. Näiteks $\Delta A = 0,024 \approx 0,03$;

$$E_B = \frac{0,06}{12,9} \approx \frac{0,06}{12} = 0,5\%$$

10. Mõõtmisvigade graafilise esitamise

Näide A. Keedukannu kasuteguri olenevus vee temperatuurist.

Mõõtmistulemused olgu järgmised.

Keedukannus oleva vee mass $m = 2000$ g

Aeg (min)	Keedukan-nule ra-kendatud pinge U(V)	Voolu-tuge-vus I(A)	Tempe-ratuur t(°C)	Kasutegur % (iga mi-nuti kesk-mine) η_k	Absoluut-ne viga $\Delta \eta_k$	Suhte-line viga %
0	219	3,72	14	60	23	39
1	220	3,73	17,5	94	27	29
2	220	3,73	23	102	28	27
3	220	3,73	29	85	26	30
4	220	3,73	34	102	28	27
5	220	3,73	40	85	26	30
6	220	3,73	45	102	28	27
7	220	3,73	51	85	26	30
8	219	3,72	56	94	28	29
9	221	3,76	61,5	77	25	33
10	221	3,76	66	90	26	29
11	221	3,76	71,3	84	26	31
12	221	3,76	76,2	82	25	31
13	220	3,73	81	68	24	35
14	220	3,73	85	80	25	32
15	220	3,73	89,7	56	23	41
16	220	3,73	93			

Tabeli 5. veerus on antud kasuteguri keskmised väärtused, mis on arvutatud katse iga minuti jaoks, kasutades järgmist valemit:

$$\eta_k = \frac{c m (t_2 - t_1)}{0,239 I U \tau}$$

Kuna arvatatud kasutegurid kujutavad endast katse esimese, teise, kolmanda jne. minuti keskmisi kasutegureid, siis nende väärtuste graafilisel esitamisel (vt. joon. 3) on punktide abstsissideks võetud ka vastavate ajavahemike keskmised temperatuurid.

Kuigi saadud punktid asuvad graafikul üsna ebakorrapäraselt, ei või siit teha järeldust, nagu oleneks kasutegur ebakorrapäraselt temperatuurist. Punktide ebakorrapärase asetuse põhjus saab selgeks pärast seda, kui oleme arvanud katsevead ja need esitanud ka graafiliselt.

Aega mõõdeti stopperi abil, mille täpsus oli 0,2 s. Kuid antud katses ei saa võtta aja mõõtmise täpsuseks 0,2 s, sest kolme suuruse I, U, t väärtuse määramine momentaanselt ei ole võimalik. Arvestades seda, et voolutugevus ja pinge katse käigus vähe muutusid, võis hinnata aja mõõtmise täpsust $\pm 2,5$ s. Kuid τ on võrdne 1 minutiga ja ta kujutab ajavahemikku kahe lugemi vahel. Nii selle ajavahemiku alguses kui ka lõpus esimese $\pm 2,5$ s - järelikult 1 minut mõõdetakse täpsusega ± 5 s.

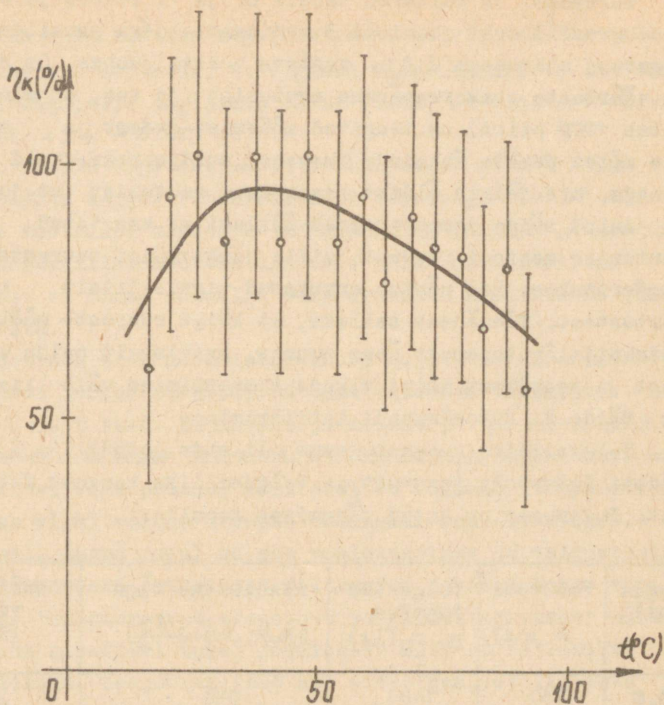
Vee hulga määramisel kasutati mensuuri, mille jaotise väärtus oli 5 cm^3 ja maht 500 cm^3 . Et 2000 g veehulga saamiseks oli tarvis mensuuri kasutada 4 korda ja igal mõõtmisel esines võimalik viga 2,5 g, siis tuleb veehulga mõõtmisveaks võtta ± 10 g.

Temperatuuri mõõtmisel kasutati termomeetrit skaalajaotisega 1°C . Mõõtmisviga $0,5^\circ\text{C}$.

Vee erisoojus on oleneb temperatuurist, muutudes temperatuurivahemikus 0°C kuni 100°C maksimaalselt 0,01 võrra (minimaalse ja max. väärtuste vahe). Arvutustes võeti väärtuseks

$$c = 1,00 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} ; \quad \Delta c = \pm 0,005 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} ;$$

$\Delta U = \pm 1,5 \text{ V}$; $\Delta I = \pm 0,025 \text{ A}$; Joule'i-Lenzi tegur on võetud täpsusega $\pm 0,0005$ (ümardusreeglitest).



Joonis 3.

Kasuteguri vea arvutame valemist (vt. p.5):

$$\frac{\Delta \eta_k}{\eta_k} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{0,0005}{0,239} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta(t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{\Delta \tau}{\tau} .$$

Küüs esimest liidetavat on kõigi η_k väärtuste korral samad. Asendades viimased vastavate arvudega ja arvestades, et $\Delta(t_2 - t_1) = 2 \Delta t = 1 \text{ deg}$, saame

$$\frac{\Delta \eta_k}{\eta_k} = 0,11 + \frac{1}{t_2 - t_1} .$$

Tulemused on esitatud tabeli 6. ja 7. veerus ja on näidatud graafiliselt joonisel 3 ordinaatteljega paralleelsete sirgetena pikkusega $2 \Delta \eta_k$ vastava punkti juures. On selge, et η_k väärtuste ebakorrapärane muutumine (ja see, et mõni neist ületab 100% piiri) on tingitud mõõtmisvigadest ja seetõttu pole mõtet punkte ühendada omavahel murdjoonega, vaid kõverjoonega, mis jälgib üldist kasuteguri muutumist (vt. joon. 3).

Antud näide demonstreerib ühtlasi ka kasutatud vigade arvutamise meetodi puudust, mille järgi kõigi suuruste vead summeeritakse. See nähtub arvutatud vigade liialt suurtest väärtustest. Tõenäosus selleks, et kõigi suuruste mõõtmisvead muudaksid lõpptulemust ühes suunas, on ilmselt palju väiksem ühest ja seepärast kõigi vigade summeerimine näib liialdusena.

Näide B. Fotoelemendi kaliibrimine.

Valgusallika valgustugevus oli ette antud: $I = 2,15$ cd. Mõõdeti fotovoolu tugevust ja valgusallika kaugust fotoelemendist. Tulemused on antud järgmises tabelis:

Kaugus r (cm)	Fotovool J (μ A)	Valgustus- tugevus $E = \frac{I}{r^2} (lx)$	Absoluutne viga $\Delta E = E \left(\frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta r}{r} \right)$	Suhteline viga (%)
3,8	130	1480	390	27
4,2	120	1220	290	24
4,5	110	1060	138	22
4,8	100	935	200	21
5,3	90	765	150	19
5,7	80	662	120	18
6,5	70	508	80	16
7,5	60	383	50	14
8,5	50	298	36	12
10	40	215	22	10
12	30	149	13	9
15,7	20	88	6	7
19,3	15	58	3	5
25,5	10	33	1	3
40,5	5	13	0,4	3

Kuna valgusallika tugevuse väärtuse viga ei ole antud, siis tähendab see seda, et vigased kümnendkohad on ümardatud. Ümardusreeglitele tuginedes võime väita, et viga ei ületa väärtust $\Delta I = \pm 0,005$ cd.

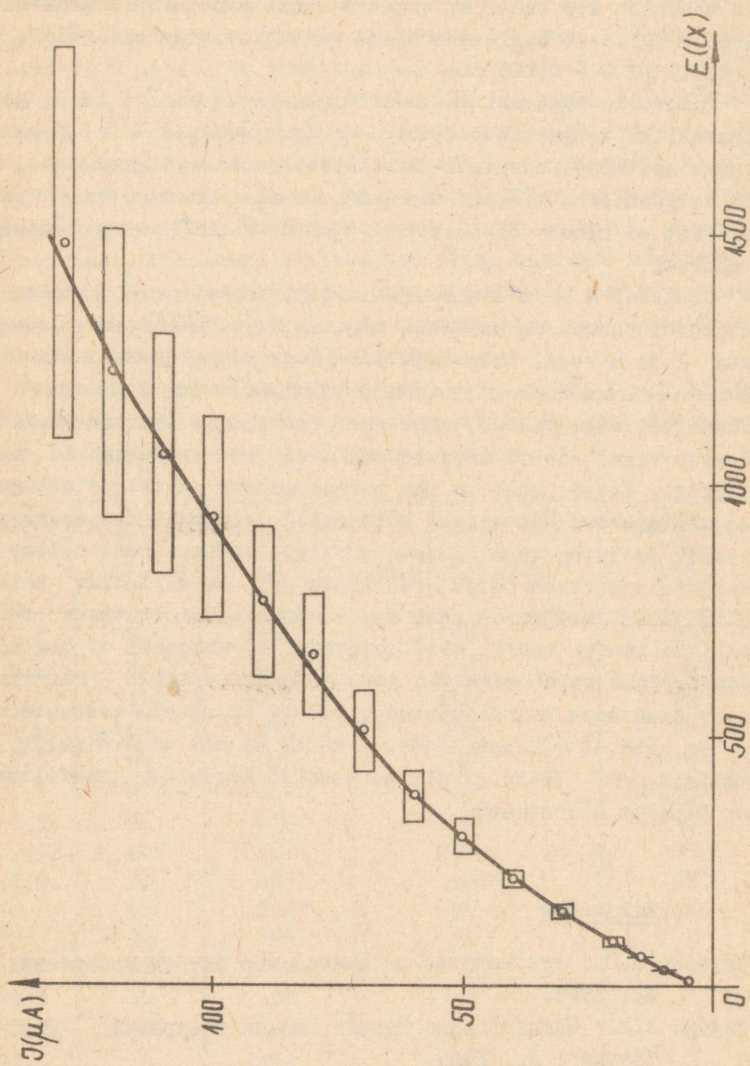
Potovoolu tugevust mõõdeti täpsusega $\Delta J = \pm 2 \mu A$ ja valgusallika kaugus fotoelemendist täpsusega $\Delta r = \pm 0,5$ cm. Kauguse mõõtmisel kasutati millimeeterjaotusega joonlauda, kuid valgusallika mõõtmised ulatusid mitme millimeetrini ja seepärast ei olnud võimalik tema asukohta millimeetri täpsusega määrata.

Joonisel 4 on mõõtmistulemused kujutatud graafiliselt. Iga punkti juures on näidatud tema asukohta määravate suuruste J ja E vead. Erinevalt joonisest 3 on antud joonisel punktide määramatuse piirkondadel ristküliku kuju. Joonisel 3 abstsissi viga puudub, sest seal on viimane (temperatuuri mõõtmise viga) võetud arvesse ordinaadi vea (kasuteguri) arvatamisel. Antud juhul on aga voolutugevuse ja valgustugevuse mõõtmisvead üksteisest sõltumatud ja näidatakse seepärast mõlemad. Voolutugevuse olenevust valgustugevusest näitav kõverjoon graafikul tuleb joonistada nii, et ta läbiks kõiki ristkülikuid. Seejuures peab aga arvestama, et lihtsate füüsikaliste seoste korral neid kujutaval kõverjoonel ei ole käänupunkte. Neid tuleb graafiku joonistamisel vältida - kui vaid katseandmed koos arvessevõetud vigadega ei tõesta vastupidist.

On näha, et väljajoonistatud kõver ei ole ainuvõimalik. Mõõtmisvigade tõttu ei ole ka seadust kirjeldav graafiline joon täpselt määratletud.

11. Kirjandus

- Ромченко И.С. Руководство по вычислению ошибок измерений. М., 1966.
- Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. "Наука", Л., 1968.
- Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. "Наука", М.-Л., 1965.



Joonis 4.

ÜLDMÕÕTMISED

1. Tööülesanne

Nooniuse, nihkkaliibri ja kruvikaliibriga tutvumine. Nende kasutamine pikkuste mõõtmisel.

2. Töövahendid

Nihkkaliiber, kruvikaliiber, mõõdetavad esemed: plaat ja toru.

3. Mõõtmisvahendite kirjeldus ja kasutamine

Tehniliste ja füüsikaliste mõõtmiste juures esineb sageli vajadus mõõta mitmesuguseid suurusi suure täpsusega. Seejärest peab tänapäeva insener hästi tundma mõõtmismeetodeid ja olema võimeline ise kiiresti mõõtma vajalikke suurusi. Ühtlasi on järgnevalt käsitletavate mõõtmismeetodite tundmine vajalik edaspidiste laboratoorsete tööde tegemisel.

3.1. Nooniuse

Paljudel mõõteriistadel, nagu nihkkaliiber, kruvikaliiber, goniomeeter jne., on mõõteskaalaga paralleelselt liikuvale osale tõmmatud kriips, mille järgi toimub mõõteriista liikuva osa asukoha määramine - lugemi leidmine. Mõõtekriips on tavaliselt välja joonistatud samauguse laiusega nagu mõõteskaala jaotisi tähistavad kriipsud. Mõõtekriipsu kokkulangemist mingi mõõteskaala kriipsuga saab seetõttu üsna täpselt fikseerida. Kui aga mõõtekriips ei asu täpselt kohakuti mingi skaalakriipsuga, siis on lugemi leidmine vähem täpne. Sel korral võib silma järgi hinnata skaalajaotise kümnendikosi. Saadud kümnendikkohad ei ole aga nii täpsed kui kokkulangemisest leitud tulemused. Et skaala väikseima jaotise osi oleks võimalik täpselt määrata, lisatakse mõõtekriipsule abiskaala, mille nullkriipsuks on mõõtekriips, ja skaala ise kulgeb mõõtekriipsust sinnapoole, millises suunas kasvavad põhiskaalalt võetavad lugemid. Seda abiskaalat nimetatakse nooniuseks.

Nooniuse jaotised valitakse põhiskaala (mõõteskaala) jaotistest $\frac{1}{n}$ osa võrra lühemad, kus n on mingi kahest suurem täisarv. Seejuures joonistatakse nooniusele n jaotist.

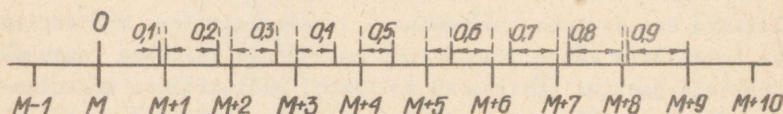
Arvutame niisuguse nooniusse kogupikkuse, kui mõõteskaala väikseima jaotise väärtus on 1:

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right) l n = l(n - 1).$$

Seega nooniusse n jaotise kogupikkus võrdub mõõteskaala $n - 1$ jaotise pikkusega. Nooniussele jaotiste arvuga n vastab skaalal täpselt $n - 1$ jaotist.

Kui nüüd nooniusse nullkriips (mõõtekriips) asetada täpselt kohakuti mingi mõõteskaala kriipsuga M (vt. joon. 5), siis nooniusse esimene kriips ei ühti skaala $(M + 1)$ kriipsuga, vaid jääb sellest maha $\frac{1}{n}$ mõõteskaala jaotist. Teine kriips jääb maha $(M + 2)$ -st jaotisekriipsust $2 \cdot \frac{1}{n}$ võrra, kolmas kriips jääb maha $(M + 3)$ -ndast jaotisekriipsust $3 \cdot \frac{1}{n}$ võrra jne., kuni nooniusse viimane n -s kriips on $(M + n)$ -ndast skaalajaotisest jäänud maha juba $n \cdot \frac{1}{n} = 1$ skaalajaotise võrra, s.o. ühtib täpselt $M + n - 1$ skaalajaotisega. Joonisel 5 on selline olukord näidatud juhul kui $n = 10$.

NOONIUS



MÕÕTESKAALA

Joonis 5.

Kui nüüd nooniusse nihutada mõõteskaala näitude kasvu suunas edasi, siis enne kui nooniusse 0-kriips jõuab kohtuda mõõteskaala järgmise $M + 1$ jaotisega, toimub järgemööda $n - 1$ (näiteks joonisel 5 üheksa) nooniusse jaotiste ja mõõteskaala jaotiste kohtumist. Esimene kohtumine nooniusse skaala jaotiste ja põhiskaala jaotiste vahel toimub nooniusse esimese jaotise ja skaala $M + 1$ jaotise vahel pärast nihet $\frac{1}{n}$ l. Teine

kohtumine nooniusse teise jaotise ja skaala $M + 2$ jaotise vahel toimub pärast nihet $2 \frac{1}{n} - 1$ jne. Seega saame küllalt täpselt fikseerida nihked $\frac{1}{n}$; $2 \frac{1}{n}$; $3 \frac{1}{n}$; ... $n \frac{1}{n} = 1$. Teisiti öeldes, nooniusse abil saame määrata mõõdetava suuruse muutusi, mis on suurusega $\frac{1}{n}$ täisarvkordsed. Seda suurust nimetatakse nooniusse täpsuseks:

$$T = \frac{1}{n}.$$

Mõõtmisel määratakse kõigepealt mõõteskaala lugem M , viimane kriips põhiskaalal, mille on ületanud nooniusse 0-kriips, liikudes mõõteskaala näidu kasvu suunas. Seejärel leitakse, mitmes nooniusse jaotis täpselt ühtib mõne mõõteskaala jaotisega. See arv (olgu see N) korrutatakse nooniusse täpsusega ja liidetakse juurde lugemile M . Mõõtmistulemus - mõõt arv A - on seega:

$$A = M + N T.$$

Mõõtmiste hõlbustamiseks on need arvutustulemused (väärtused $N T$) kantud juba nooniusse vastavate jaotiste juurde. Näiteks joonisel 5 tuleks nooniusse jaotiste juurde kirjutada seal näidatud arvud, kui põhiskaala jaotise väärtus on 1. (sellisel juhul kirjutatakse lihtsuse mõttes siiski 1, 2, 3... jne., kuid peetakse meeles, et need tähendavad kümnendikosi).

Kui selliselt ehitatud noonius saab liiga väikeste mõõtemetega (on raske kirjutada selle jaotiste juurde selgelt loetavaid numbraid jne.), siis kasutatakse nn. venitatud skaalat. Seejuures ehitatakse noonius eespool kirjeldatud viisil, kuid n asendatakse arvudega $2n$, $3n$, $4n$ jne. (vastavalt sellele saab noonius ka 2, 3, 4 jne. korda pikem eelmisest), kuid nooniussele kantakse siiski ainult n jaotist (vastavalt üle ühe, üle kahe, üle kolme jne. jaotise). Kuigi selline noonius on põhimõtteliselt ehitatud 2, 3, 4 jne. korda suuremale jaotiste arvule, ei muutu nooniusse täpsus, sest uuele nooniussele ei ole kantud kõiki jaotisi ja seepärast ei saa mõõta ka vahepealseid täpsust suurendavaid kokkulangemisi. Ainukeks muutuseks on see, et noonius on endisest pikem ja tema jaotised on pikemad mõõteskaala väiksematest jaotistest.

Järelikult nooniuuse täpsus näitab, kui palju on üks nooniuuse jaotis lühem mõõteskaala kõige väiksemast jaotisest (või siis kahe, kolme, nelja jne. mõõteskaala väikseima jaotise pikkusest, olenevalt nooniuuse venitusastmest).

3.2. Nihkkaliiber

Nihklaliibrit kasutatakse pikkuste mõõtmisel. Põhiskaala külge on kinnitatud mitteliikuv mõõteotsik. Teine selline mõõteotsik on varustatud nooniuusega ja liigub koos sellega põhiskaalal. Mõõteotsikud on kohandatud ka detaili siseläbimõõttude mõõtmiseks (enamasti tuleb sel juhul skaalalt saadud lugemile liita mõõteotsikule märgitud pikkus, näiteks 10 mm). Aukude sügavuse mõõtmiseks on sageli nihkkaliibri liikuv mõõteotsik varustatud vardaga.

3.3. Kruvikaliiber

Kruvikaliibriga võib pikkusi mõõta täpsusega kuni 0,01 mm.

Kruvikaliiber kujutab endast metallklambrist, millele on kinnitatud liikumatu mõõteotsik ja liikuv mõõtepingid mikromeetriks kruvi otspinna näol. Kruvi samm on tavaliselt 1 või 0,5 millimeetrit. Kruvi on järgalt ühendatud trumliga, mille serva asend metallklambriga järgalt ühendatud skaala suhtes näitab mõõteotsikute vahelist kaugust 0,5 või 0,25 mm täpsusega. Trumlile endale on kantud ringskaala, mis jaotab kruvi sammu 100 või 50 osaks.

Kruvikaliibriga mõõtmisel peamiseks vigade allikaks on ebaõige mõõtepingidade surve vastu detaili. Selle kõrvaldamiseks on mikromeetri liikuv trummel varustatud friktsiooniduriga. Mõõtmisel tuleb mõõtepingidu teineteisele lähemale keerata ainult siduri abil seni, kuni liikuv mõõtepingid surub vastu detaili ning sidur hakkab libisema. Alles nüüd võib leida lugemi. Seejuures loetakse täis- (või pool-)millimeetreid lineaarskaalalt, kuid murdosi trumlilt (vastavalt kruvikaliibri täpsusele).

4. Töö käik

A. Mõõtmised nihkkaliibriga

1. Määrake juhendaja poolt antud nihkkaliibri nooniuuse täpsus.

2. Kontrollige nihkkaliibri null-lugemit, protokollige nullpunkti parandus ning arvestage seda mõõtmiste lõpptulemuste leidmisel.
3. Mõõtke antud plaadi paksus. Selleks asetage plaat mõõtetaskute vahele ja lükake need tihedalt vastu proovikeha. Fikseerige stopperkruviga nooniusse asend ja leidke lugem.
4. Korra mõõtmisi veel proovikeha üheksas erinevas kohas ning leidke keskmine plaadi paksus, s.t. paksuste aritmeetiline keskmine.
5. Mõõtke antud toru sise- ja välisläbimõõdud (kümnest eri kohast) ning arvutage keskmised.
6. Kaaluge toru (tehnilistel kaaludel) ning leidke selle tihedus.

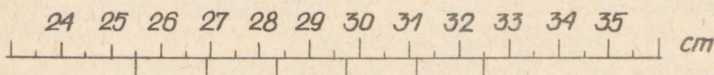
B. Mõõtmised kruvikaliibriga

7. Määrake mikromeetri keerme samm ja jaotiste arv trumlil.
8. Määrake null-lugem (nullpunkti parandus).
9. Mõõtke antud eseme (plaadi) paksus viiest erinevast kohast.
10. Arvutage eseme (plaadi) keskmine paksus ja selle mõõtmisviga.

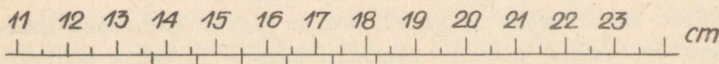
5. Küsimused

1. Mida nimetatakse mõõtmiseks?
2. Kuidas defineeritakse pikkusühik SI-s?
3. Milleks kasutatakse nooniusi?
4. Kuidas määratakse nooniusse täpsus?
5. Kui suur on mõõtmise absoluutse vea ülemäär nooniusse kasutamisel?
6. Kui suur on nooniusse täpsus, kui 10 nooniusse jaotist vastab 29 põhiskaala jaotisele (1 mm)?
7. Kuidas võetakse nooniusse abil lugem?
8. Kuidas leida risttahuka ruumala absoluutse vea ülemäär?
9. Mida iseloomustab mõõtmise relatiivne viga?
10. Nooniussega, mille täpsus on 0,05 mm, saadi pikkuse mõõtmisel tulemuseks 5,35 mm. Kui suur on selle mõõtmistulemuse absoluutse vea ülemäär ja relatiivne viga?
11. Kuidas määratakse kruvikaliibri täpsus?

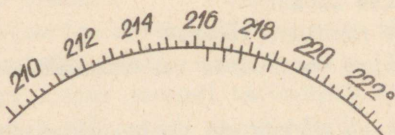
12. Miks on kruvikaliibri pea varustatud siduriga?
13. Kuidas tuleb teha nullpunkti parandus?
14. Nimetage ühest millimeetrist väiksemaid pikkusühikuid ja näidake nende vahekord?
15. Tuletage avaldis risttahuka ruumala relatiivse vea arvutamiseks.
16. Milline on nooniuuse täpsus ja millised arvud võiks kirjutada nooniuuse jaotiste juurde?



17. Milline on lugem?



18. Milline on lugem?



6. Kirjandus.

Lang, J., Mets, G., Pae, A. Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, §§ 21...29, lk. 46...64.

Иверонова В.И. Физический практикум, стр. 33...36.

KATETOMEETER

1. Tööülesanne

Katetomeetri ehitusega tutvumine, selle töökorra seadmine ja vedeliku eriraskuse (erikaalu) määramine U-torus.

2. Töövahendid

Katetomeeter, U-toru kahe erineva vedelikuga.

3. Katetomeetri ehitus ja töökorra seadmine

3.1. Katetomeetri ehitus

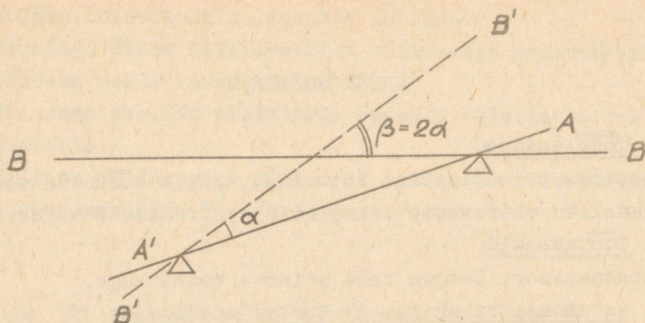
Katetomeetrit kasutatakse kõrguste vahe määramiseks vahemaad tagant.

Katetomeetri peamiseks osaks on täpse skaalaga varustatud tugev vertikaalne samm, mida saab pöörata vertikaalse telje ümber. Kogu riist toetub kolmele jalgkruvile. Mõõda sammast liigub üles-alla kelk pikksilmaga. Kelku saab vastava kruvi abil igas kõrguses peatada ja mikromeetiline kruvi võimaldab pikksilma kõrgust suure täpsusega reguleerida. Lugegi saamiseks on kelgul nooniis. Pikksilm on varustatud tundliku vesiloodiga, mille abil samm seatakse vertikaalseks ja pikksilm horisontaalseks.

Katetomeeter on töökorras, kui tema samm on vertikaalne ja pikksilm horisontaalne. Pikksilma optilise telje horisontaalsuse määrab vesilood, mille telg peab olema paralleelne pikksilma optilise teljega. Pikksilma ja loodi telgede rööbikuse kontroll ei ole alati tarvilik. Seepärast tuleb enne tööle asumist praktikumi juhendajalt küsida, kas on vaja kontrollida pikksilma ja vesiloodi rööbikust.

3.2. Pikksilma optilise telje ja vesiloodi telje paralleelseks seadmine.

Pöörame pikksilma kallutatavast kruvist vesiloodi nulli selle skaala keskele. Tekib olukord, mis on esitatud joonisel 6, kus pikksilma telje asendit märgib AA' ja vesiloodi telje asendit BB. Nendevaheline nurk on tähistatud tähega α .



Joonis 6.

Tõstame pikksilma peast välja, pöörame teda 180° võrra ja asetame pesasse tagasi. Pikksilma telje asend AA' jääb endiseks, vesiloodi telg aga läheb asendisse $B'B'$. Nurk β vesiloodi telje endise ja uue asendi vahel on 2α . Kui pöörame vesiloodi teda kallutatavast kruvist $\frac{\beta}{2} = \alpha$ võrra, siis muutub vesiloodi telg paralleelseks pikksilma teljega. Pöörame pikksilma kallutatavast kruvist ülejäänud poole nurgast β , siis on pikksilm ja vesilood loodis.

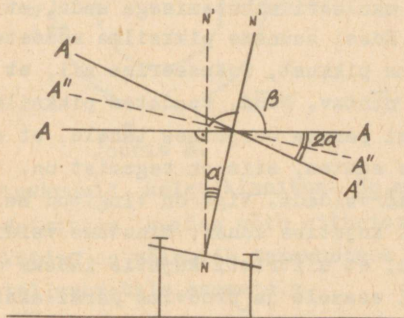
Kui vesiloodi mull ei ole loodi otsale liiga lähedal, siis toimub kaldenurga β poolitamine mulli nihkumise järgi. Kui mull on aga vastu loodi otsa surutud, siis pöörame pikksilma kruvist mulli loodi skaala keskele. Seejuures loeme tehtud pöörete arvu. Pöörates sama kruvi poole tehtud pöörete arvu võrra tagasi, võime kindlad olla, et oleme selle kruvi abil küllaldase täpsusega poole kaldest vähendanud. Pöörame vesiloodi kallutatavast kruvist mulli uuesti keskele. Et nurga poolksjagamine toimub ligikaudselt, tuleb seda võtet korrata seni, kuni pikksilma 180° -kraadisel ümberpööramisel jääb vesiloodi mull täpselt keskele.

3.3. Katetomeetri samba vertikaalseks ja pikksilma horisontaalseks seadmine

Teeme seda kõigepealt ligikaudselt silmaga, kontrollides katetomeetri samba rööbikust ruumi akna või ukseraami äärega.

Selleks on otstarbekohane projekteerida katetomeetri samm uksele või aknale kahe jalgkruvi suunas. Kui näeme, et samm ei ole paralleelne vertikaaljoonega, siis reguleerime teda vaatesuunast kõrvale jääva jalgkruviga. Sama teeme ka kahe teise jalgkruvide paari suunas, reguleerides vastavalt vaatesuunast kõrvale jäävaid jalgkruviseid.

Edasine reguleerimine toimub vesiloodi abil. Pöörame vesiloodi rööbiti kahe jalgkruviga ja reguleerime ta horisontaalseks pikksilma kallutatavast kruvist. Vastavat olukorda kujutab joon.7, kus NN' on katetomeetri samba asend ja AA pikksilma asend. Nurk katetomeetri samba ja vertikaalsuuna vahel joonise tasapinnas (s.o. vertikaaltasapinnas, mis läbib kaht jalgkruvi) on α . Horisontaalne pikksilm moodustab sambaga nurga $\beta = 90^\circ - \alpha$.



Joonis 7.

võrra, siis võtab samm vertikaalse asendi. Kui kallutame niisama suure nurga võrra vesiloodi samba suhtes, muutub lood horisontaalseks.

Kuidas muuta samba ja vesiloodi (pikksilma) kallet α võrra? Kui seisus A'A' vesiloodi mull on loodi otsa juurest veidi eemal, siis võime nurga jagamist toimetada silma järgi, jälgides vesiloodi mulli nihkumist skaala suhtes. Mulli nihkumise võime lugeda võrdeliseks nurgaga. On aga mull täiesti

Pöörame pikksilma koos sambaga samba telje ümber 180° võrra. Nurk β jääb nüüd sambast vasakule poole. Pikksilma uut seisu tähistab joonisel 7 sirge A'A'. Nurk loodi esialgse ja nüüdse asendi vahel on 2α . Siit järeldub katetomeetri samba vertikaalseks seadmise viis. Kui me jalgkruvist kallutame sammast nurga $\frac{2\alpha}{2} = \alpha$

vastu loodi otsa surutud, siis pöörame üht jalgkruvi niikaua, kuni lood muutub horisontaalseks. Seejuures loendame jalgkruvi pöörete arvu n . Nüüd pöörame samast kruvist $\frac{n}{2}$ pööret tagasi. Sellega oleme jalgkruviga sooritanud kallutuse α . Ülejäänud kallutuse teeme pikksilma kruvi abil. Et võrdlemisi suure nurga poolitamine toimub silma järgi, tuleb pikksilma pööramist ümber samba telje korrata veel mitu korda, kuni pööramisel 180° võrra vesiloodi mull enam ei nihku.

Nüüd pöörame pikksilma risti nende kahe jalgkruviga, mille järgi toimus loodimine, ja pöörame kolmandast jalgkruvist vesiloodi mulli keskele. Nüüd peaks vesilood igas suunas loodis olema. Kui mõnes suunas vesiloodi mull ei ole ikka veel keskel, siis tuleb kõik loodimisvõtted uuesti läbi teha.

3.4. Pikksilma teravustamine

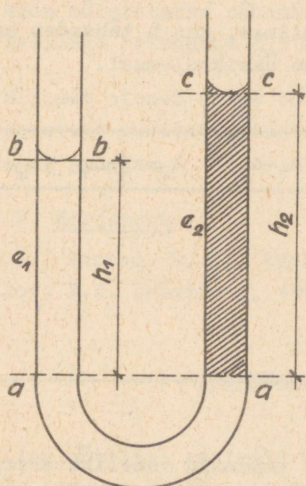
Kõigepealt saavutame okulaari nihutamiselega seda, et niitrist oleks teravalt näha. Edasi suuname pikksilma mõõdetavale kehale ja, muutes pikksilma pikkust, fokuseerime nii, et eseme kujutis oleks teravalt nähtav. Nüüd, vaadates pikksilma, võngutame kergelt pead. Kui paneme seejuures tähele, et niitrist nihkub eseme kujutise suhtes, siis on tegemist nn. parallaksiveaga, mis tuleb kõrvaldada. Viga on tingitud sellest, et niitrist ei asu täpselt kujutise kohal. Nihutame veidi okulaari, aga mitte nii palju, et niitristi kujutis läheks ebateravaks, fokuseerime uuesti esemele ja proovime parallaksivea olemasolu. Nii toimime seni, kuni silma nihutamiselega pikksilma taga niitrist enam ei nihku kujutise suhtes.

4. Vedeliku tasakaal U-torus

Ühendatud anumates ja seega ka U-torus seisab vedeliku vaba pind ühel ja samal rõhthal tasemel. Kui aga valame ühte torru üht ja teise teist vedelikku ja kui need vedelikud ei segune, siis saame torudes erineva kõrgusega tasemed (joon.8). Tasakaalu korral saame vedelikusammaste kõrguste kaudu arvutada nende vedelike eriraskuste suhte, sest kokkupuutetasemele aa avaldavad mõlemad sambad võrdset rõhku.

Olgu h_1 ühe samba kõrgus vedelike kokkupuutetasemest ja

h_2 teise samba kõrgus samast tasemest. Torus allpool ni-
vood aa asub üks ja sama vedelik, mis on seega tasakaalus.



Joonis 8.

Vedeliku sammaste rõhud tase-
mel aa on võrdsed, mille põh-
jal võime kirjutada $h_1 e_1 = h_2 e_2$,
kus e_1 ja e_2 tähendavad vas-
tavate vedelike eriraskusi.
Sellest võime kirjutada

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

Kui ühe vedeliku eriraskus on
teada, siis, mõõtnud vedeliku-
sammaste kõrgused, saame arvu-
tada teise vedeliku erirasku-
se.

5. Töö kõik

- Leidke üles katetomeetri
samba kallutuskravid, pikk-
silma ja vesiloodi kallu-
suskravid, kelgu kinnitus- ja mikromeetriline kruvi.
- Selgitage, kuidas võib niitristi kujutist teravustada ja
kuidas on võimalik teravustada pikksilma erinevatel kaugus-
tel asuvatele esemetele.
- Määrake nooniuse täpsus.
- Küsige juhendajalt, kas on vajalik vesiloodi ja pikksilma
paralleelseks seadmine. Kui jaa, siis toimige nii, nagu
on näidatud punktis 3.2.
- Seadke katetomeetri samm vertikaalseks ja pikksilm hor-
isontaalseks nii, nagu on selgitatud punktis 3.3.
- Teravustage U-toru ja niitristi kujutised pikksilmas nii,
nagu on selgitatud punktis 3.4.
- Reguleerige mikromeetrilise kruvi abil ja katetomeetri samba
pööramise teel niitrist nivoole aa vedelike eraldusjoonel.
Võtke lugem (n_1) sellise täpsusega, nagu kelgul asuv noo-
nius võimaldab.

8. Nii nagu punktis 7, võtke lugemid nivoodel bb (n_2) ja cc (n_3).
9. Korrake kõiki mõõtmisi 5 korda, viies iga mõõtmise järel niitristi uuele nivoole.
10. Mõõtmistulemused kanname tabelisse, kus h tähendab aritmeetilist keskmist ja h_1 mõõtmise üksiktulemusi.

Nr.	n_1	n_2	n_3	$h_1 = n_2 - n_1$	$(h_1 - h_1)^2$	$h_2 = n_3 - n_1$	$(h_2 - h_1)^2$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

Keskm.

11. Kasutades valemit (1) leidke tundmatu vedeliku eriraskus ja tulemuse juhuslik viga, mis on tingitud mõõdetud h_1 ja h_2 väärtuste hajumisest.

6. Küsimused

1. Kuidas toimub vesiloodi pikksilma optilise teljega paralleelseks seadmine?
2. Kuidas toimub samba vertikaalseks seadmine?
3. Milliste tunnuste järgi saab otsustada, kas katetomeeter on töökorras?
4. Mis on parallelaks ja kuidas teda kõrvaldada pikksilma juures?
5. Missugusel põhimõttel toimub eriraskuse määramine antud tööos?
6. Kuidas leitakse nooniusse täpsus?
7. Kui suure täpsusega tuleb võtta tuntud vedeliku eriraskus, et täielikult ära kasutada nooniusse täpsus?
8. Kuidas saab arvutada vedelikusamba rõhku?
9. Kuidas mõjustab toru läbimõõt mõõtmistulemusi U-toru kasutamisel?

10. Kas mõõtmistulemusi mõjustab ka õhurõhk?
11. Missuguses vahekorras on SI- ja CGS-süsteemi eriraskuse ühik?
12. Mida mõistetakse rõhumise ja rõhu all?
13. Avaldage eriraskus $3,5 \frac{gf}{cm^3}$ SI-süsteemis.
14. Millest oleneb antud töös leitava eriraskuse täpsus?
15. Arvutage uuritava vedeliku tihedus, kui raskuskiirendus on $9,80 \frac{m}{s^2}$.

7. Kirjandus

Lang, J., Marran, H. jt. Füüsika üldkursus, §138, lk. 176, 177.
 Putilov, K.A. Füüsika I, 1964, §115, lk. 445... 451.

ANALÜÜTILISED KAALUD

Analüütilisi kaalusid kasutatakse kehade massi ja raskusjõu (raskuse) määramiseks.

Olgu antud kaks keha massidega m_1 ja m_2 . Nende raskused on siis vastavalt $P_1 = m_1g$ ja $P_2 = m_2g$, kuna raskuskiirendused mõlema keha asukohas on praktiliselt samad. Järelikult

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2} . \quad (1)$$

Siit näeme, et ühes ja samas kohas suhtuvad kehade raskused samuti kui nende kehade massid. Järelikult võime kehade raskuste suhet määrata nende kehade masside suhte abil ja ümberpöörduvalt. Sel alusel toimubki kehade masside määramine kaalumise abil. Kuna kaalumine on üks mõõtmiste alaliiki, mõõtmiseks nimetatakse aga mingi füüsikalise suuruse võrdlemist ühikuks valitud sama liiki suurusega ja kuna vihtidele on kantud nende massid, siis toimub kaalumisel masside mõõtmine.

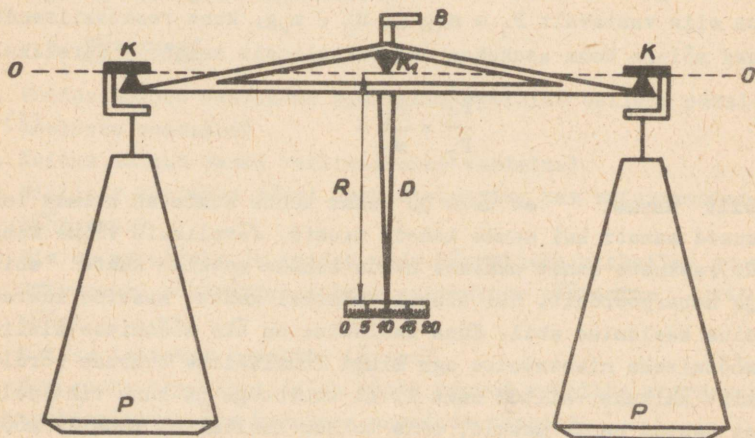
Põhimõtteliselt võiks kaalumisel võrrelda ka kehade raskusi, kui vihtidele kantaks nende raskuste väärtused. Kuna aga keha raskus oleneb tema asukohast maapinnal, siis ei oleks sellised vihid kasutatavad igal pool.

Kehade vastavad raskused saame arvutada nende masside korrutamisel raskuskiirendusega. Seejuures tuleb silmas pida, et raskuskiirenduse suurus oleneb kohast, kus toimub kaalumine. Nii näiteks on raskuskiirenduse suurus Tallinnas $981,840 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ ja Moskvas $981,557 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$. Normaalseks raskuskiirenduseks loetakse vastava kokkuleppe alusel raskuskiirendust 45. laiuskraadil merepinnal ning tema väärtus on

$$g_0 = 980,665 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}.$$

Kehade masside täpseks määramiseks kasutatakse tihti võrdõlgseid kangkaale. Nagu nimest nähtub, moodustab kaalu põhiosa võrdõlgne kang. Kang toetub kõvast ainekst prisma abil kõvast ainekst alusele. Kangi otstes ripuvad samuti prismadele toetus kaalu- ehk vaekausid. Kuna kaalukang toetub ülalpool raskuskeset, on ta püsivas tasakaalus. Sellest asendist väljavõtmisel tuleb ta sumbuvate võnkumistega ise sinna jälle tagasi.

Tavaliselt on analüütiliste kaalude (joon.9) kang toetatud ahhaadist või karastatud terasest valmistatud toetuspris-



Joonis 9.

ma K_1 terava servaga niisama kõvast materjalist alusplaadile. Selle prisma serval lasubki kaalu liikuva konstruktsiooni kogu raskus. Prisma serv ei või olla liiga terav, kuna kitsal toetuspinnal tekiks kaalude koormamisel rõhud, mis ületaksid prisma ja plaadi materjali tugevuse. Seetõttu kujutab prisma serv endast tegelikult silindrilist pinda raadiusega $1 - 3 \mu\text{m}$, mis kaalukangi võnkumisel veereb mööda alusplaati. Alusplaat ja prisma serv on seejuures deformeerunud.

Kaalukangi võnkumisel toimuva prisma serva veeremise tõttu nihkub kangi toetuspunkt ühele ja teisele poole, s.o. muutub tasakaaluasend. Selle tõttu muutub ka kangi õlgade suhe ning kannatab kaalumise täpsus.

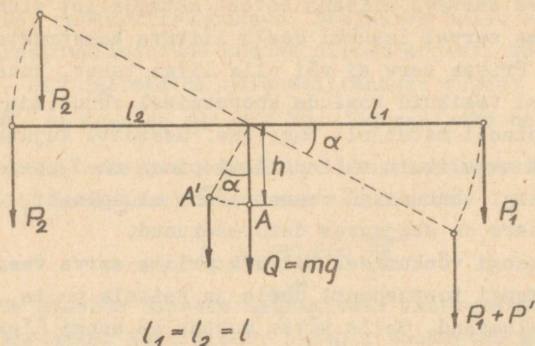
Kaalukangi otstes olevatele prismadele K toetuvad kaalu-kausside P ülesriputusmehhanismide plaadid. Kangi õla pikkus võrdub seega keskmise ja äärmise prisma servade vahelise kaugusega. Võrdõlgasel kaalul peavad need kaugused olema võrdsed väga suure täpsusega. Samuti on vajalik, et kõigi kolme prisma servad asetseksid ühes tasapinnas OO.

Et mõlemaid nõudeid on praktiliselt väga raske täita, tuleb kaalumisel kasutada sellist meetodikat, mis väldib mainitud puuduste tagajärjel tekkivaid vigu. Alati tuleb silmas pidades, et tundlikkus on koormise funktsioon, mistõttu tuleb teda täpsel kaalumisel iga kord määrata.

Kaalude tundlikkuseks nimetatakse osuti D kõrvalekalde suurust jaotistes tema ühe õla lisakoormamisel 1 mg võrra. Samal eesmärgil võiks kasutada ka osuti kaldenurka α (joon.10), mis võrdub kaalukangi pöördenurgaga. Et aga skaala jaotisi on lihtsam hinnata kui pöördenurka, siis jäädakse praktikas antud definitsiooni juurde. Seega, kui tasakaaluasendis olev osuti lisakoormise m' mg mõjul nihkub skaalal edasi s jaotise võrra, on kaalude tundlikkus

$$\tau = \frac{s}{m'} \left(\frac{\text{jaotis}}{\text{mg}} \right). \quad (2)$$

Tundlikkus on määratud kaalu konstruktsiooni parameetritega.



Joonis 10.

Kaalukangi kaldumisel nurga α võrra tekib pöördumist takistav jõumoment $M = mgh \sin \alpha$, kus m on kogu liikuva süsteemi (kaalukang, vaekausid, koormused) mass, h – raskuskeskme A kaugus pöördeteljest, α – pöördnurk (vt. joon.10). Seega tasakaaluasendisse tagasitoov jõumoment M on võrdeline kaugusega h . Mutri B (joon.9) pööramisega muutub süsteemi raskuskeskme asukoht ja sellega ka kaugus h ning jõumoment M .

Kui koormatud kaalude tasakaaluasend langeb ühte koormamata kaalude tasakaaluasendiga, siis on koormuste momentide summa null ja me võime kirjutada:

$$P_1 l_1 - P_2 l_2 = 0, \quad (3)$$

millest

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

kuna $l_2 = l_1$.

Seega kaalutavate esemete raskus on võrdne neid tasakaalustavate vihtide raskusega. Vastavalt seosele (1) on siis võrdsed ka nende massid.

Kui suurendada koormust lisakoormuse $P' = m'g$ võrra, tõuseb kaalukangi raskuskeske A veidi üles vasakule punkti A' ning

kaalukang moodustab esialgse asendiga nurga α (vt. joon. 10). Uue tasakaaluasendi jaoks võime kirjutada mõjuvate momentide summa, mis tasakaalu tõttu on võrdne nulliga.

$$(P_1 + P')l_1 \cos \alpha - P_2 l_2 \cos \alpha - Q h \sin \alpha = 0,$$

kus Q on liikuva süsteemi raskus.

Siit

$$(P_1 l_1 - P_2 l_2) \cos \alpha + P' l_1 \cos \alpha - Q h \sin \alpha = 0.$$

Jagades kogu võrrandi $\cos \alpha$ -ga ning arvestades, et sulgavaldis on valemi (3) põhjal 0, saame

$$P' l_1 = Q h \operatorname{tg} \alpha.$$

Siit

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P' l_1}{Q h}.$$

Korrutades võrrandit suurusega R (osuti pikkus), saame vase-mal pool jaotiste arvu, mille võrra on nihkunud osuti. Seega

$$R \operatorname{tg} \alpha = s = R \frac{P' l_1}{Q h}$$

ning tundlikkus

$$\tau = \frac{s}{m'} = R \frac{l_1}{m h}. \quad (4)$$

Nagu näha on tundlikkus seda suurem, mida pikemad on kaalukangi õlad. Pealegi ei mõju suure õlapikkuse korral prisma vee-remisel tekkiv õlgade pikkuste muutus eriti tugevalt õlgade suhete väärtusele. Teiselt poolt kangi pikkuse suurenemisel kasvab tema mass kiiremini kui pikkus, kui tahetakse säilitada kangi jäikust, ja seega on tulemuseks hoopiski tundlikkuse vähenemine. Ka suureneb sellisel juhul võnkeperiood, mis toob juurde uusi mõõtmisvigu.

Tänapäeval ehitatavate täpsete kaalude õlgade pikkused ei ületa 10–12 cm ning nendega saab kaaluda 0,1 mg täpsusega, s.o. 10^{-7} täpsusega. Sellisel juhul peab ka kaalukangi õlgade suhe püsima konstantsena sama täpsusega. Kui toetava prisma serva raadius on 3 μm , siis vastab õlgade suhte muutumine 10^{-6} võrra kaldenurgale $1,5^\circ$. Seega peavad tasakaaluasendid täpse

kaalumise korral jääma selle nurga piiridesse. 20 cm pikkuse osuti korral vastab sellele nurgale 5 mm hälve skaalal. Seetõttu on konstrueeritud nii õhksummutitega kui ka elektromagnetiliste summutitega kaale, mida tuleb vihtidega koormata ainult täpsuseni 10 mg. Kui selliselt koormatud kaal prismale laeta, jääb ta tasakaaluasendisse seisma ning me võime suurendatult projekteeritud skaalalt ära lugeda milligrammid ja kümnendikud milligrammid.

Metrooloogilistel kaalumistel (etalonide võrdlemisel) kasutatakse eriti täpselt valmistatud kaalusid, mis võimaldavad määrata masse täpsusega 10^{-8} . Sellisel juhul tasakaaluasendid peavad jääma $0,045^{\circ}$ nurga piiridesse, mis vastaks skaalal 0,15 mm hälbele. Seega on masside mõõtmine üks täpsemaid mõõtmisi ja selle õppimisele tuleb pöörata erilist tähelepanu.

Enne praktilisele kaalumisele asumist tuleb hoolikalt tutvuda alljärgnevate nõuete ning juhistega.

1. Enne tööleasumist tuleb veenduda, kas kaalud on loodis. Vastasel korral nad aga loodi seada, kasutades selleks kaalude toetuskrüvisid. Loomulikult ei tohi ise seejuures toetuda kaalude aluslauale.
2. Et mitte asjata nürida toetusprismade teravaid servi, tõstatatakse kaalukang erilise seadise - arretiiri abil pisut üles ja lastakse tagasi alusele ainult siis, kui seda on kaalumiseks vaja. Arreteerimine toimub kaalude aluslaua kaskel asetseva nupu abil, mida tuleb ettevaatlikult, aeglaselt ja sujuvalt pöörata. Kasutamata seistes peavad kaalud alati olema arreteeritud.
3. Kaalud peavad olema puhtad. Seetõttu tuleb hoiduda neid kätega puudutamast ning kaalukaussidele ei tohi asetada midagi musta, märga või tulist.
4. Kaalukapi ukсед peavad olema alati suletud, neid võib avada ainult koormiste ning vihtide asetamiseks kaalukaussidele, sest vastasel korral võib kaalumist segada tuuletõmbus (kaalukausside õõtsumine).
5. Kaalusid tuleb käsitseda väga ettevaatlikult, hoidudes järskudest liigutustest ja põrutustest. Kui kaalukang või

- kausid on siiski hakanud liialt võnkuma, tuleb kaalud kohe arreteerida. Kaalukausside õõtsumise summutamiseks kasutatakse erilisi summuteid, milleks on tavaliselt võetud harjakesed.
6. Kaalutav keha asetatakse alati vasemale, vihid paremale kaalukaussile.
 7. Kaalutav koormus ei tohi ületada ettenähtud piiri. Tavaliselt on analüütilistel kaaludel selleks 200 g.
 8. Vihte ja kaalutavat keha võib asetada ja ära võtta ainult arreteeritud kaaludelt.
 9. Vihte ei tohi tõsta sõrmedega, vaid ainult näpitsaga (pintsetiga).
 10. Vihte ei tohi kunagi asetada töölauale, vaid karbist otse kaalukaussile ja sealt tagasi karpi oma kohale.
 11. Skaala nullpunktiks on soovitatav võtta äärmine vasakpoolne kriips. See väldib positiivsete ja negatiivsete arvude kasutamist nulltäpi määramisel.
 12. Lugemite võtmisel tuleb hoiduda parallaktilisest veast, s.o. tuleb vaadata otse ja hoida pead seejuures võimalikult samas asendis. Selleks tuleb istuda korralikult otse kaalu ette ja kaalumise vältel mitte muuta keha ega pea asendit. Vaatlused teha ühe ja sama silmaga.
 13. Võnkumiste amplituud ei tohi olla liiga suur, mitte üle 5 jaotise. Kui kaalud on ebasoovitavalt tugevasti võnkuma hakanud, tuleb neid korduvalt arreteerida ja uuesti ettevaatlikult avada, siis võnkumised sumbuvad. Edaspidi avada ettevaatlikumalt!
 14. Esimest 3...4 võnget pärast arretiiri vabastamist mitte lugeda.

Kirjandus

Lang, J. jt. Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, §§ 37...40, lk. 74...87.

KERGE KEHA MASS

1. Tööülesanne

Analüütiliste kaalude ehitusega, korrasolekuga ning käsitsemisega tutvumine. Nulltäpi ja tundlikkuse määramine. Kerge keha kaalumine.

2. Töövahendid

Analüütilised kaalud, kerge keha.

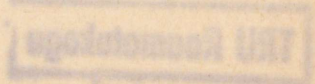
3. Töö teoreetilised alused

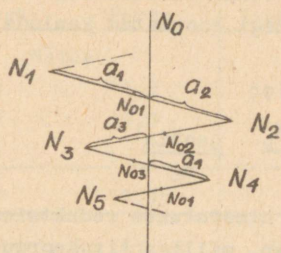
Kõigepealt tutvume analüütiliste kaalude ehituse, teooria ja käsitsemisega käesolevas kogumikus lk. 45 jj.

Kaalukang on tasakaaluasendis püsivas tasakaalus, s.o. kaalukangi raskuskese asetseb sel juhul otse toetuspunkti all. Sellele vastavat osuti asendit skaalal nimetatakse nulltäpiks. Seega on nulltäpp N_0 koormamata kaalude tasakaalutäpp.

Hõõrdumise tõttu ei jää osuti tasakaaluasendis just nulltäpile. Ka võtab võnkumise sumbumine tublisti aega. Seepärast on täpsem ja kiirem määrata nulltäpp skaalal tema võnkeamplituudide kaudu. Selleks lastakse kaalud arretiiirist vabastamise teel sobiva häälbega võnkuma. Aeglase sumbumise korral võime väikese ajavahemiku jooksul üksteisele järgnevate amplituudide kahanemisi pidada võrdseiks (vt. joonis 11). Kui võtaksime nulltäpiks kahe esimese amplituudi aritmeetilise keskmise - $N_{01} = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$, siis asetseks see tema õigest asendist vasakul, kuna $a_1 > a_2$. Võttes nulltäpiks $N_{02} = \frac{1}{2}(a_2 + a_3)$ satuks see aga ta õigest asendist paremale, sest $a_2 > a_3$. Tegelikule nulltäpile lähema väärtuse saame, kui võtame neist mõlemast aritmeetilise keskmise, s.o.

$$\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}(a_1 + a_2) + \frac{1}{2}(a_2 + a_3) \right] = \frac{1}{4}(a_1 + 2a_2 + a_3). \quad (1)$$





Joonis 11.

Suurema täpsuse saamiseks võetakse tavaliselt 2 või enam täisvõnget. Nii saame kahe täisvõnke korral 5 erinevat amplituudi ehk 5 pöördetäppi (N_1, N_2, N_3, N_4, N_5). Seega

$$N_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{N_1 + N_2 + N_5}{3} + \frac{N_2 + N_4}{2} \right]. \quad (3)$$

Tundlikkuse määramiseks tuleks meil üht kaalukangi õlga koormata mõnemilligrammise lisakoormusega, määrata sellele vastav tasakaalutäpi erinevus nulltäpist ning taandada see ühele milligrammile.

Harilikult on vähimaks vihiks komplektis 10 mg, mida ei saa tundlikkuse määramiseks kasutada, kuna hälve sellisel juhul ületaks skaala ulatuse. Seetõttu on võetud kasutusele nn. ratsur, milleks on hargina kõveraks käänatud 10 mg massiga traaditükk (joon. 12). Kaalukang või sellega ühendatud varb on jaotatud kümneks võrdseks osaks ning varustatud ratsuri jaoks kriipsude või sälkudega. Ratsuri vastavale kohale asetamine toimub erilise liikuva konksukese abil.



Joonis 12.

Ratsuri asetamine 10. jaotisele, mis asetseb kaalukaasi toetuskohal, vastab järelikult õla koormamisele tema kogu väärtusega, s.o. 10 mg. Ratsuri asetamine poolele kogu õla pikkusest (5. jaotisele)

Samale tulemusele jõuame, võttes aritmeetilise keskmise vasakpoolsetest amplituudidest a_1 ja a_3 ning siis omakorda aritmeetilise keskmise saadud keskmisest ning parempoolsest amplituudist a_2 , s.o.

$$\frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}(a_1 + a_3) + a_2 \right] = \frac{1}{4}(a_1 + 2a_2 + a_3). \quad (2)$$

Tõepoolest ühtivad tulemused (1) ja (2) ning me kasutame teist kui lihtsamat moodust.

kutsub esile samuti kaks korda väiksema pöördemomendi, mis vastab koormusele 5 mg, jne. Seega saame ratsuri abil koormata kaalusid 0...10 mg. Nii määramegi koormatud kaalude tasakaalutäpi N_p .

Tundlikkus on arvutatav valemist

$$\tau_0 = \frac{N_0 - N_p}{m} \frac{\text{jaotis}}{\text{mg}} \quad (4)$$

Tundlikkuse pöördväärtust $\frac{1}{\tau_0}$ nimetatakse reduktsiooni- ehk taandamisteguriks ning ta näitab, millise lisakoormuse mõjul nihkub tasakaalutäpp edasi ühe jaotise võrra. Tema ühik on seega $\frac{\text{mg}}{\text{jaotis}}$.

Kui ratsur on asetatud kaalukangi vasakule poolele, siis tasakaalutäpp N_p nihkub paremale ja $N_p > N_0$. Sel juhul tuleb tundlikkus määrata hälbe $N_p - N_0$ abil, kuna negatiivsel tundlikkusel ei ole mõtet.

Teades kaalude tundlikkust, saame lihtsalt määrata kerge (mõne milligrammise) keha massi. Selleks määrame tema koormatud kaalude tasakaalutäpi N_k analoogiliselt ratsuriga koormamisele.

Kui 1 mg koormise mõjul tasakaalutäpp nihkus τ jaotist ja antud keha korral $N_0 - N_k$ jaotist, siis antud keha mass peab olema niisama suur, kui mitu korda mahub τ vahemikku $N_0 - N_k$. Seega

$$x = \frac{N_0 - N_k}{\tau} \quad (5)$$

4. Töö käik

1. Tutvuge kaalumisreeglitega ja kaalude käsitlemisega.
2. Laske kaalud arretiirist vabastamise teel väikese hällbega võnkuma. Pärast paari võnget alustage hällvete määramisega. Mõõtmisi korrake 3 korda ja kandke tulemused tabelisse:

I. Koormamata kaalude nulltäpp						N_0
Vasak		Parem		Vasak		Parem
Näide						
8,9	11,2					
9,0	11,1					
9,1						
9,0	11,15					
$N'_0 = \frac{9,0 + 11,15}{2} = 10,1$		$N''_0 = \dots$		$N'''_0 = \dots$		

$$\text{Keskmine: } N_0 = \frac{N'_0 + N''_0 + N'''_0}{3} = \dots$$

Nii leitud keskmine nulltäpp peab paiknema skaala keskkohas, s.o. ühe jaotise piires keskkohast (10) vasakule või paremale (9,0...11,0). Kui erinevus on üle ühe jaotise, tuleb pöörduda juhendaja poole.

3. Koormake kaalusid ratsuri abil mõnemilligrammise koormusega ja määrake kaalude tasakaalutäpp kolme erineva koormuse korral:

II. Ratsuriga koormatud kaalude tasakaalutäpp						N_p
$m_1 = \dots$		$m_2 = \dots$		$m_3 = \dots$		
Vasak		Parem		Vasak		Parem
$N'_p = \dots$		$N''_p = \dots$		$N'''_p = \dots$		
$\tau' = \frac{N_0 - N'_p}{m_1}$		$\tau'' = \dots$		$\tau''' = \dots$		

$$\text{Keskmine } \tau = \frac{\tau' + \tau'' + \tau'''}{3} = \dots$$

$$\text{Reduktsioonitegur: } \frac{1}{\tau} = \dots$$

4. Küsige juhendajalt kerge keha. Asetage see vaekausile ja määrake kaalude tasakaalutäpp kolmel korral:

III. Kerge kehaga koormatud kaalude tasakaalutäpp N_k					
Vasak	Parem	Vasak	Parem	Vasak	Parem
$N_k' = \dots$		$N_k'' = \dots$		$N_k''' = \dots$	

$$\text{Keskmine } N_k = \frac{N_k' + N_k'' + N_k'''}{3} = \dots$$

5. Määrake keha mass valemit (5) kasutades.
 6. Kontrolliks määrake veel kord koormamata kaalude nulltäpp. Kui nulltäpi erinevus on üle jaotise, siis tuleb pöörduda juhendaja poole.

IV. Nulltäpi kontroll N_0

Vasak	Parem

$$N_0 = \dots$$

4. Küsimused

1. Mida nimetatakse keha raskuseks?
2. Kas kangkaaludega saab määrata keha massi või raskust?
3. Kas kaalumise tulemus sõltub kaalude asukohast?
4. Miks tuleb kaalud seada loodi?
5. Mida nimetatakse kaalude nulltäpiks?
6. Kuidas toimub nulltäpi määramine?
7. Miks ei tohi nulltäpp olla toetuspunkti läbivast vertikaalset palju kõrval?
8. Mis on kaalude tasakaalutäpp ja kuidas teda määrata?
9. Miks tuleb null- ja tasakaalutäpi määramisel kasutada täisarvu täisvõnkeid?
10. Miks ei tohi võnkumise amplituud olla liiga suur?
11. Mis on kaalu tundlikkus ja kuidas seda määrata?
12. Avaldage tundlikkus 0,5 $\frac{\text{jaotis}}{\text{mg}}$ ühikutes $\frac{\text{jaotis}}{\text{g}}$.
13. Kas antud kaalu tundlikkus sõltub ka kaalu koormusest?
14. Mida mõeldakse kaalu täpsuse all?
15. Mispärast tuleb kaalumise lõpetamisel teha nullpunkti kontroll?
16. Defineerige njuuton ja düün.
17. Milleks kasutatakse kaaludel ratsurit?
18. Kui suure täpsusega saime kaaluda antud kaaludel?

5. Kirjandus

- Putilov, K.A. Füüsika I, § 30, lk. 116...118.
- Lang, J. jt. Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, §§ 37...40, lk. 74...87.
- Савельев И.В. Курс общей физики I, § 46...48, стр. 144...150.
- Яворский Б.М. и др. Курс физики I, § 6, I, стр. 98...104.

KEHA KAAL

1. Tööülesanne

Vihtide käsitlemise oskuse omandamine. Keha kaalumise õhus ja selle kaudu keha kaalu arvutamine vaakuumis.

2. Töövahendid

Analüütilised kaalud, vihid ja kaalutav keha.

3. Töö teoreetilised alused

Enne kui asuda keha kaalumisele, on tarvis teada järgmist kaaluvihtidest ja nende käsitlemisest.

Et kaalumisel oleks hõlpus mistahes keha tasakaalustamiseks kiiresti valida vajalik hulk vihte, selleks korraldatakse sobivas suuruses vihid erilistesse vihtide komplektidesse. Üldiselt kasutatakse komplektide moodustamisel järgmiselt reastatud üksikvihte:

10 g,	20 g,	20 g,	50 g,
1 g,	2 g,	2 g,	5 g,
100 mg,	200 mg,	200 mg,	500 mg,
10 mg,	20 mg,	20 mg,	50 mg.

Vihid peavad olema karpi asetatud alati normaalses suurus järjekorras.

Otsitavale massile vastava vihtide rühmituse moodustamist alatu alati võimalikult suure sobiva vihi valikuga ning samal viisil jätkatagu valikut järjest väiksemate vihtide suunas. Näiteks 175-grammise massi moodustamisel on suurimaks sobivaks vihiks 100g; 75 g jaoks 50g; 25 g jaoks 20g jne. Seega $175\text{ g} = 100\text{ g} + 50\text{ g} + 20\text{ g} + 5\text{ g}$.

Et kiirendada sobivate vihtide valikut, on kasulik määrata antud keha kaal lihtsate kaalude abil vähemalt 1 g täpsusega. Olgu see näiteks 85 g. Nüüd asetatakse kaalutav keha arreteeritud kaalude vasakule vaekausile ja paremale vaekausile sellisel hulga vihte, milliste kogumass võrdub eelkaalumise tulemusega (85g). Arretiiri osaline ettevaatlik vabastamine näitab kohe, kas võetud vihte on palju või vähe. Kui vasak vaekauss langeb alla ja 1-grammine lisakoormus paremal kaalub

ta üles, siis on kaalumise käik õige ja tuleb asuda murrulise osa esimese kümnendkoha - kümnendike grammide arvu määramisele.

Seda tehakse katsetamise teel alati suurematest vihtidest järjest väiksemate suunas. Kui asetame vaekausile näiteks 500 mg ja arretiiri ettevaatlikul osalisel vabastamisel parem pool vajub alla, siis on 500 mg palju. Võttes aga suuruselt järgmise väiksema vihi (200 mg) näeme, et parempoolne vaekauss ei vaju enam alla. Järelikult 200 mg on vähe. Nüüd lisame vaekausile veel 200 mg. Kui vaekauss langeb alla, siis on 200 + 200, s.o. 400 mg palju. 100 mg, s.o. kokku 300 mg lisandamisel aga ei lange vaekauss alla. Järelikult on kümnendike grammide arv 3 ja me võime asuda sajandike grammide (kümnente milligrammide) määramisele, mis toimub samasugusel viisil kui kümnendike (sadade milligrammide) määraminegi. Olgu sajandike arv 4. Siis oleme saanud antud keha kaalu jaoks arvu 85,34 g, mis määrab selle 0,01g täpsusega. Kui tahame edasi leida ka kolmanda kümnendkoha, siis kasutame vastavate vihtide puudumise tõttu ratsurit, asetades selle nõnda, et tasakaalutäpp (vt. lk. 55) N_1 asetseks võimalikult nulltäpi (vt. lk. 55) N_0 läheduses. Ratsuri selline asend annab meile kätte tuhandikkohtade ligikaudse väärtuse. Nende täpselt määramiseks on tarvis kasutada sama võtet kui kerge keha kaalumisel. Määrame tasakaalutäpi N_1 ja suurendame (vähendame) ratsuri edasinihutamisega parempoolse vaekausi koormist mõne milligrammi võrra nõnda, et uus tasakaalutäpp N_2 nihkuks teisele poole koormamata kaalude nulltäppi N_0 .

Olgu tasakaalutäpile N_1 vastav vaekausi koormus $m_1 = 85,346$ g ja tasakaalutäpp $N_1 = 11,6$. Teisel juhul: $m_2 = 85,349$ g ja $N_2 = 8,2$. Koormuse suurenemine $m_2 - m_1 = 3$ mg võrra nihutas tasakaalutäppi vasakule $N_1 - N_2 = 3,4$ jaotise võrra. Need andmed võimaldavad määrata koormatud kaalude tundlikkuse:

$$\tau = \frac{N_1 - N_2}{m_2 - m_1} = 1,13 \left(\frac{\text{jaotis}}{\text{mg}} \right). \quad (1)$$

Viimane tulemus võimaldab meil aga juba üksnes arvutamise teel leida kaalutava keha massi 0,1 mg täpsusega. Selleks on tarvis teada koormamata kaalude tasakaalutäppi - nulltäppi N_0 . Olgu see antud näites: $N_0 = 9,8$. Järelikult kaalude viimiseks tasakaaluasendisse on koormusele m_1 tarvis lisada

$$\frac{N_1 - N_0}{\tau} = \frac{1,8}{1,13} \approx 1,6 \text{ (mg)}$$

või vähendada koormust m_2

$$\frac{N_0 - N_2}{\tau} = \frac{1,6}{1,13} \approx 1,4 \text{ (mg)}$$

võrra

$$m = 85,3476 \text{ g.}$$

Selleks et määrata keha kaalu, on tarvis teada raskuskii-
rendust kaalumise kohas g :

$$P = mg.$$

Sellisel viisil saadud tulemus on nn. keha kaal õhus. Kaalumine nagu kogu meie tegevus toimub õhuga täidetud ruumis. Järelikult kaalutavale kehale kui ka vihtidele mõjub õhu üleslülkejõud (Archimedese seadus), mida keha kaalu arvutamisel vaakuumis on vaja arvestada.

Et leida keha kaalu vaakuumis, ei ole tarvis kaalumist läbi viia tühjas ruumis, vaid piisab selle kaalumisest õhus ning üleslülkejõudude arvestamisest.

Olgu kaalutava keha kaal vaakuumis P_t , kaal õhus P , ruumala V_t ja tihedus D . Kui kaalu tasakaalu korral vaakausil olevate vihtide ruumala on V ja tihedus d , siis kehale ja vihtidele mõjuvad üleslülkejõud on vastavalt

$$V_t \rho g = \frac{P_t}{g D} \rho g \quad \text{ja} \quad V \rho g = \frac{P}{g d} \rho g,$$

kus ρ on õhu tihedus. Neid üleslülkejõudusid arvestades võib kaalude tasakaalutingimuse üles kirjutada järgmiselt:

$$P_t - \frac{P_t}{D} \rho = P - \frac{P}{d} \rho,$$

millest leiame keha kaalu vaakuumis P_t jaoks avaldise:

$$P_t = P \frac{1 - \frac{\rho}{d}}{1 - \frac{\rho}{D}} \quad (2)$$

Avaldisest (2) on näha, et keha kaal vaakuumis on suurem tema kaalust õhus siis, kui $D < d$, ja väiksem, kui $D > d$. Korgi korral on $D = 0,24 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ ja valgevasest vihtide korral $d = 8,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$. Õhu tiheduseks toatemperatuuril võib normaalrõhu korral võtta $\rho = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$. Täpsemate kaalumiste korral (täpsus 10^{-5} ja suurem) on siin antud tiheduste väärtused tarvis asendada 10 kuni 1000 korda täpsematega, s.t. tuleb arvestada ka õhurõhku, temperatuuri, niiskust, CO_2 sisaldust jne.

4. Töö käik

1. Tutvuge analüütiliste kaalude ehitusega ja nende kasutamise reeglitega (vt. lk. 45 jj.).
2. Seadke kaaluvihid karbis normaalsesse suuruste järjekorda.
3. Kaaluge keha tehnilistel kaaludel 1 g täpsusega.
4. Määrake kaalude nulltapp (vt.lk. 55 kolmel korral ja kandke andmed tabelisse:

Vasak	Parem	Vasak	Parem	Vasak	Parem

$$N_0 = \dots\dots$$

5. Asetage uuritav keha ja kaaluvihid arreteeritud kaalude vastavatele vaekaussidele, kusjuures vihte võtke sellisel hulgal, et nende kogumass võrduks eelkaalumisel leitud massiga.

6. Määrake (nii nagu on selgitatud töö teoreetilises osas) kaalude parem tasakaalutäpp N_1 kolmel korral ja kandke tulemused tabelisse.

Vihid: $m_1' = \dots$ Ratsur: $m_1'' = \dots$; $m_1 = m_1' + m_1'' = \dots$

Vasak	Parem	Vasak	Parem	Vasak	Parem

$N_1 = \dots$

7. Määrake kaalude vasak tasakaalutäpp N_2 .

Vihid: $m_2' = \dots$ Ratsur: $m_2'' = \dots$; $m_2 = m_2' + m_2'' = \dots$

Vasak	Parem	Vasak	Parem	Vasak	Parem

$N_2 = \dots$

8. Kontrollige nulltäppi:

Vasak	Parem

$N_0 = \dots$

9. Arvutage kaalude tundlikkus τ valemist (1) ja keha kaal õhus valemist

$$P = (m_1 + \frac{N_1 - N_0}{\tau}) g = (m_2 - \frac{N_0 - N_2}{\tau}) g.$$

10. Leidke keha kaal vaakumis valemi (2) abil.

5. Küsimused

1. Mis on keha kaal?
2. Mis on keha mass?
3. Mis on keha raskus?
4. Sõnastage Archimedese seadus.
5. Missugustel tingimustel võrdub keha kaal vaakumis vihtide kaaluga vaakumis?
6. Missugustel tingimustel on võrdraskused kehad ka võrdmassilised?
7. Miks praktikas (kauplustes, apteekides) ei arvestata tegelikult kehade kaalu vaakumis?
8. Kuidas oleneb keha kaal õhus õhurõhust?
9. Kui palju kaalub õhk inimese keha (75 kg) ruumala suuruses?
10. Kui suur on keha mass, kui tema raskus on 10 kG kohas, kus raskuskiirendus on $9,9 \frac{m}{s^2}$?
11. Millise vihtide kombinatsiooniga on reeglipärane 147,860 g valida kaalude vaekausile?

6. Kirjandus

Lang, J. jt. Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, §§ 37...41, lk. 74...96.

TAHKE KEHA TIHEDUS

1. Tähtsõnad

Määrata tahke keha tihedus hüdrostaatilise kaalumise teel.

2. Tööriistad

Analüütilised kaalud, tahke keha, vihid, "sild" ja veeanum.

3. Töö teoreetilised alused

Keha tiheduse määramiseks on tarvis teada tema massi m ja ruumala V . Keha massi võib analüütilistel kaaludel leida täpsusega 10^{-7} , kuid ruumala määramine sellise täpsusega on väga raske, eriti siis, kui kehal on mittekorrapärase kuju. Seepärast kasutatakse keha tiheduse täpseks määramiseks sellist meetodit, milles keha ruumala määratakse mitte otsese, vaid kaudse mõõtmise teel.

Keha ruumala võib määrata Archimedese seadust kasutades, mille järgi vedelikku asetatud kehale mõjub üleslükkejõud, mis on võrdne keha poolt väljatõrjutud vedelikuhulga raskusega. Kaalume esmalt keha õhus (m_1) ja siis vees (m_2).

Kirjutame üles kaalude tasakaalu tingimuse juhul, kui kaalutav keha asub õhus:

$$m g - \rho_1 g V = m_1 g - \rho_1 g \frac{m_1}{d}, \quad (1)$$

kus ρ_1 on õhu tihedus, $\frac{m_1}{d}$ - kaaludele asetatud vihtide ruumala (d on vihtide tihedus).

Kui keha on asetatud vedelikku tihedusega ρ_2 , siis tasakaalu tingimuseks saame:

$$m g - \rho_2 g V = m_2 g - \rho_2 g \frac{m_2}{d}. \quad (2)$$

Võrranditest (1) ja (2) võime leida keha ruumala jaoks avaldise

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_2 - \rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{d}\right). \quad (3)$$

Keha tiheduse arvutame valemist

$$D = \frac{m}{V}, \quad (4)$$

kusjuures keha massi arvutame valemist (vt.lk. 61).

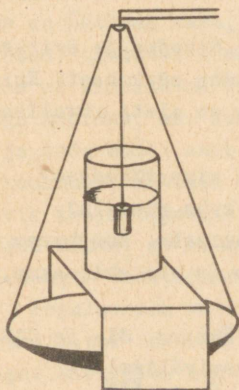
$$m = m_1 \frac{1 - \frac{\rho_1}{d}}{1 - \frac{\rho_1}{D}}. \quad (5)$$

Asetades avaldised (3) ja (5) valemisse (4) ja lahendades saadud võrrandi tiheduse D suhtes, saame:

$$D = \frac{m_1}{m_1 - m_2} (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \quad (6)$$

4. Töö käik

1. Määrake kaalude nulltäpp (vt.lk. 55).
2. Kaaluge uuritav keha õhus (m_1) nii, nagu on kirjeldatud töös "Keha kaal" (lk. 58).
3. Võtke kaks ühesugusest materjalist ja ühesuguse läbimõõdu ning pikkusega (~ 10 cm) traaditükki, milledest üks asetage analüütiliste kaalude paremale vaekausile ja teisega riputage uuritav keha vasaku vaekausi konksu otsa nii, nagu on näidatud joonisel 13.



Joonis 13.

4. Asetage üle vaekausi "sild" ja paigutage sellele anum destilleeritud veega.
5. Laske kaalutav keha ettevaatlikult vette nõnda, et ta vees olles ei puudutaks anuma seinu ja asuks üleni vees. Kui keha külge on jäänud õhumulle, tuleb need kõrvaldada kas keha liigutamisega vees või vastava pulgakese abil.
6. Leidke kaalumise teel vihtide mass m_2 , mis tasakaalustab vette asetatud keha nii nagu kaalumise korral õhuski, kusjuures nulltäpi määramist enne kaalumise asumist ei ole tarvis korraldada.
7. Määrake vee temperatuur t .
8. Kontrollige nulltäppi.
9. Arvutage keha tihedus valemi (6) abil, kasutades vee tiheduse leidmiseks järgmist tabelit.

Temperatuur °C	Tihedus $\frac{g}{cm^3}$	Temperatuur °C	Tihedus $\frac{g}{cm^3}$
10	0,9997	18	0,9986
11	0,9996	19	0,9984
12	0,9995	20	0,9982
13	0,9994	21	0,9980
14	0,9992	22	0,9978
15	0,9991	23	0,9976
16	0,9990	24	0,9973
17	0,9988	25	0,9971

5. Küsimused

1. Mida nimetatakse aine tiheduseks?
2. Mida nimetatakse aine eriraskuseks?
3. Kuidas on omavahel seotud sama aine tihedus ja eriraskus?
4. Kas tihedus ja raskus sõltuvad ka keha asukohast? Kuidas?
5. Kas antud aine tihedus ja eriraskus on alati arvuliselt võrdsed?
6. Kuidas saab põhimõtteliselt määrata aine tihedust?
7. Kuidas saab kaalumise teel määrata keha ruumala?
8. Tuletage valem aine tiheduse arvutamiseks, kusjuures valemite esinevateks suurusteks on õhu ja vee eriraskus, kaal õhus ning kaal vees.
9. Millised on tiheduse ja eriraskuse ühikud SI- ja CGS-süsteemis ning mitesüsteemset (süsteemiväliselt)?
10. Määrake, kumb eriraskuse ühik, kas $\frac{N}{m^3}$ või $\frac{kgf}{dm^3}$ on suurem.
11. Väljendage vee, õhu, raua ja elavhõbeda tihedus ning eriraskus CGS- ja SI-süsteemis.
12. Tuletage tiheduse ja eriraskuse dimensioonvalemid.
13. Kuidas oleneb keha tihedus (eriraskus) temperatuurist?
14. Sõnastage Archimedese seadus.
15. Kas piisab käesoleva töö tulemuse arvutamisel arvutuslükati täpsusest?

6. Kirjandus

Lang, J. jt. Füüsika praktikum, §§ 42, 43, lk. 96...100.

Метс Г. и др. Лабораторные работы по физике I, стр. I7...
20.

MOHRI KAALUD

1. Tööülesanne

Mohri kaalude ehitusega ja kasutamisega tutvumine. Uri-
tava vedeliku erikaalu määramine.

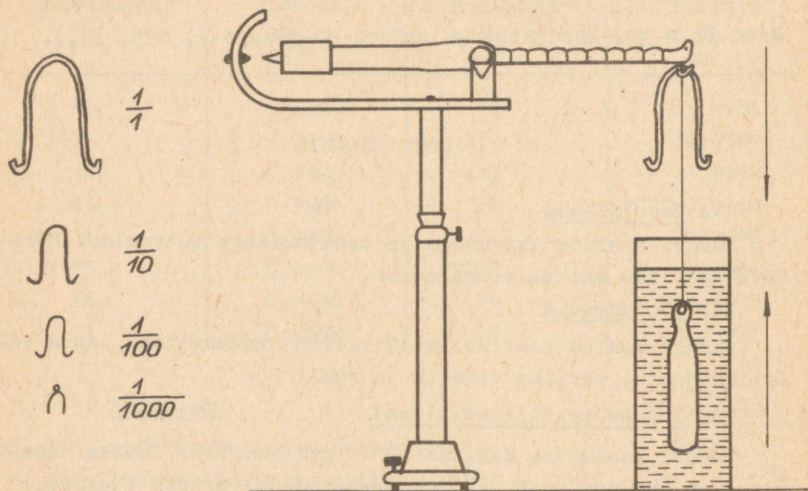
2. Töövahendid

Mohri kaalud koos sobivalt valitud ratsuritega, anum ve-
deliku jaoks, uuritav vedelik ja vesi.

3. Töö teoreetilised alused

Mohri kaalud on kangkaalud (vt. joon. 14). Üheks kaalu
õlaks on ühtlane varb, mis on vastavate märgetega (täkked,
kriipsud) jaotatud kümneks võrdseks osaks. Kümnenenda jaotuse
kohale on kinnitatud konks, mille otsa riputatakse sobiva suu-
rusega koormus, nn. sukelduja. Teine kaalu õlg on keerme-
statud ja seda mööda saab nihutada sukeldujat tasakaalustavat jää-
vat koormust, ühtlasi aitab selle kaalu õla külge kinnitatud
teravik kaale täpsemalt tasakaalustada. Kaalud tuleb lauale
asetada nõnda, et aluses asetsev reguleerimiskruvi oleks
kaalukangi võnketasandis. Selle kruvi abil saab kaalude sta-
tiivi reguleerida vertikaalseks ning siis peab kangi õla kül-
ge kinnitatud teravik olema vastakuti alusega ühendatud tera-
vikuga. Nii tuleb iga kord enne tööle asumist kaalud õhus ta-
sakaalustada, nihutades vastavalt jäävat koormust ja aluse re-
guleerimiskruvi.

Kui nüüd kaalude alla asetada anum (vt. joon. 14) puhta
veega nii, et sukelduja oleks täielikult vees, siis kaa-
lud ei ole enam tasakaalus ning kaalukang hakkab pöörlema.
Pöörlemist tingiv jõumoment on tekitatud vedelikku asetatud
kehale mõjuvast üleslükkejõust. Selle momendi (M_1) saame an-
tud juhul arvutada valemi järgi:



Joonis 14.

$$M_1 = e_1 V l,$$

kus e_1 on vee erikaal, V - sukelduja ruumala, l - kaalukangi (10 jaotist) pikkus.

Et kaalud uuesti tasakaalustada, selleks tuleb tekitada üleslükkest tingitud jõumomendile vastassuunaline, kuid võrdse suurusega jõumoment (võrdvastupidine jõumoment). Selleks kasutatakse antud juhul ratsureid. Ratsurid on tehtud kolme liiki: kõige suurema kaal võrdub ligikaudu vee kaaluga sukelduja ruumalas, järgmine on sellest kümme korda kergem ja veel järgmine on eelmisest 10 ehk esimesest 100 korda kergem. Kui võtta ratsurite poolt tekitatud jõumomentide hindamisel aluseks suurima ratsuri poolt 10. jaotisel tekitatud jõumoment $M = P l$, kus P on suurima ratsuri kaal ja l - kaalukangi (10 jaotist) pikkus, siis saab kõik teised ratsurite poolt tekitatud jõumomendid anda M osadena $k M$. Näiteks tekitaks siis

suurim ratsur 7. jaotisel jõumomendi suurusega 0,7 M. Suurimast 10 korda kergem ratsur annab aga 7. jaotisel jõumomendi, mille suurus on 0,07 M. Kui kasutada korruga mitut ratsurit, siis nende poolt tekitatud kogumoment on võrdne üksikute ratsurite poolt tekitatud jõumomentide summaga.

Kui oleme ratsuritega tasakaalustanud üleslükkest tingitud jõumomendi, siis kehtib võrrand

$$k_1 M = e_1 V l, \quad (1)$$

kus k_1 näitab, mitmendik osa aluseks võetud jõumomendist M oli vaja vee poolt tekitatud üleslükkemomendi tasakaalustamiseks.

Asetades nüüd veeanuma asemele anum uuritava vedeliku, muutub üleslükkemoment ning $M_2 = e_2 V l$. Tasakaalustades üleslükkemomendi ratsuritega, saame uue tasakaalustava momendi $k_2 M$ ning kehtib võrrand

$$k_2 M = e_2 V l. \quad (2)$$

Jagades võrrandi (2) võrrandiga (1) saame:

$$\frac{k_2 M}{k_1 M} = \frac{e_2 V l}{e_1 V l},$$

kust

$$e_2 = e_1 \frac{k_2}{k_1}. \quad (3)$$

Teades vee erikaalu ning mõõtnud suurused k_1 ja k_2 , võime võrrandi (3) järgi arvutada uuritava vedeliku erikaalu. Täpsemate mõõtmiste juures peame arvestama ka temperatuuri, sest sellest oleneb vedeliku eriraskus.

4. Töö käik

1. Pange kaalud kokku vastavalt joonisele.
2. Pärast sukelduja riputamist vastava konksu otsa, tasakaalustage kaalud õhus.
3. Asetage kaalude alla anum veega nii, et sukelduja oleks täielikult vees. Sukelduja külge jäänud õhumullikesed kõrvaldage sukelduja liigutamisega vedelikus.
4. Tasakaalustage ratsuritega vee üleslüke ning registreerige kordaja k_1 .
5. Kõrvaldage anum veega ja kuivatage sukelduja, kontrollides ühtlasi ka kaalude tasakaalu õhus.

6. Asetage kaalude alla anum uuritava vedelikuga ning teostage mõõtmine nagu veeski.

Kaalusid tasakaalustage nii vees kui ka uuritavas vedelikus 4...5 korda. Tulemustest võtke keskmine ning leidke mõõtmisviga.

Mõõtmistulemused kanname tabelitesse.

1. Mõõtmised veega

Nr.	Suure ratsuri asend õlal	Keskmise ratsuri asend õlal	Väikese ratsuri asend õlal	Kordaja k_1
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

Keskmine $k_1 = \dots$

2. Mõõtmised vedelikuga

Nr.	Suure ratsuri asend õlal	Keskmise ratsuri asend õlal	Väikese ratsuri asend õlal	Kordaja k_2
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

Keskmine $k_2 = \dots$

5. Küsimused

1. Erikaalu ja tiheduse mõiste.
2. Erikaalu ja tiheduse vaheline seos.
3. Erikaalu sõltuvus temperatuurist.

4. Jõumomendi mõiste.
5. Jäiga keha tasakaalutingimused.
6. Rõhk vedelikes ja gaasides.
7. Pascali seadus.
8. Archimedese seadus.
9. Kehade ujumistingimused.
10. Kuidas kontrollida, kas ratsurite kaalusuhted (1:10:100) on õiged?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, §§ 21, 35, 48, 113.

Lang, J. jt. Füüsika üldkursus I, §§ 89, 92, 103, 136, 139, 140.

ATWOODI MASIN

1. Tööülesanne

Ühtlaselt kiireneva sirgliikumise teepikkuse ja kiiruse arvutusvalemite ning Newtoni teise seaduse kontrollimine.

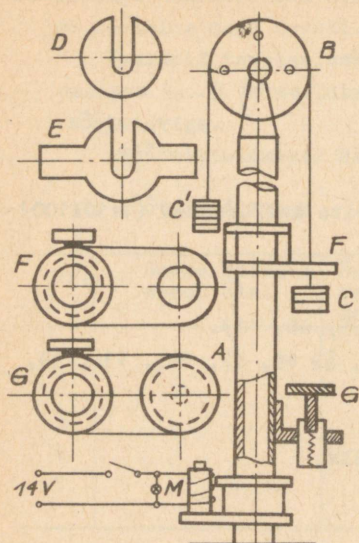
2. Töövahendid

Atwoodi masin, lülitiga elektromagnet, lisakoormused, stopper.

3. Töö teoreetilised alused

Masina põhiosadeks on seina külge kinnitatud vertikaalne metallvarb A (joon.15), millele on kantud sentimeeterjao-
tistega skaala ja tema ülemisse otsa on kinnitatud kerge alumiiniumplakk B. Hõõrdumine ploki pöörlemisel on viidud minimaalseks laagrite spetsiaalse ehitusega. Üle ploki on pandud peenike niit, mille mõlemas otsas on võrdse massiga m koormused C ja C'. Koormus C' on rauast, nii et seda võib hoida fikseeritud asendis elektromagneti M abil. Põhikoormuste C ja C' massi võib suurendada lisakoormuste D ja E abil. Varvale A on muhvide abil kinnitatud rõngasplattvorm F ja plattvorm G, nii et nad on nihutatavad vertikaalsihis.

Kui koormusele C asetada lisakoormus massiga m_1 , siis hakkab kogu süsteem ühtlaselt kiirenevalt liikuma. Süsteemi kiirenduse saab arvutada lähtudes järgmistest kaalutlustest.



Joonis 15.

Mõlemale koormusele hakkavad mõjuma kaks jõudu - raskusjõud ja niidi tõmme. Kui eeldada, et niit on venimatu, siis hakkavad mõlemad koormused liikuma suuruselt võrdsete, märgilt vastupidiste kiirendustega a . Kui niidi raskus on tühiselt väike võrreldes koormuste C ja C' raskustega ning ploki mõju liikumisele võib arvestamata jätta (kerge ning hõõrdumiseta liikuv plokk), siis loeme niidi pinged nii vasakul kui ka paremal pool ploki võrdseiks.

Newtoni teise seaduse põhjal saab neil eeldustel koormuste C ja C' jaoks kirjutada:

$$(m + m_1) a = (m + m_1)g - T \quad (1)$$

$$ja \quad m a = T - m g,$$

kus a on süsteemi kiirendus, T - niidi pinge, g - raskuskiirendus. Süsteemi lahendamisel saame:

$$a = g \frac{m_1}{2m + m_1}, \quad (2)$$

$$T = g m \frac{2m + 2m_1}{2m + m_1}. \quad (3)$$

Kiirenduse täpsemal määramisel tuleb arvestada ka ploki inertsimomenti. Niidi pinge erinevust kummalgi pool ploki peab sel juhul arvestama. Süsteemi (1) aga tuleb juurde ploki pöörliikumist arvestav võrrand. Lugeses niiti venimatuks ning tema raskust tühiseks, saadakse süsteemi (1) asemel:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_1) a_1 &= (m + m_1) g - T_2 \\ -m a_1 &= m g - T_1 \\ I \varepsilon &= \alpha m_0 r^2 \varepsilon = (T_2 - T_1) r \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

kus $I = \alpha m_0 r^2$ on ploki inertsimoment, m_0 - ploki mass, r - ploki raadius, ξ - ploki nurkkiirendus, α - ploki massi jaotusest olenev konstant. Oletades, et niit ploki pinnal ei libise, on seos ploki nurkkiirenduse ja süsteemi joonkiirenduse vahel

$$a_1 = \xi r.$$

Süsteemist (4) saame nüüd:

$$a_1 = g \frac{m_1}{2m + m_1 + \alpha m_0}. \quad (5)$$

On näha, et $a_1 < a$. Hõõrdejõudude arvestamine annaks kiirendusele veel väiksema väärtuse.

Seega hakkab Atwoodi masina koormuste süsteem liikuma kiirendusega, mille esimeses lähenduses määrab lisakoormuse mass m_1 , kusjuures $a < g$. Kui liikumise ajal kõrvaldada lisakoormus, siis liiguks süsteem hõõrde puudumisel edasi ühtlaselt kiirusega, mis tal oli lisakoormuse kõrvaldamise momendil. Vardale A kinnitatud rõngasplatvorm ongi määratud E-kujulise lisakoormuse kõrvaldamiseks (joon.15).

Atwoodi masinaga saab kontrollida ühtlaselt kiireneva sirglikumise valemeid ja Newtoni teist seadust. See ongi töö ülesandeks. Seejuures on kontroll ainult ligikaudne, sest esineb hõõrdumine.

Newtoni teise seaduse kontrollimine toimub põhimõtteliselt järgmiselt.

Kui paigutada osa põhikoormusel C asetsenud lisakoormustest üle põhikoormusele C', siis süsteemi mass ei muutu. Muutub aga süsteemi liikumisolekut mõjutav resultantjõud ja seega ka süsteemi kiirendus. Nende juhtude jaoks võib vastavalt Newtoni teisele seadusele kirjutada

$$F_1 = M a_1; \quad F_2 = M a_2. \quad (6)$$

Kiirendused a_1 ja a_2 võib aga arvutada tee läbimiseks kulunud aja kaudu:

$$s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} \quad \text{ning} \quad a_1 = \frac{2 s_1}{t_1^2};$$

$$s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2} \quad \text{ning} \quad a_2 = \frac{2 s_2}{t_2^2}. \quad (7)$$

Võrreldes seostest (6) ja (7) arvatud kiirenduste a_1 ja a_2 suhet, saame

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{s_1 t_2^2}{s_2 t_1^2}.$$

Kui läbitud teepikkused s_1 ja s_2 on võrdsed, siis

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (8)$$

Selle seose kehtivus tähendabki Newtoni teise seaduse kehtivust.

4. Töö käik

Kogu töö ajal pidage silmas, et voolu võib elektromagnetis se lülitada ainult lühiajaliselt niikauaks, kui on hädapärast vajalik koormuse C' fikseerimiseks. Vastasel korral magnetiseerub pooli südamik ning koormused ei hakka liikuma voolu väljalülitamisel elektromagnetist.

4a. Ühtlaselt kiireneval sirglikumisel läbitud tee valemi $s = \frac{a t^2}{2}$ kontroll

1. Viige koormus C' kuni elektromagnetini M . Asetage platvorm G juhendaja poolt näidatud kaugusele s koormuse C alumisest äärest.
2. Asetage koormusele C teatud hulk lisakoormusi D ning kinnitage need.
3. Lülitage vool elektromagnetihelasse ja reguleerige süsteem algasendisse nii, et magnet hoiaks koormust C' all.
4. Laske süsteem liikuma voolu katkestamisega elektromagnetihelasse. Mõõtke aeg t , mis kulub koormustel liikumiseks kuni pörkeni platvormiga G .

Mõõtmisi korrake vähemalt kolmel teepikkuse väärtusel s , mõõtes iga kord tee läbimiseks kulunud aja t kolm korda.

Katse nr.	Läbitud tee s	Aeg t	Keskmine \bar{t}
1.		1. 2. 3.	
2.		1. 2. 3.	
3.		1. 2. 3.	

$$m_1 = \dots$$

Sama lisakoormuse m_1 korral kiirendus ei olene teepikkusest s ja ajast t [vt. valem (2)]. Järelikult peab katseviigade piires kehtima võrdus

$$a = \frac{2s_1}{t_1} = \frac{2s_2}{t_2} = \dots = \frac{2s_n}{t_n},$$

mille kehtivust kontrollige.

4b. Kiiruse valemi $v = a t$ kontroll

1. Seadke süsteem algasendisse, s.t. sellisesse asendisse, kus koormus C' asub elektromagnetil.
2. Asetage juhendaja poolt näidatud kaugusele s koormuse C ülemisest äärest rõngasplatvorm F , sellest kaugusele s' aga platvorm G .
3. Paigutage lahtiselt koormusele C teatav arv lisakoormusi.
4. Lülitage vool elektromagneti ahelasse ja fikseerige koormus C' .
5. Voolu väljalülitamisega magneti ahelast vabastage süsteem ning mõõtke koormuste kiireneva liikumise aeg t . Samuti mõõtke koormuste ühtlase liikumise aeg t' (koormuse C liikumise aeg platvormide F ja G vahel).

Mõõtmisi korrake vähemalt kolm korda.

6. Muutke teepikkusi s ja s' ning korrake mõõtmisi.
Tulemused kandke tabelisse.

$$m_1 = \dots\dots\dots$$

Katse nr.	s	t	\bar{t}	s'	t'	\bar{t}'	v
1.		1.			1.		
		2.			2.		
		3.			3.		
2.		1.			1.		
		2.			2.		
		3.			3.		
3.		1.			1.		
		2.			2.		
		3.			3.		

Süsteemi liikumiskiirus v lisakoormuste äravõtmise hetkel arvutage valemist

$$v = \frac{s' - h}{t},$$

kus h on koormuse C kõrgus.

Suurendades vahemaad koormuse ja rõngasplatvormi vahel, kasvab ka ühtlase liikumise kiirus. Kuna sama m_1 korral kiirendus on konstantne, peab katsevigade piires kehtima:

$$a = \frac{v_1}{\bar{t}_1} = \frac{v_2}{\bar{t}_2} = \dots\dots = \frac{v_n}{\bar{t}_n},$$

mille kehtivust kontrollige.

4c. Newtoni teise seaduse kontroll

1. Seose (8) kontrollimiseks asetage mõlemale põhikoormusele C' ja C lisakoormused nii, et $m_{1C} > m_{1C'}$.
2. Teostage mõõtmised nagu teepikkuse arvutuse valemi kontrollimiselgi punktis 4a.

3. Viige osa lisakoormustest C' -lt üle koormusele C , jättes süsteemi kogumassi M muutumatuks.
4. Teostage uued mõõtmised, valides samad teepikkuse s väärtused.
- Mõõtmistulemused kandke tabelisse.

$$M = \dots$$

Katse nr.	Lisakoormused ja jõud	Läbitud tees	t_1	\bar{t}_1
1.	$m_{1C} =$		1. 2. 3.	
2.	$m_{1C'} =$		1. 2. 3.	
3.	$F_1 =$		1. 2. 3.	
			t_2	\bar{t}_2
4.	$m_{2C} =$		1. 2. 3.	
5.	$m_{2C'} =$		1. 2. 3.	
6.	$F_2 =$		1. 2. 3.	

Saadud andmetest arvutage kolm suhet $\frac{\bar{t}_2^2}{\bar{t}_1^2}$, mis kõik

peavad katsevigade piires võrduma suhtega $\frac{F_1}{F_2}$. Kontrollige seda.

5. Küsimused

1. Mida nimetatakse kiirenduseks?
2. Kiirenduse ühikud.
3. Millist liikumist nimetatakse ühtlaselt muutuvaks?
4. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse valem ja graafik.
5. Ühtlaselt kiireneva liikumise teepikkuse valem ja graafik.
6. Sõnastage Newtoni II seadus.
7. Näidake, et kahe keha poolt sama aja jooksul läbitud teed on võrdelised mõjuvate jõududega, kui kehade massid on võrdsed ja pöördvõrdelised massidega, kui neile mõjuvad jõud on võrdsed.
8. Massi mõiste ja ühikud.
9. Jõu mõiste ja ühikud.
10. Inertsimomendi mõiste.
11. Seos nurkkiirenduse ja joonkiirenduse vahel.
12. Pöördliikumise põhivõrrand.
13. Lahendage süsteem (4) lõpuni, leides niidi pinged T_1 ja T_2 .

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, 1964, § 12, lk. 46.

Schults, K. Mõõtühikud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, 1968, VI ptk., lk.14.

TRIFILAARPENDEL

1. Tööülesanne

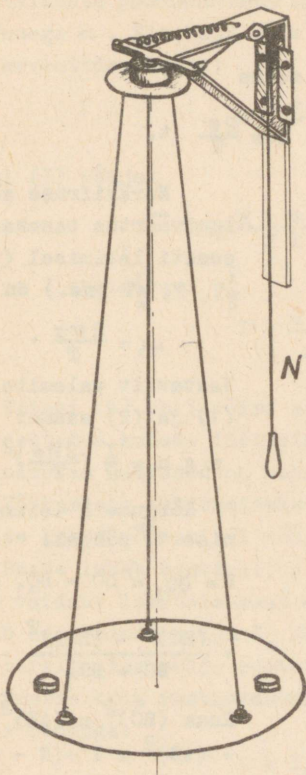
Kehade inertsimomentide määramine ja Steineri lause kontroll pöördvõnkumise abil.

2. Töövahendid

Trifilaarpendel, stopper, nihkkaliiber, katsekehad.

3. Töö teoreetilised alused

Trifilaarpendel on kolme sümmeetriliselt asetatud traadi otsas rippuv ketas (alus) (joon.16). Ülevalt on traadid kin-



Joonis 16.

tasakaaluasendi läbimise momendil. Hõõrdumist mitte arvestades võime mehaanilise energia jäävuse seaduse põhjal kirjutada:

$$\frac{I \omega_0^2}{2} = mgh. \quad (1)$$

Lugedes aluse võnkumised harmoonilisteks, võime aluse pöördenurga β jaoks kirjutada võrrandi

$$\beta = \alpha \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

nitatud ketta külge, mille läbimõõt on tunduvalt väiksem kui alusel. Alus võib sooritada pöördvõnkeid telje ümber, mis on risti alusega ja läbib tema keskpunkti. Seejuures aluse raskuskese nihkub mööda pöörlemistelge üles-alla. Võnkeperiood on määratud aluse inertsimomendi suurusega, mis muutub, kui alust koormata mingi kehaga. Seda kasutataksegi käesolevas töös.

Kui pöörata alust massiga m ühes suunas, siis tõuseb ta raskuskese kõrgusele h , s.t. ta potentsiaalne energia suureneb

$$E_1 = m g h \text{ võrra,}$$

kus g on raskuskiirendus.

Pööreldes vabalt teises suunas, omab ta tasakaaluasendit läbides kinetilist energiat

$$E_2 = \frac{I \omega_0^2}{2},$$

kus I on aluse inertsimoment, ω_0 - aluse nurkkiirus

kus α on pöördeamplituud, T - täisperiood, t - ajahetk, mille jaoks leidsime pöördenurga.

Kuna nurkkiirus

$$\omega = \frac{d\beta}{dt}, \text{ saame}$$

$$\omega = \frac{2\pi\alpha}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

Nurkkiiruse absoluutväärtus tasakaalupunkti läbimisel ($t=0, \frac{1}{2}T, T, \frac{3}{2}T$ jne.) on :

$$\omega_0 = \frac{2\pi\alpha}{T}. \quad (2)$$

Vastavalt valemitele (1) ja (2) saame:

$$m g h = \frac{I}{2} \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2. \quad (3)$$

Kõrguse h leiame joonise 17 põhjal:

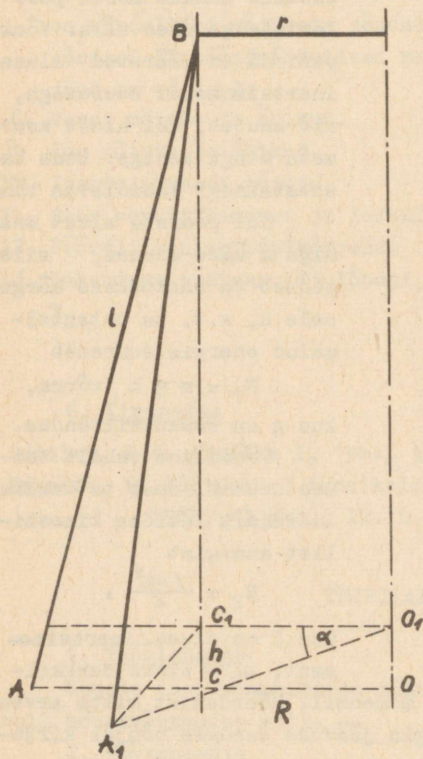
$$\begin{aligned} h &= OO_1 = BC - BC_1 = \\ &= \frac{(BC)^2 - (BC_1)^2}{BC + BC_1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuna } (BC)^2 &= (AB)^2 - \\ &- (AC)^2 = l^2 - (R - r)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (BC_1)^2 &= (BA_1)^2 - (A_1C_1)^2 = \\ &= l^2 - (R^2 + r^2 - 2Rr \cos\alpha), \end{aligned}$$

siis saame:

$$\begin{aligned} h &= \frac{2Rr(1 - \cos\alpha)}{BC + BC_1} = \\ &= \frac{4Rr \sin^2 \alpha / 2}{BC + BC_1}, \end{aligned}$$



Joonis 17.

kus l on traadi pikkus, R - aluse raadius, r - ülemise ketta raadius.

Väikeste pöördenurkade korral võib sin α asendada nurga väärtusega α . Nimetaja võib ligikaudu võtta võrdseks 2 l. Seda arvestades saame:

$$h = \frac{R r \alpha^2}{2 l}.$$

Valemi (3) põhjal

$$m g \frac{R r \alpha^2}{2 l} = \frac{I}{2} \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2,$$

siit on I avaldatav:

$$I = \frac{m g R r}{4 \pi^2 l} T^2. \quad (4)$$

Valemi (4) abil võime arvutada nii aluse enda kui ka temale asetatud kehade inertsimomendid, sest ülejäänud avaldises esinevad suurused on vahetult mõõdetavad.

Võnkumiste tekitamiseks vajalik pöördimpuls antakse ülemise ketta pööramisel nööri N abil.

Seade lubab kontrollida Steineri lause kehtivust. See lause väidab: inertsimoment mistahes pöörlemistelje suhtes võrdub inertsimomendiga I_C raskuskeset läbiva pöörlemisteljega paralleelse telje suhtes, millele on liidetud keha massi korrutis keha raskuskeskme ja pöörlemistelje vahelise kauguse a ruuduga:

$$I = I_C + m a^2. \quad (5)$$

4. Töö käik

I. Inertsimomendi määramine.

1. Tutvuge katseseadmega.
2. Mõõtke trifilaarpendli traadi pikkus l. Valemis (4) esinevate konstantide väärtused on: $m_0 = 972,5g$; $r = 2,9$ cm ja $R = 13,5$ cm.
3. Määrake tühja aluse võnkeperiood T_0 . Selleks pange alus võnkuma ja mõõtke 50...100 täisvõnke aeg (vajaliku võngete arvu annab juhendaja). Mõõtmisel ei tohi võnkeamplituud ületada $5...6^\circ$.
4. Asetage alusele uuritav keha (keha mass on märgitud kehale) ja määrake kogu süsteemi võnkeperiood T (võngete arvu annab juhendaja).

Katsed sooritage mitme katsekehaga, korrates igat katset 2...3 korda.

5. Mõõtmistulemused kandke tabelisse.

Leidke süsteemi inertsimoment I valemist (4), lugedes süsteemi massiks aluse ja keha masside summat. Katsekeha inertsimoment I_x arvutage seosest $I_x = I - I_0$, kus I_0 on tühja aluse inertsimoment.

II. Steineri lause kontroll.

6. Võtke kaks kuju ja massi poolest ühesugust keha. Asetage üks neist aluse keskpunkti ja määrake süsteemi inertsimoment.

7. Asetage mõlemad kehad sümmeetriliselt alusele, nii et alus ei oleks kaldu. Mõõtke kehade tsentrite vaheline kaugus. Määrake süsteemi inertsimoment.

8. Mõlemat katset korrata 2...3 korda.

Tulemused kandke tabelisse. Steineri lause kontrollimiseks võrrelge valemist (5) arvutatud inertsimomendi väärtust mõõdetud inertsimomendi väärtusega.

9. Arvutage suhteline viga

$$\frac{I_{\text{teor}} - I_x}{I_{\text{teor}}}$$

Aluse inertsimomendi määramine	Võngete arv		Aeg				T_0		I_0	
			t_1	t_2	t_3	Keskm.				
Keha inertsimomendi määramine	Katsekeha nr.	Võngete arv					T	m	I	I_x
Steineri lause kontroll										

Katsekeha kaugus pöörlemisteljest $a = \dots$

Katsekeha inertsimoment, arvatatud valemist (5) $I_{\text{teor}} = \dots$

5. Küsimused

1. Mida nimetatakse materiaalse punkti inertsimomendiks?
2. Mida iseloomustab keha inertsimoment?
3. Millega võrdub kera inertsimoment kera keskpunkti läbiva telje suhtes?
4. Millega võrdub füüsikalise pendli inertsimoment riputuspunkti läbiva telje suhtes keral, mille mass on m ja raadius r ning pendli niidi pikkus l ?
5. Pöördliikumise dünaamika põnivõrrand.
6. Millega võrdub ümmarguse ketta inertsimoment telje suhtes, mis läbib ketta keskpunkti ja on risti ketta tasapinnaga?
7. Kuidas avaldub pöörleva keha kineetiline energia?
8. Kuidas tuletada inertsimomenti mistahes keha jaoks?
9. Millest sõltub keha inertsimoment?
10. Millele põhineb antud laboratoorses töös inertsimomendi valemi tuletamine?
11. Mida nimetatakse harmooniliseks võnkumiseks? Harmoonilise võnkumise võrrand.

6. Kirjandus

Putilov, K. A. Füüsika I, 1964, §§ 36, 37, 56.

Фриш С.Э. Курс общей физики I, 1952, § 32, 33, 35.

Савельев И.В. Курс общей физики I, § 38, 62.

Стрелков С.П. Механика, 1965, § 59.

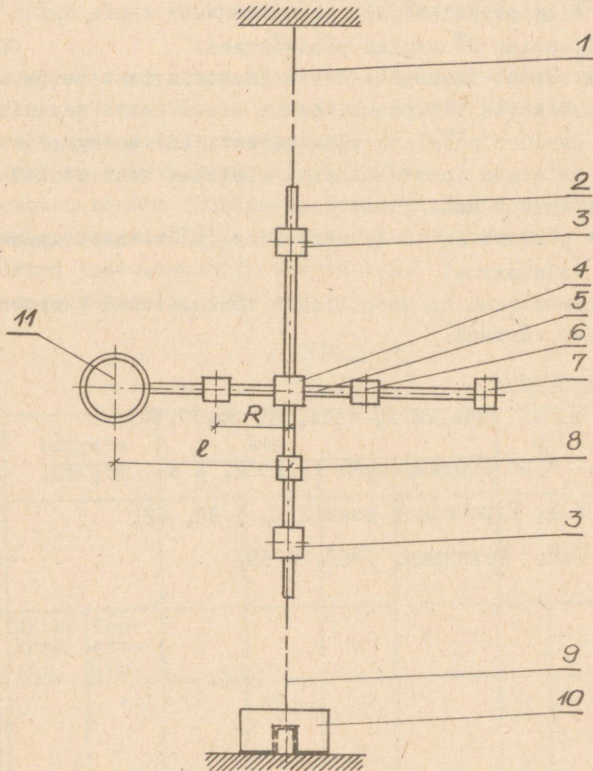
BALLISTILINE PÖÖRDPENDEL

1. Tööülesanne

Kuuli kiiruse määramine ballistilise pöördpendli abil.

2. Töövahendid

Katseseade, stopper, mõõtejoonlaud.



Joonis 18.

3. Töö teoreetilised alused

Ballistiline pöördpendel (joon.18) koosneb vertikaalsele vardale 2 muhvi 4 abil kinnitatud horisontaalsest vardast 5 silindriliste koormistega 6, mille nihutamiseega saab muuta pendli inertsimomenti. Horisontaalse varda ühes otsas on plastilise materjaliga täidetud kausike 11 ja teises otsas vastukaal 7.

Pendel on kinnitatud kronsteinile traadi 1 abil. Pendli alumisele otsale on riputatud traadi 9 abil massiivne koormus 10, mille pööramisega vertikaaltelje ümber saab pendli asetada vajalikku asendisse. Pendli pöördumisel tekib traadi deformeerumisel elastsusjõud, mille moment püüab pendlit tagasi viia tasakaaluasendisse.

Võnkuva pendli stabiilsuse suurendamiseks on vertikaalsele vardale kinnitatud koormised 3.

Pendli pöördenurga mõõtmiseks on vertikaalsele vardale asetatud peegel 8, mida saab pöörata ja nihutada üles-alla. Statiivil asuvast valgustist lähtuv valguskiir peegeldub peeglit ja tekitab skaalal valguslaigu. Pendli pöördudes libiseb valguslaik piki skaalat. Maksimaalne pöördnurk φ määratakse (arvestades valguse peegeldumise seadust) valemist

$$\varphi = \frac{a}{2s} \quad (1)$$

kus s on kaugus peeglist valguslaiguni, a - laigu maksimaalne nihe skaalal.

Valgustit toidetakse transformaatorist 8V pingega. Ohupüss pendli pöördemomendi tekitamiseks on kinnitatud toele ja suunatakse pendli kausikesele.

Kuul, tabades pendlit, paneb viimase võnkuma ümber oma vertikaaltelje. Jättes kõrvale hõõrdejõudude momendi, võime kasutada kaht jäävuse seadust.

1. Pidades põrget absoluutselt mittelelastseks, võib liikumishulkade jäävuse seaduse alusel kirjutada:

$$m v l = (I_1 + m l^2) \omega, \quad (2)$$

kus m on kuuli mass, v - kuuli kiirus, l - kuuli tabamiskoha kaugus pöörlemisteljest, ω - pendli nurkkiirus, I_1 - pendli inertsimoment.

2. Mehaanilise energia jäävuse seadusest on pärast põrget

$$\frac{(I_1 + m l^2) \omega^2}{2} = \frac{D \varphi_0^2}{2}, \quad (3)$$

kus D on elastsusjõu momendi konstant.

Neist võrrandest saame:

$$v^2 = \frac{D \varphi_0^2}{m^2 l^2} (I_1 + m l^2). \quad (4)$$

Et kuuli inertsimoment ml^2 on palju kordi väiksem kui pendli inertsimoment I_1 , siis võrrand (4) avaldub kujul:

$$v^2 = \frac{D \varphi_0^2 I_1}{m^2 l^2}. \quad (5)$$

Antud pendli jaoks saame kasutada ballistilise pendli teooriat, kui aeg τ , mille jooksul kuul mõjutab pendlit, on palju kordi väiksem pendli võnkeperioodist T ($\tau \ll T$). Samuti peavad pendli võnkumised olema harmoonilised ja selleks ei tohi pendli pöördenurk ületada $5...6^\circ$. Väikeste pöördenurkade korral $\sin \varphi \approx \varphi$ ja ballistilise pendli liikumise diferentsiaalvõrrand on esitatav kujul:

$$I_1 \ddot{\varphi} = -D \varphi,$$

kus φ on pendli pöördenurk, $\ddot{\varphi}$ - nurkkiirendus.

Selle võrrandi lahendamine annab võnkeperioodi T_1 jaoks avaldise

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{D}}. \quad (6)$$

Suuruse D elimineerimiseks muudame pendli inertsimomenti, muutes koormuste 6 kaugust pöörlemisteljest.

Siis

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{D}}, \quad (7)$$

kus T_2 on pendli võnkeperiood uue inertsimomendi I_2 puhul.

Võrranditest (6) ja (7) saame:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2}. \quad (8)$$

Tähistame inertsimomentide vahe ΔI -ga, s.t.

$$I_1 - I_2 = \Delta I. \quad (9)$$

Võrranditest (8) ja (9):

$$I_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \cdot \Delta I. \quad (10)$$

Võrranditest (5), (6) ja (10):

$$v = \frac{2g\varphi}{m l} \cdot \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \cdot \Delta I \quad (11)$$

Steineri lause põhjal

$$I_1 = I_0 + 2 M R_1^2 \quad (12)$$

ja

$$I_2 = I_0 + 2 M R_2^2, \quad (13)$$

kus I_0 on pendli inertsimoment, kui koormuste 6 inertskeskmed ühtivad pendli pöörlemisteljega; I_1 - inertsimoment, kui mõlemad koormused on kaugusel R_1 pöörlemisteljest; I_2 - inertsimoment, kui mõlemad koormused on kaugusel R_2 teljelt; M - ühe koormuse mass.

Võrranditest (12) ja (13) saame:

$$I_1 - I_2 = \Delta I = 2 M(R_1^2 - R_2^2). \quad (14)$$

Võrranditest (10) ja (13) saame otsitava kiiruse:

$$v = \frac{4g\varphi M}{m l} \cdot \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \cdot (R_1^2 - R_2^2). \quad (15)$$

4. Töö käik

1. Lõppvalemis esinevatest suurustest on antud koormuste 6 massid. Ühe silindri mass $M = \dots \pm 1$ g. Lisaks määrake kuuli mass m 1 mg täpsusega.

2. Viige koormused 6 teineteisest võimalikult kaugemale. Mõõtkende keskpunktide kaugused pöörlemisteljest R_1 .
3. Reguleerige valgustussüsteem välja nii, et skaalal oleks selgesti näha valguslaik ja see laik asuks skaala nullpunkti kohal. (Nullpunkti võite lugeda kokkulangevaks skaala otsaga.) Mõõtkende kaugus s peegli ja valguslaigu vahel.
4. Nihutage õhupüssi suu 30...40 cm kaugusele kausikesest ja laadige püss. Laadimiseks vabastage kaitseriiv ja pöörake toru alla ja taha. Sellega vinnastatakse püss: surutakse kokku tugev vedru tihedalt silindris liikuva kolvi taga. Asetage kuul tagantpoolt rauda. Seejärel pöörake toru tagasi ja kaitseriivistage.
5. Veenduge, et püss on sihitud kausikesele ja pendli horisontaalne varras on risti püssitoru suunaga. Vajutage päästikule ja laske. Määrake valguslaigu maksimaalne nihe a skaalal esimesel võnkel. Perioodi T_1 määramiseks mõõtkende 10 täisvõnke aeg t_1 .
6. Mõõtkende kuuli tabamispunkti kaugus pöörlemisteljest l .
7. Nüüd vähendage pendli inertsimomenti nihutades koormisi 6 pöörlemistelje lähedale. Mõõtkende koormiste keskpunktide kaugus R_2 pöörlemisteljest uues asendis.
8. Kõrvaldage kuul kausikesest ja laske uue kuuliga. Perioodi T_2 määramiseks mõõdame jälle 10-ne täisvõnke aja t_2 . (Teisel korral pole vaja määrata valguslaigu nihet.)
9. Valemist (15) arvutage kuuli kiirus, kusjuures massiks m tuleb võtta esimese kuuli mass. Määrake tulemuse viga.
10. Hinnake ligikaudu põrke kestust τ . Selleks mõõtkende kuuli sissetungimise sügavus d ja leidke τ seosest

$$\tau = \frac{d}{\bar{v}},$$

kus $\bar{v} = \frac{v}{2}$ on kuuli keskmine kiirus kausikesest täitvas plastilises materjalis.

Võrreldes τ ja T_1 veenduge, et pendel on ballistiline.

Mõõdetav või arvutatav suurus	Tähis	Mõõtetulemus	Viga
Koormuse mass	M		
Kuuli mass	m		
Koormiste kaugus pöörlemisteljest 1. asendis	R_1		
Kaugus peegli ja valguslaigu vahel	s		
Valguslaigu max kõrvalekalle	a		
Max pöördenurk	φ_0		
10 täisvõnke aeg 1. asendis	t_1		
Võnkeperiood 1. asendis	T_1		
Tahtmispunkti kaugus pöörlemisteljest	l		
Koormiste kaugus pöörlemisteljest 2. asendis	R_2		
10 täisvõnke aeg 2. asendis	t_2		
Võnkeperiood 2. asendis	T_2		
Kuuli kiirus	v		
Kuuli sissetungimise sügavus	d		
Kuuli keskmine kiirus	\bar{v}		
Põrke kestus	τ		

5. Küsimused

1. Defineerige liikumishulga moment.
2. Sõnastage liikumishulga momendi jäävuse seadus.
3. Esitage kineetilise energia avaldised kulgeval ja pöördliikumisel.
4. Sõnastage mehaanilise energia jäävuse seadus.
5. Missugune põrge on absoluutselt mitteelastne?
6. Defineerige nurkkiirus.
7. Kuidas defineeritakse masspunkti inertsimoment?
8. Kuidas määrata keha inertsimoment?
9. Kuidas avaldub matemaatilise pendli võnkeperiood?

10. Sõnastage Steineri lause.
11. Mis on ballistiline pöördpendel?
12. Mispärast valgusallikas ja skaala on peeglist eemaldatud küllalt suurele kaugusele?
13. Mispärast 2. asendis määratakse ainult võnkeperiood (valguslaigu maksimaalne kõrvalekalle pole oluline)?
14. Kuidas arvutada maksimaalset pöördenurka?
15. Mispärast ei ole vaja arvestada horisontaalse varda inertsimomendi?
16. Kuidas elimineeritakse võnkeperioodi avaldisest elastsusjõu konstant?
17. Kuidas muutub katsetulemus, kui põrge ei ole absoluutselt mitteelastne?

7. Kirjandus

Schulz, K. Füüsika. Loenguid kaugüliõpilastele, Tallinn, 1966.

Putilov, K.A. Füüsika I, Tallinn, 1964, §§ 27, 35...38.

Стрелков С.П. Механика, Москва, 1965, гл.V, § 87, гл.VII, § 53, гл. XIV, § 124.

Савельев И.В. Курс общей физики I, Москва 1968, § 27, 30, 38, 41, 42.

Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики I, Москва, 1967, § 6, 8, II.

PÖÖRDLIKUMISE PÕHISEADUS

1. Tööülesanne

Pöördlikumise põhiseaduse kontrollimine.

2. Töövahendid

Katseseade, raskuste komplekt, stopper, nihkaliiber, mõõtejoonlaud.

3. Töö teoreetilised alused

Pöördlikumise põhiseadus annab seose jõumomendi M , inertsimomendi I ja nurkkiirenduse ε vahel.

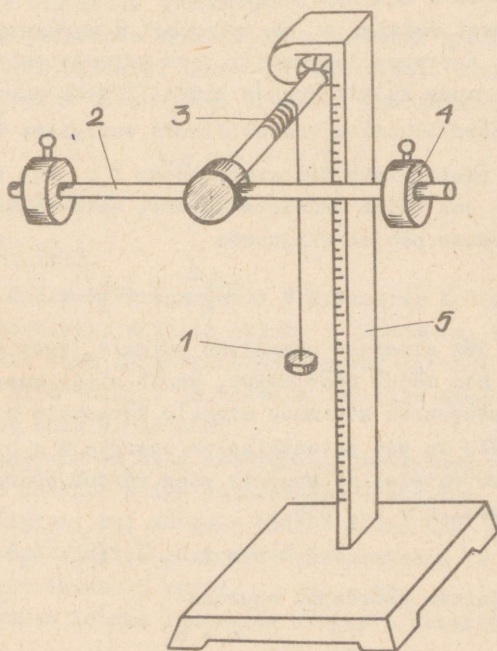
$$\varepsilon = \frac{M}{I} \quad (1)$$

Pöördliikumise põhiseadusest järeldub, et konstantse inertsimomendi korral on nurkkiirendused võrdelised kehale mõjuvate jõumomentidega, s.o.

$$\epsilon \sim M.$$

(2)

Käesoleva töö eesmärgiks ongi seose (2) kontrollimine. Katseseade (joon.19) koosneb võllist 3, mis pöörleb kuullaagritel, ja vardast 2. Vardal on kaks võrdse massiga muhvi 4. Nende nihutamisega piki varrast on võimalik muuta süsteemi inertsimomenti. Võllile on kinnitatud niit, mille teises otsas on alus 1 koormiste jaoks. Varda pööramisega saab kerida niidi võllile. Kui vabastada varras, hakkab viimane aluse ja temal olevate raskuste poolt tekitatud jõumomendi mõjul pöörlema. Jõumomendi määramiseks on vaja teada



Joonis 19.

jõudu F ja tema õlga r . Kui niidi läbimõõt on palju väiksem võlli läbimõõdust, siis võime lugeda jõu õla võrdseks võlli raadiusega. Jõu F , mis tekitab pöördemomendi, aga arvutame:

$$F = m g - m a - f, \quad (3)$$

kus m on aluse ja koormuste mass, a - kiirendus, millega alus hakkab liikuma, f - hõõrdejõud.

Seega saame jõumomendi jaoks avaldise

$$M = m(g - a)r - f r. \quad (4)$$

Kiirenduse a leiame koormuse langemise kõrguse h ja langemiseks kulunud aja t kaudu:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (5)$$

Hõõrdejõu f määrame järgmiselt.

Koormusel massiga m on kõrgusel h potentsiaalne energia $m g h$. Koormuse langemisel tema potentsiaalne energia muundub koormuse kulgliikumise kineetiliseks energiaks $\frac{m v^2}{2}$, hooratta pöördliikumise kineetiliseks energiaks $\frac{I \omega^2}{2}$ ja hõõrdumise ületamiseks tehtavaks tööks $f h$. Kui koormus on saavutanud oma kõige madalama asendi, siis võime energia jäävuse seaduse põhjal kirjutada

$$m g h = \frac{m v^2}{2} + \frac{I \omega^2}{2} + f h. \quad (6)$$

Koormus ei jää alumisse asendisse paigale, sest võll, jätkates saadud hoo mõjul pöörlemist, kerib niidi uuesti võllile ja tõstab seejuures koormuse mingile kõrgusele $h_1 < h$. Sellises asendis on tal potentsiaalne energia $m g h_1$. Alg- ja lõppoleku potentsiaalse energia vahe võrdub hõõrdejõudude tööga teepikkusel $h + h_1$, s.o.

$$m g h - m g h_1 = f(h + h_1).$$

Siit leiame hõõrdejõu suuruse

$$f = m g \frac{h - h_1}{h + h_1}. \quad (7)$$

Asetades avaldised (5) ja (7) valemisse (4), saame peale teisendusi:

$$M = m D \left(\frac{g h_1}{h + h_1} - \frac{h}{t^2} \right), \quad (8)$$

kus D on võlli diameeter.

Nurkkiirenduse leidmiseks kasutame asjaolu, et koormusel ja võlli pinna punktidel on ühesugused joonkiirendused. See-
ga

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{4 h}{D t^2}. \quad (9)$$

Seose (2) kontrollimiseks peame M ja ε leidma koormuse m mitme erineva väärtuse juures. Seejuures tuleb aga jälgida, et muhvide 4 asend vardal 2 jääks muutumatuks, s.t. et katse käigus ei muutuks süsteemi inertsimoment ($I = \text{const}$ kõigi koormuse m väärtuste juures).

Katse tulemuste analüüsiks joonestame graafiku $\varepsilon = f(M)$. Graafiku käik näitabki seose (2) kehtivust. Samalt graafikult arvutame lõpuks tõusu järgi süsteemi inertsimomendi I suuruse

$$I = \cot \alpha = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (10)$$

kus α on graafiku tõusunurk.

4. Töö käik

1. Mõõtku nihkkaliibriga võlli 3 diameeter D viies kohas.
2. Tehke kindlaks, millise skaala 5 jaotise n_0 kohal asub aluse 1 põhi tema kõige madalama asendi korral.
3. Kerige niit võllile ja vaadake, millise skaalajaotise n_1 kohal on nüüd aluse põhi.
4. Vabastage varras ning samaaegselt käivitage stopper. Kui alus on jõudnud kõige madalamasse asendisse, seisake stopper. Jälgige, kui kõrgele tõuseb aluse põhi (lugem n_2).
5. Mõõtmised viige läbi 5 erineva koormusega ($I = \text{const}$). Korrake igat katset 5 korda.

Seejuures leidke langemise kõrgus h seosest

$$h = n_1 - n_0;$$

tõusu kõrgus h_1 aga seosest

$$h_1 = n_2 - n_0.$$

Mõõtmistulemuste üleskirjutamisel kasutage järgmist skeemi:

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$D_{\text{keskm.}}$

$$m_1 = \dots$$

$$n_0 = \dots$$

Jrk. nr.	Skaala lugem		Kõrgus		Langemise aeg t
	n_1	n_2	h	h_1	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
Keskm.					

6. Arvutage valemite (8) ja (9) abil jõumomendid M ja vastavad nurkkiirendused ϵ , kasutades arvutustel mõõtmistulemuste keskmisi väärtusi. Saadud tulemuste põhjal ehitage millimeetripaberile graafik $\epsilon = f(M)$ ning arvutage süsteemi inertsimoment.

5. Küsimused

1. Mida nimetatakse jõumomendiks?
2. Kuidas määrata jõumomendi suunda?
3. Millised jõud on ekvivalentsed?
4. Millised jõud moodustavad jõu paari?
5. Defineerige materiaalse punkti ja keha inertsimoment.
6. Kuidas sõltub inertsimoment pöörlemistelje asendist?
7. Sõnastage pöördliikumise põhiseadus.
8. Milline analoogia esineb dünaamika valemites kulg- ja pöördliikumise korral?

9. Mida nimetatakse vabadeks telgedeks?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, M., 1964, §§ 35, 36, 37.

Савельев И.В. Курс общей физики I, Москва, 1966, § 36,37.

ELASTSUSMOODUL

1. Tööülesanne

Tutvumine Hooke'i seadusega ja traadi elastsusmooduli määramine venitamise teel.

2. Töövahendid

Uuritav traat, seadis traadi pikenemise määramiseks, mikromeeter, mõõdulint.

3. Töö teoreetilised alused

Jõu mõjul muutuvad keha mõõtmed ja kuju, keha deformeerub. Kui pärast jõu mõju lõppemist omandab keha esialgsed mõõtmed ja kuju, siis nimetatakse deformatsiooni elastseks. Elastsed deformatsioonid võivad olla mitmesugused: venitus, surve, nihe jne.

Deformatsiooni suurust hinnatakse keha mõõtme muutuse Δx ja esialgse mõõtme x suhtega

$$\epsilon = \frac{\Delta x}{x} .$$

Arvu ϵ , mis näitab, millise osa võrra on suurenenud või vähenenud keha mõõtmed, nimetatakse suhteliseks deformatsiooniks.

Elastsete deformatsioonide korral on kehtiv Hooke'i seadus, mis väidab, et suhteline deformatsioon on võrdeline deformeeriva pingega.

Venituse (või surve) korral võib Hooke'i seaduse põhjal kirjutada

$$\frac{\Delta l}{l} = k \frac{F}{S} , \quad (1)$$

kus Δl on absoluutne pikenemine, l - keha esialgne pikkus,

F - venitav (suruv) jõud, S - keha ristlõike pindala, k - materjalist sõltuv võrdetegur, mida nimetatakse elastsuskoeffitsiendiks.

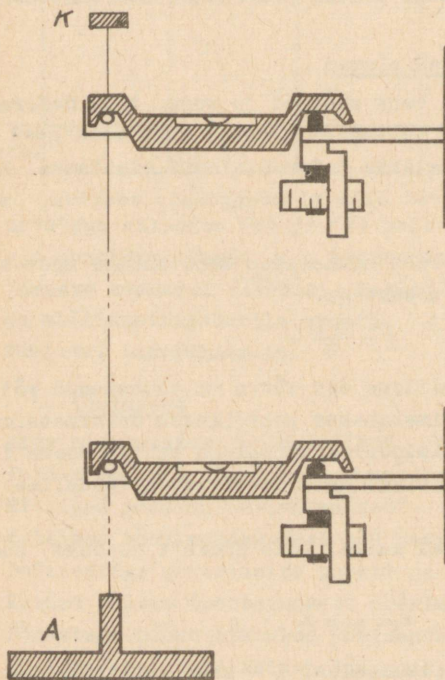
Tavaliselt kasutatakse tehnikas elastsuskoeffitsiendi pöördväärtust $E = \frac{1}{k}$, mida nimetatakse elastsusmooduliks e. Youngi mooduliks. Elastsusmoodul on võrdne pingega, mille mõjul keha pikereks esialgse pikkuse võrra ($\epsilon = 1$).

Elastsusmooduli arvutamiseks venitusest esitame valemi (1) kujul

$$E = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta l}$$

Arvutusteks on vaja teada traadi pikkust l, ristlõiget S, venitavat jõudu F ja pikenemist Δl .

Mõõtmisel kasutame joonisel 20 näidatud seadet. Mõõdetavaks kehaks on kronsteinile K kinnitatud traat.



Joonis 20.

alumises otsas on alus A, millele asetame algkoormuse traadi sirgestamiseks ja vihid traadi venitamiseks.

Pikenemise mõõtmiseks kasutatakse töös kahte vesiloodi, mis ühe otsaga toetuvad traadil olevatele klambritele, teise otsaga kruvikaliibri teravikele.

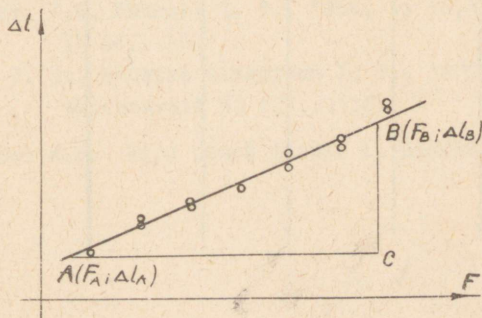
Kahe vesiloodi kasutamisega elimineeritakse kronsteinil võimaliku nihutamise mõju mõõtetulemustele. Töös määratakse ainult klambritevahelise traadiosa pikenemine.

Selleks reguleerime koormamata traadi korral vesiloodid kruvikaliibri pööramisega horisontaalseks, s.o. mullid keskele, ja registreerime kruvikaliibrите lugemid. (Kruvikaliibri ehitust ja tööpõhimõtet vt. tööst "Üldmõõtmised", lk. 33.)

Seejärel asetame alusele A vihi ja reguleerime vesiloodide mullid uuesti keskele ning registreerime kruvikaliibrите lugemid. Saadud lugemite ja alglugemite vahe annab klambrite nihkumise allapoole. Alumise klambri nihkumine on tingitud kogu klambrist ülalpool oleva traadi pikenemisest ning kronsteini K nihkumisest. Ülemise klambri nihkumine on tingitud klambrist ülalpool oleva traadi pikenemisest ja samuti kronsteini nihkumisest. Seega klambrite nihkumiste vahe annab ki traadi pikenemise klambrite vahel.

Töö käigus suurendatakse koormust järk-järgult kuni 5 kgf-ni, reguleerides iga kord vesiloodide mullid keskele ning registreerides kruvikaliibrите lugemid. Siis eemaldame vihid vastupidises järjekorras ja registreerime jällegi mikromeetri lugemid eespool kirjeldatud viisil. Seejuures peavad võrdsete koormuste puhul lugemid koormuse suurenemisel ja vähenemisel katsevigade piirides üntima. Kui see pole nii, siis ei olnud traat algul küllalt sirge või ületas lõppkoormus traadi elastuse piiri, mistõttu tekkis jääkdeformatsioon. Viimasel juhul tuleb mõõtmist korrata väiksema lõppkoormusega.

Saadud tulemuste põhjal ehitame graafiku teljestikus $\Delta l = f(F)$. Hooke'i seaduse põhjal peavad leitud punktid asuma ühel sirgel. Katsevigade tõttu esinevad sellest kõrvalekalduvad ja sirge tuleb joonestada nii, et ta oleks kõikidele punktidele võimalikult lähedal (joon.21).



Joonis 21.

Elastsusmooduli E arvutamiseks võiksime kasutada ükskõik missugust vastavate suuruste Δl ja F paari, kuid suurema täpsuse saamiseks kasutame graafikut.

Kuna $\cot \alpha = \frac{F}{\Delta l}$, siis võib kirjutada valemi (2) kujul

$$E = \frac{1}{S} \cot \alpha. \quad (3)$$

$\cot \alpha$ leidmiseks joonistame täisnurkse kolmnurga ABC , kus

$$\cot \alpha = \frac{F_B - F_A}{\Delta l_B - \Delta l_A}.$$

Seega saame lõpliku valemi E arvutamiseks kujul

$$E = \frac{1}{S} \cdot \frac{F_B - F_A}{\Delta l_B - \Delta l_A}. \quad (4)$$

4. Too kõik

1. Mõõtke traadi läbimõõt kolmes kohas klambrite vahel.
2. Mõõtke traadi pikkus klambrite vahel.
3. Pärast algkoormuse asetamist alusele A reguleerige vesiloodide mullid keskele ja registreerige kruvikaliibrите luge-mid järgmisse tabelisse.

Jrk. nr.	Lisakoormus (kgf)	Alumine vesilood		Ülemine vesilood		Pikenemine (mm)
		lugem	nihkumine	lugem	nihkumine	
1.	0					
2.	$F_1 = \dots$					
3.	$F_2 = \dots$					
·	·					
·	$\ddot{F}_x = \dots$					
·	·					
·	·					
·	\ddot{F}_2					
·	F_1					
·	0					

4. Suurendage järk-järgult koormust kuni 5 kgf-ni, registreerides iga kord kruvikaliibrite lugemid. Kasutatavate vihtide massid küsige juhendajalt või määrake kaalumise teel.
5. Eemaldage vihid vastupidises järjekorras, võttes igakord lugemid.
6. Arvutage igale koormusele vastav pikenemine.
7. Ehitage graafik teljestikus $\Delta l = f(F)$.
8. Arvutage valemi (4) abil traadi elastsusmoodul.
9. Hinnake mõõdetud suuruste vigu.

5. Küsimused

1. Mida näitab elastsusmoodul?
2. Milleks on vajalik elastsusmooduli teadmine?
3. Missugustes ühikutes mõõdetakse elastsusmoodulit, kuidas on need ühikud omavahel seotud?
4. Millest ja kuidas sõltub elastsusmooduli mõõtmisviga?
5. Kas ja kuidas muutub venitava jõu mõjul traadi ruumala?
6. Millega on seletatav võrdse elastsusmooduliga alumiiniumi ja klaasi erinev käitumine deformeeriva jõu mõjul?
7. Milleks muutub välisjõudude töö keha deformeerimisel?
8. Milliseid kehi nimetatakse elastseteks? Milliseid plastiilseteks?
9. Kui palju tehakse tööd traadi venitamiseks Δl võrra?
10. Milliseid jõudusid nimetatakse siseelastusjõududeks?
11. Millega iseloomustatakse elastsusjõudude intensiivsust?
12. Kuidas muutub deformeerimisel keha temperatuur?

6. Kirjandus

- Putilov, K.A. Füüsika I, T., 1964, §§ 40,41, täiendavalt §§ 44...46.
- Lang, J. jt. Füüsika üldkursus I, T., 1959, §§ 121...124, täiendavalt §§ 127...130.
- Савельев И.В. Курс общей физики I, Москва, 1966, § 45.

NIHKEMOODUL

1. Tööülesanne

Traadi nihkemooduli määramine elastsetest torsioonvõnkumistest.

2. Töövahendid

Torsioonpendel lisaraskustega, mõõdulint, nihkkaliiber, kruvikaliiber, stopper, tehnilised kaalud.

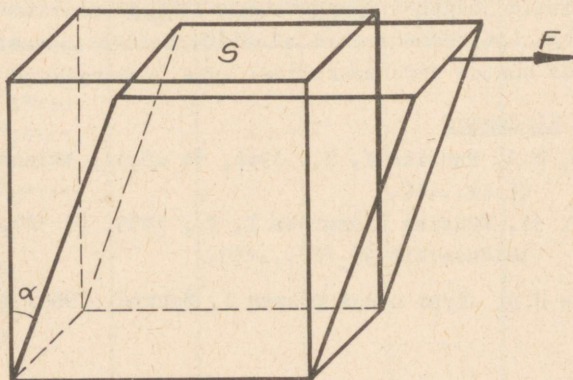
3. Töö teoreetilised alused

Olgu risttahukas põhjapindalaga S kinnitatud liikumatult alusele. Rakendame tema pealmisele pinnale pinnaga paralleelse jõu F , mis mõjub ühtlaselt igale pinnaelemendile. Seda pinnaühikule mõjuvat jõudu

$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

nimetatakse nihkepingeks. Jõu F mõjul risttahukas deformeerub ja tema külgservad moodustavad oma esialgse asendiga nurga α (joon.22). Kuna Hooke'i seaduse põhjal on elastsel deformatsioonil α võrdeline pingega, siis järeldub sellest, et α on võrdeline mõjuva jõuga F ja pöördvõrdeline pindalaga S :

$$\alpha = \frac{F}{G S} \quad (2)$$



Joonis 22.

Materjalist olenev suurus G on igale ainele iseloomulik konstant ja teda nimetatakse nihkemooduliks. Et nurk α on dimensioonita suurus (nurk radiaanides), siis valemi (2) järgi peab G dimensioon olema võrdne $\frac{F}{S}$, s.o. pinge dimensiooniga.

Tavaliselt mõõdetakse nihkemoodulit nagu elastsusmoodulitki ühikutes $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$, $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$ või $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Nihkemoodulit võime määrata valemi (2) järgi, mõõtes ära suurused α , F ja S . Kirjeldatud meetodit nihkemooduli määramiseks tegelikult ei rakendata. Selle asemel kasutatakse nihkemooduli määramiseks torsioonvõnkumist, mille teooria toome ära alljärgnevalt.

Torsioonvõnkumiseks nimetatakse järgmist võnkliikumist. Olgu pingule tõmmatud elastse traadi (varda) külge jäigalt kinnitatud kõva keha nii, et tema vaba telg langeb kokku traadi pikiteljega. Kui selline keha viia välja tasakaaluasendist tema pööramisega ümber vaba telje, siis traat deformeerub (väändedeformatsioon) ja elastsusjõud tekitavad pöördemomendi, mis püüab viia keha tagasi tasakaaluasendisse. Pärast vabastamist hakkab keha sooritama võnkuvaid pöördliikumisi tasakaaluasendi ümber, mida nimetataksegi torsioonvõnkumiseks.

Kui kõva keha sooritab pöördliikumist, siis võib tema kohta rakendada pöördliikumise põhiseadust

$$M = I \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

kus M on pöördemoment antud telje suhtes, I - keha inertsimoment sama telje suhtes, $\frac{d\omega}{dt}$ - keha nurkkiirendus.

Arvestades, et elastsuse piirides pöördemoment torsioonvõnkumisel on suunatud vastupidiselt pöördele φ ja on sellega võrdeline, saame võrrandit (3) kasutades harmoonilise torsioonvõnkumise diferentsiaalvõrrandi

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -f \varphi, \quad (4)$$

kus $f \varphi$ on väärtuselt võrdne pöördemomendiga M . Võrrandist (4) saame, et selliste võnkumiste täisvõnkeperiood avaldub:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{F}}, \quad (5)$$

kuna $\frac{f}{I}$ on võrdeteguriks $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ ja φ vahel.

Suurust $f = \frac{M}{\varphi}$ nimetatakse väändemooduliks. Ta võrdub arvuliselt momendiga, mis tekitab traadile üheradiaanilise väändenurga.

Nihkemoodul G ja väändemoodul f on omavahel seotud valemiga (vt. Lang, J. jt., Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, lk. 131):

$$f = \frac{G\pi r^4}{2L}, \quad (6)$$

kus r on silindrilise traadi raadius ja L - selle pikkus.

Valemi (5) järgi leiame väändemooduli f ja (6) järgi nihkemooduli G . Tundmatu inertsimomendi I elimineerimiseks määrame kaks erinevat perioodi väärtust T_1 ja T_2 pendli erinevate inertsimomentide I_1 ja I_2 korral.

Tööd võime sooritada kahel seadmel: esimesel (vt. joon. 23) ja teisel (vt. joon. 24), kus erinevus on ainult katseseadme inertsimomendi muutmise võimalustes.

Valemi (5) põhjal:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{f}} \quad \text{ja} \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{f}},$$

kust saame

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (7)$$

1. Tööülesande täitmiseks vajalike valemite tuletamine esimesele seadmele.

Pendli kogu inertsimoment võrdub pendli inertsimomendi I_0 ja lisaraskuste inertsimomentide $2 m l^2$ summaga, kus l on kaugus pöörlemisteljest lisakoormuse massikeskmeni.

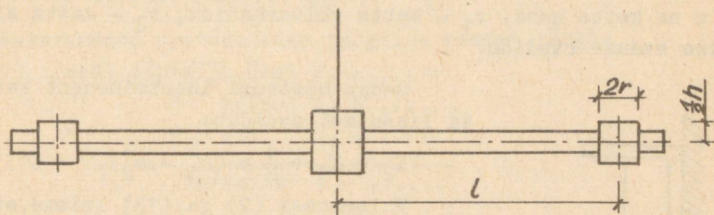
* Lisakoormuse inertsimomendi võib lugeda võrdseks $m l^2$ ainult siis, kui $l \gg h$ (h lisakoormuse kõrgus). Meie juhul tuleb võtta $l > 10$ cm. Kui $l < 10$ cm, tuleb inertsimomendi arvutamisel kasutada Steineri lauset (silindri inertsimoment sümmeetriateljega risti oleva raskuskeset läbiva telje suhtes on

$$I = m \frac{3 r_1^2 + 4 h^2}{12}.$$

Seega

$$I_1 = I_0 + 2 m l_1^2 \quad \text{ja}$$

$$I_2 = I_0 + 2 m l_2^2 . \quad (8)$$



Joonis 23.

Siit

$$I_2 - I_1 = 2 m (l_2^2 - l_1^2) \quad \text{ja arvestades valemit (3),}$$

saame

$$I_1 = \frac{2 m T_1^2 (l_2^2 - l_1^2)}{T_2^2 - T_1^2} . \quad (9)$$

Asetades selle avaldise perioodi valemisse, saame

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{f}} = 2\pi T_1 \sqrt{\frac{2 m (l_2^2 - l_1^2)}{f (T_2^2 - T_1^2)}} ,$$

millest

$$f = \frac{8\pi^2 m (l_2^2 - l_1^2)}{T_2^2 - T_1^2} . \quad (10)$$

Nihkemooduli määramise nüüd valemi (6) põhjal:

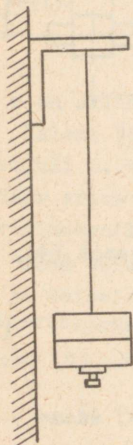
$$G = \frac{2 f L}{\pi r^4} = \frac{16\pi L m (l_2^2 - l_1^2)}{r^4 (T_2^2 - T_1^2)} . \quad (11)$$

2. Tööülesande täitmiseks vajalike valemite tuletamine teisele seadmele.

Süsteemi (vt. joon.24) inertsimomendi I_1 elimineerimiseks lisame juurde ühe ketta, mille inertsimomendi I saame arvutada:

$$I = \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2), \quad (12)$$

kus m on ketta mass, r_1 - ketta välisraadius, r_2 - ketta sisemise avause raadius.



Joonis 24.

Seega süsteemi inertsimoment ketta lisamisel avaldub:

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2). \quad (13)$$

Valemitest (7) ja (13) leiame, et

$$I_1 = \frac{m T_1^2 (r_1^2 + r_2^2)}{2 (T_2^2 - T_1^2)}. \quad (14)$$

Asetades selle perioodi valemisse (5), saame

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{F}} = 2\pi T_1 \sqrt{\frac{m (r_1^2 + r_2^2)}{2 (T_2^2 - T_1^2) f}},$$

millest

$$f = \frac{2\pi^2 m (r_1^2 + r_2^2)}{(T_2^2 - T_1^2)}. \quad (15)$$

Nihkemooduli määrame nüüd valemi põhjal

$$G = \frac{2 f L}{\pi r^4} = \frac{4 \pi L m (r_1^2 + r_2^2)}{r^4 (T_2^2 - T_1^2)}. \quad (16)$$

4. Töö käik

1. Määrake traadi raadius r . Kuna suhteline viga selle määramisel on suurim, siis mõõtke raadiust r kruvikaliibriga kolmest kohast (igast kohast kahes ristsuunas).
2. Mõõtke mõõdulindiga traadi pikkus L .

a. Töötamisel esimese seadmega.

- 3 a. Asetage lisakoormused pöörlemisteljest kaugusele l_1 .
 4 a. Mõõtke torsioonvõnkumiste täisvõnkeperiood T_1 juhendaja poolt antud n täisvõnke aja kaudu.
 5 a. Nihutage lisakoormused pöörlemisteljest kaugusele l_2 . Mõõtke uuesti täisvõnkeperiood T_2 .

Katseandmed protokollige järgmise skeemi järgi:

- 1) traadi läbimõõt ülal $d_1 = \dots\dots$
 " " keskel $d_2 = \dots\dots$
 " " all $d_3 = \dots\dots$

 keskmine $d = \dots\dots$

traadi raadius $r = \dots\dots\dots$

- 2) traadi pikkus $L = \dots\dots\dots$

Nr.	Kaugus l	Võngete arv	Aeg	Periood
1.				
2.	$l_1 =$			
3.				
1.				
2.	$l_2 =$			
3.				

Lisakoormuste mass $m = \dots\dots\dots$

Nihkemoodul $G = \dots\dots\dots$

b. Töötamisel teise seadmega.

- 3 b. Määrake torsioonvõnkumistest täisvõnke periood T_1 juhendaja poolt antud n täisvõnke aja kaudu, kui traati pingutab ainult põhiketas.
 4 b. Mõõtke lisaketta raadiused r_1 ja r_2 .
 5 b. Asetage lisaketas põhikettale ja mõõtke täisvõnkeperiood T_2

Mõõtmised protokollige skeemi järgi:

- 1) traadi läbimõõt ülal $d_1 = \dots\dots$
 " " keskel $d_2 = \dots\dots$
 " " all $d_3 = \dots\dots$

 keskmine $d = \dots\dots$

traadi raadius $r = \dots\dots$
 2) traadi pikkus $L = \dots\dots$

Nr.	Põhiketas			Põhiketas + lisaketas		
	Võngete arv	Aeg	T_1	Võngete arv	Aeg	T_2
1.						
2.						
3.						

Keskmine: $T_1 = \dots\dots$

$T_2 = \dots\dots$

Lisaketta mass $m = \dots\dots$

Lisaketta raadius $r_1 = \dots\dots$

Lisaketta ava raadius $r_2 = \dots\dots$

Nihkemooduli arvutame valemist (16).

5. Küsimused

- Mis on nihe ja vääne?
- Sõnastage Hooke'i seadus nihke kohta.
- Mis on nihkemoodul ja väändemoodul?
- Nimetada nihkemooduli ühikud ja leida ühikutevahelised seosed.
- Mis on pinges?
- Mis on nihke põhjuseks?
- Mida nimetatakse Poissoni teguriks?
- Kuidas on seotud nihkemoodul ja elastsusmoodul?
- Milline on torsioonvõnkumise diferentsiaalvõrrand ja kuidas võime sellest leida võnkumise perioodi?
- Mis on masspunkti ja keha inertsimoment?
- Mis on võnkeperiood, amplituud ja hälve?
- Mis on sagedus ja nurksagedus? Milline on nende vaheline seos?
- Sõnastage Steineri lause.
- Kas on olemas teistsuguseid meetodeid ja võtteid nihkemooduli määramiseks?
- Järjestada suuruse järjekorras kõikide mõõdetud suuruste relatiivsed vead.
- Kas nihkemoodulit saaks arvutada teistest elastsuskonstantidest?

17. Kui suur on viga võngete arvu määramisel?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, Tallinn, 1964, §§ 40, 41, 43...46.

Lang, J. jt. Füüsika üldkursus I, Tallinn, 1959, §§ 121...
125, 127, ..130.

Lang, J. jt. Füüsika praktikum, Tallinn, 1960, § 54, lk. 129
...134.

Schults, K. Füüsika. Loenguid kaugüliõpilastele, Tallinn,
1966.

Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I, М., 1958,
§ 89...91.

Савельев И.В. Курс общей физики, т. I, М., 1966, § 45.

PÖÖRDPENDEL

1. Tööülesanne

Maa raskuskiirenduse määramine.

2. Töövahendid

Pöördpendel, stopper, mõõtejoonlaud, millimeetripaber,
ümmargune varras.

3. Töö teoreetilised alused

Tahket keha, mis on kinnitatud raskuskeskmest kõrgemal
asuvast punktist ja võib raskusjõu mõjul vabalt võnkuda seda
punkti läbiva telje ümber, nimetatakse füüsikaliseks pendliks.
Idealiseeritud süsteemi, kus masspunkt võngub lõpmatult peene
venimatu ja kaaluta niidi otsas, nimetatakse matemaatiliseks
pendliks.

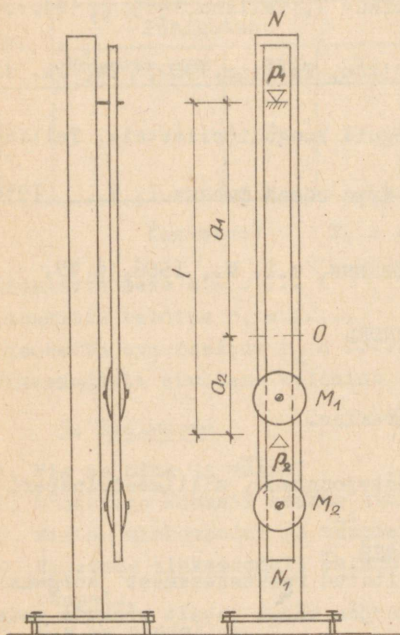
Kui matemaatilise pendli võnkumisel ei mõju takistavaid
jõudusid, avaldub täisvõnkeperiood T_M järgmiselt:

$$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

kus l on pendli pikkus ja g - raskuskiirendus. Valem kehtib
ainult väikeste võnkeamplituudide korral, kui võnkumisi võib
lugeda harmoonilisteks. (Kui pendli amplituud on $\sim 5^\circ$, annab
valem vea 0,05%. Kui amplituud on 23° , küünib viga juba üle
ühe protsendi.)

Antud töös tuleb raskuskiirendus määrata füüsikalise pendli
abil, mis on kujundatud pöördpendlina (vt. joon. 25). Pöörd-
pendel koosneb vardast NN, millele on kinnitatud kaks teine-

teise poole pööratud teravikuga prisma p_1 ja p_2 ning kaks läätsekujulist keha M_1 ja M_2 .



Joonis 25.

line pendel. Punkti pendlil, mis asub pöörlemisteljest kaugusel l , nimetatakse pendli võnketsentraks.

Pöördpendlil võib kehad M_1 ja M_2 asetada nii, et pendli võnketsenter ühtib teise prisma servaga, s.t. redutseeritud pendli pikkus l on võrdne prismade p_1 ja p_2 servade vahelise kaugusega.

Sel juhul osutub, et pendli võnkeperiood ei olene sellest, kumma prisma teravikule ta toetub. Seega, kui pendel võnkus prisma p_1 servale toetudes ja seejärel pöörati ta ümber nii, et ta toetub nüüd prisma 2 servale, jääb pendli täisvõn-

neid kehi võib piki varrast nihutada. Pendlit aga saab toetada kas ühele või teisele prismale ja lasta võnkuda nende teravatel servadel (teravikel).

Füüsikalise pendli täisvõnkeperiood T on arvutatav valemist:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{m g a}} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{g}}, \quad (2)$$

kus I on pendli inertsimoment pöörlemistelje suhtes, a - massikeskme kaugus pöörlemisteljest, m - pendli mass, l - pendli redutseeritud pikkus.

Seejuures

$$l = \frac{I}{m a}. \quad (3)$$

Redutseeritud pendli pikkus näitab, millise pikkusega matemaatiline pendel võnguks sama täisvõnkeperioodiga nagu antud füüsika-

keperiood samaks mis enne, kui pendel võnkus prisma p_1 servale toetudes. Siit ka nimetus pöörpendel.

Eelnevat kinnitab järgmine arutlus. Kui pendel võngub, toetudes prismale p_2 , siis

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{m g a_2}}. \quad (4)$$

Seejuures $I_2 = I_0 + m a_2^2$,

kus I_0 on pöörpendli inertsimoment masskeset O läbiva telje suhtes (vt. joon.25), a_2 - masskeskme kaugus prismast p_2 ja m - pendli mass. Kui kehad M_1 ja M_2 on paigutatud nii, et l võrdub teravike vahelise kaugusega, siis

$$l = a_1 + a_2,$$

kus a_1 on masskeskme kaugus prismast p_1 . Seega

$$\begin{aligned} I_2 &= I_0 + m(1 - a_1)^2 = I_0 + m a_1^2 - 2 m l a_1 + m l^2 = \\ &= I_0 + m a_1^2 + m l (1 - 2 a_1). \end{aligned}$$

Pendli inertsimoment prismal p_1 võnkudes oleks

$$I_1 = I_0 + m a_1^2$$

ning siis

$$l = \frac{I_1}{m a_1}.$$

Seega

$$\begin{aligned} I_2 &= I_1 + m l (1 - 2 a_1) = I_1 + \frac{I_1}{a_1} (1 - 2 a_1) = \\ &= I_1 \frac{1 - a_1}{a_1} = I_1 \frac{a_2}{a_1}. \end{aligned}$$

Asetades viimase tulemuse võrrandisse (4), saame:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{m g a_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_1 a_2}{a_1 m g a_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{m g a_1}} = T_1.$$

Seega, kui õnnestub saavutada olukord, et $T_1 = T_2$, on prisma teravike vaheline kaugus võrdne redutseeritud pendli pikkusega l ning raskuskiirenduse g saab arvutada valemist (2).

Kehade M_1 ja M_2 asendi leidmiseks, mille juures pendli pöörämisel ühelt prismalt teisele võnkeperiood ei muutuks, võib kasutada järgnevat meetodikat. Asetame pendli ühele prismale ja määrame pendli võnkeperioodid erinevate keha M_1 asendite korral, kuna teise keha M_2 asend jääb kogu aeg samaks. Saadud tulemuste põhjal joonestame graafiku teljestikus: võnkeperiood T - keha M_1 asend pendli vardal s. Seejärel asetame pendli teisele prismale ja mõõdame jällegi võnkeperioodid sõltuvalt keha M_1 asendist. Tulemused kanname samale graafikule. Saadud kahe kõvera lõikepunkt graafikul annabki otsitava keha M_1 asendi.

Kehade M_1 ja M_2 leitud asendite juures perioode T_1 ja T_2 mõõtes saame siiski veidi lahkuminevad tulemused, sest kehade asendite leidmine eelnenud meetodil ei olnud täpselt teostatav. Et saada täpsemat raskuskiirenduse väärtust, kasutatakse arvutustel mõlemat perioodi väärtust. Leiame vastava valemi (6).

Kui

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + m a_1^2}{m g a_1}} \quad \text{ja} \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + m a_2^2}{m g a_2}},$$

$$\text{siis } T_1^2 g a_1 - T_2^2 g a_2 = 4 \pi^2 (a_1^2 - a_2^2). \quad (5)$$

Lahendades võrrandi (5) g suhtes, saame:

$$g = \frac{8 \pi^2 l}{T_1^2 + T_2^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(T_1^2 - T_2^2) l}{(T_1^2 + T_2^2)(a_1 - a_2)}}. \quad (6)$$

Selle valemi kasutamisel g arvutamiseks tuleb määrata masskeskme kaugus prismade teravikest (a_1 ja a_2). Selleks asetame pendli horisontaalselt ümmargusele vardale, reguleerides toetuspunkti asukoha selliseks, et pendel asuks vardal tasakaalus. Järgnevalt saamegi mõõta a_1 ja a_2 piisava täpsusega.

4. Töö käik

1. Tutvuge pöördpendli ehitusega ja tema reguleerimisvõimalustega.
2. Seadke pendli statiiv jalakruvidest vertikaalseks, et kindlustada pendli minimaalse takistusega võnkumine.
3. Kinnitage keha M_2 juhendaja poolt näidatud kaugusele pöördpendli vardal NN_1 .
4. Teostage perioodi mõõtmised keha M_1 viie erineva asendi korral (periood määrake ~ 100 täisvõnke kestuse kaudu).
5. Mõõtmistel saadud perioodi T väärtused ja keha M_1 asendid s vardal NN_1 kandke graafikule teljestikus T - s .
6. Seadke pendel võnkuma teisele prismale p_2 .
7. Mõõtke võnkeperioodid keha M_1 5 erineva asendi juures (kasutage jällegi ~ 100 täisvõnke kestust). Tulemused kandke graafikule.
8. Kinnitage keha M_1 graafikult kõverate lõikepunktina leitud asendisse s .
9. Mõõtke pendli võnkeperioodid T_2 ja T_1 kehade M_1 ja M_2 leitud asendite juures, lastes pendlil võnkuda algul prismal p_2 ja siis prismal p_1 (jällegi ~ 100 täisvõnget).
10. Pange pendel horisontaalselt lauale asetatud ümmargusele vardale. Otsige toetuspunkt, millele toetudes oleks pendel vardal tasakaalus.
11. Mõõtke masskeskme (asub pendli tasakaalu korral vardal toetuspunkti kohal) kaugused (a_1 ja a_2) prismade p_1 ja p_2 teravikest.
12. Arvutage g väärtus, kasutades valemeid (2) ja (6). Võrrelge tulemusi.

5. Küsimused

1. Mis on inertsimoment?
2. Mis on vabatelg?
3. Mis on inertsiooni peateljed?
4. Millest oleneb raskuskiirenduse suurus?
5. Mis on pöördimpulssmoment ja millised on tema omadused?
6. Kuidas avaldub pöörleva keha kineetiline energia?

7. Miks absoluutselt kõva keha kõikidel punktidel on üks ja sama nurkkiirus?
8. Mis on nurkkiirusvektor?
9. Missugused tegurid mõjutavad pendli täisvõnkeperioodi pikkust ja millises suunas?
10. Kuidas avaldub pendli teljele mõjuv jõud momendil, kui pendel läbib tasakaaluasendit?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, Tallinn, 1964, §§ 56, 57, 36, 37, lk. 207...214; 135...141.

VEE SISEHÕRDETEGUR

1. Tööülesanne

Vee sisehõrde teguri määramine Poiseuille'i meetodil.

2. Töövahendid

Kapillaartoru, mis on ühendatud temast kõrgemal asetseva vedelikureservuaariga, stopper, mensuur või kaalud, mõõtejoonlaud, vesi ja termomeeter.

3. Töö teoreetilised alused

Vedeliku laminaarsel voolamisel on vedeliku kahe teineteisega paralleelse kihi vaheline sisehõrdejõud arvutatav Newtoni sisehõrdejõu valemi abil:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (1)$$

kus η on sisehõrde tegur, S - vaadeldavate kihtide pindala ja $\frac{dv}{dx}$ - kiiruse gradient võetuna risti vedeliku kihtidega (s.o. vedeliku voolukiiruse muutus pikkusühiku kohta, mis on võetud ristsuunas voolu suunaga ja pinnaga S).

Kui võtame valemis (1) pindala S ja gradiendi $\frac{dv}{dx}$ ühikulised, siis $F = \eta$. Seega sisehõrde tegur on võrdne jõuga, mis mõjub kahe teineteise vastas oleva ühikulise pindalaga kihi vahel, kui kihtide kiiruste vahe võetuna nendevahelise kauguse ühiku kohta, on üks.

Vedeliku voolamine torus ei toimu igas kohas ühesuguse kiirusega: kõige suurem on kiirus toru keskel, kõige väiksem toru seinte läheduses. Kogu torus liikuvat vedelikku võime seega kujutleda koaksiaalsete silindriliste vedelikukihtidena, mis libisevad üksteise suhtes ja millede liikumist pidurdab sisehõõrdumine. Peale sisehõõrdumisjõu oleneb vedeliku voolamiskiirus torus veel toru mõõtmetest ja rõhust, mille mõjul vedelik voolab.

Matemaatilise seose nende suuruste vahel kapillaartoru jaoks andis prantsuse arst Poiseuille'i valemiga

$$V = \frac{\pi p r^4 t}{8 l \eta} \quad (2)$$

kus V on torust pikkusega l ja raadiusega r aja t jooksul läbivoolanud vedeliku ruumala, p - kapillaari otste vaheline rõhkude vahe ja η - sisehõõrdetegur. Valemist (2) on hõlbust määrata η , kui kõik teised suurused on teada:

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8 l V} p \quad (3)$$

Rõhkude vahe määramisel võtame veesamba alg- ja lõppkõrguste keskmise väärtuse h ja arvutame keskmise rõhkude vahe valemi

$$p = \rho g h \quad (4)$$

abil.

Kapillaartoru sisemine läbimõõt määratakse tavaliselt järgmiselt. Kapillaartoru täidetakse elavhõbedaga ja mõõdetakse selle samba pikkus l_1 . Seejärel valatakse elavhõbe kapillaartorust kergesse anumasse ja leitakse elavhõbeda kaal P .

Elavhõbeda ruumala on arvutatav valemiga:

$$V_1 = \frac{P}{\rho_1 g} = \pi r^2 l_1,$$

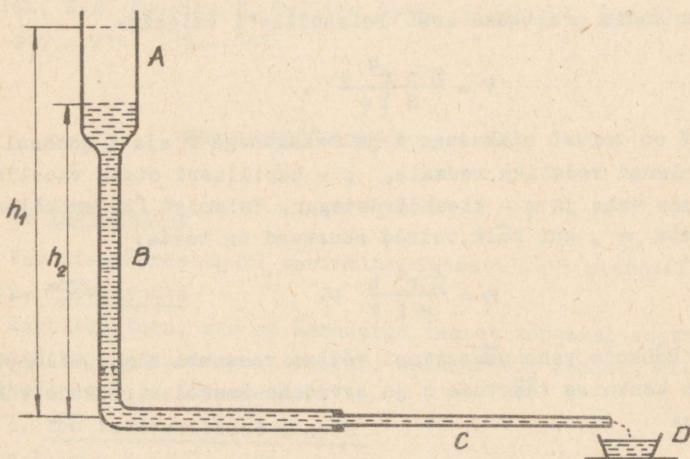
millest

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi l_1 \rho_1 g}}.$$

Kuna elavhõbedaga töötamine on tervisele ohtlik, siis kapillaartoru raadius on juba eelnevalt määratud. Selle väärtuse annab juhendaja.

Töö käik

1. Valage anumasse A vett, kuni veepind ulatub 1...2cm alla poole anuma ülemisest äärest (vt. joon.26).



Joonis 26.

2. Mõõtke joonlauaga veesamba kõrgus h_1 .
3. Avage kapillaartoru ja laske veel voolata, kuni nivoo anumas on langenud umbes 10..15cm. Seejuures mõõtke voolamiseks kulunud aeg.
4. Sulgege kapillaartoru ja mõõtke veesamba kõrgus h_2 .
5. Kaalumise teel või mensuuriga määrame väljavoolanud vedeliku hulga V.

Vedeliku sisehõõrdetegur oleneb temperatuurist, seepärast tuleb märkida ka väljavoolanud vee temperatuur.

Mõõtmistulemused protokollige järgmise tabeli kujul:

Mõõdetav suurus	Mõõtarv S	Mõõtmisvead	
		ΔS	$\Delta S/S$
Veesamba kõrgus katse alguses h_1			
Veesamba kõrgus katse lõpul h_2			
Keskmine kõrgus $\frac{h_1 + h_2}{2}$			
Kapillaari pikkus l			
Väljavoolanud vee ruumala V			
Kapillaari raadius r			
Voolamise kestus t			
Vee temperatuur t°			
Vee sisehõõrdeegur η			

5. Küsimused

1. Sisehõõrdeeguri mõiste (definiitsioon).
2. Sisehõõrdeeguri ühikud SI- ja CGS-süsteemis.
3. Mida tähendab kiiruse gradient $10 \frac{1}{s}$?
4. Millist suunda omab sisehõõrdejõud, mis mõjub kujutletavale tasapinnalisele vedeliku kihile voolavas vedelikus?
5. Millisel alltoodud vedelikkudest on suurim sisehõõrdeegur - petrooleum, piim, vesi, piiritus?
6. Milline on vedelike ja gaaside sisehõõrdeegurite sõltuvus temperatuurist? Miks?
7. Miks kasutame antud meetodil kapillaartoru, mitte aga jämedat toru?
8. Leida rõhk ookeanis 1 km allpool veepinda?
9. Mispärast ei või mõõtmise ajal vees olla õhumullikesi?
10. Mispärast peavad reservuaar A ja toru B olema suurte mõõtmetega?
11. Mispärast rõhu arvutamisel ei arvestata atmosfääri rõhku?
12. Mispärast katses vedeliku lõppnivooks peab jääma mingi tase reservuaaris A, aga mitte torus B?
13. Kui pikendada kapillaartoru C, siis alates teatud pikkusest ei voola vesi antud seadeldise kapillaartorust välja. Miks?

14. Mis pärast kasutatakse kapillaartoru siseläbimõõdu määramiseks just elavhõbedat, aga mitte mõnda muud vedelikku?
15. Miks on katses vajalik võtta suur (aga mitte väike) vee nivoo alanemine anumast A?

6. Kirjandus

- Putilov, K.A. Füüsika I, §§ 48...54, lk. 171...200; §§94, 95, lk. 356...360; § 115, lk. 445...451.
- Lang, J. jt. Füüsika praktikum, 48. töö lk.101...112.
- Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I, § 40 ...42, 56, 57, 82.

KÄMPFI VISKOSIMEETER

1. Tööülesanne

Õli viskoossuse, Kämpfi viskosimeetri konstandi ja aluse efektiivkaalu määramine.

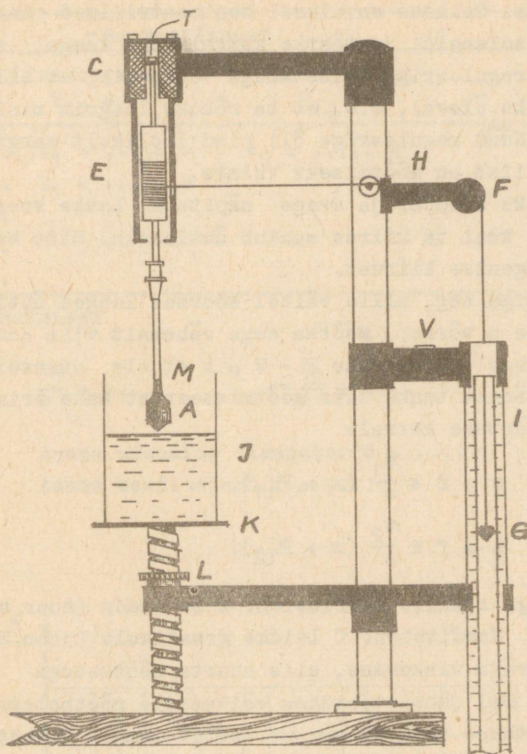
2. Töövahendid

Kämpfi viskosimeeter, stopper, lisakoormused.

3. Viskosimeetri kirjeldus

Kämpfi viskosimeeter on väga mugav riist vedeliku sisehõõrde teguri määramiseks, kui viimane on suurem kolmest puuasist. Viskosimeetri skeem on antud joonisel 27. Riista üheks tähtsamaks elemendiks on silinder A, mis saab pöörlelda vertikaaltelje ümber. Silinder tõstetakse üles solenoidi C abil, lastes sellest läbi vastava tugevusega voolu, nii et telje teravik T rõhuks laagrit minimaalse jõuga. Silindriga A on ühendatud soontega silinder E niidi pealekerimiseks. Silindrilt E tulev niit läbib pidurnäpitsa H ja läheb üle ploki F. Niidi otsas asub koormus G, mis langemisel paneb telje pöörlema. Koormus G langeb ümmarguses rennis I, millele on kantud skaala sentimeetrites.

Silindriline anum J mõõdetava vedelikuga asetatakse alusele K, mida saab jalgkruvi abil tõsta nii, et silinder A oleks kuni märgini M vedelikus.



Joonis 27.

P_1 - lisakoormuse raskus ja F - hõõrdejõud laagrites, $\frac{S}{t}$ on koormuste langemise kiirus.

4. Töö käik

1. Seadke riista alusel oleva vesiloodi V abil riist loodi, s.o. seadke silindri telg vertikaalseks ja samuti vertikaalseks ka langemisrenn, sest vastasel korral oleks takistatud nii silindri pöörlemine kui ka raskuste langemine rennis.
2. Kontrollige silindri A puhtust. Siis tõstke õli anum jalgkruvi L abil üles, nii et õli pind oleks 1-2 mm üle mär-

Kui vabastame näpitsa H, hakkab koormus langema ja paneb silindri pöörlema. Teatava pöörlemiskiiruse puhul tasakaalustab siin hõõre ja hõõre langeva koormuse raskuse ja liikumine muutub ühtlaseks. Ühtlase liikumise korral kehtib vale:

$$\eta = f k \frac{t}{S} (P - F + P_1),$$

kus f on koefitsient, mis sõltub anuma diameetrist (vt. joon. 28), k - silindri A koefitsient, P - aluse raskus,

- gi M. Seejuures jälgige, et silindrilise nõu telg ühtiks aluse tsentriga. Selleks on alusel kontsentrilised ringid.
- Lülitage vool solenoidi ja tõstke kergelt ühe käega silindri telge, reguleerige teise käega voolu nii, et silinder vaevu püsiks üleval, s.o. et ta rõhuks laagrit minimaalse jõuga. Nüüd reguleerige õli pind lõplikult märgi M kõrgusele ja riist on mõõtmiseks valmis.
 - Mõõtmiseks võtke stopper ja avage näpits H. Laske koormusel langeda, kuni ta kiirus muutub ühtlaseks. Siis hakake määrama langemise kiirust.
 - Mõõtke stopperiga aeg, mille vältel koormus langes ühtlaselt teepikkuse s võrra. Mõõtke aega vähemalt viis korda.
 - Aluse efektiivkaal, s.o. vahe $P - F = x$ ei ole otseselt mõõdetav. Seepärast tehke kaks mõõtmisseriesiat kahe erineva koormuse väärtuse korral:

$$\eta = f k \frac{t_1}{s} (x + P_{11}),$$

$$\eta = f k \frac{t_2}{s} (x + P_{12}).$$

- Mõõtke silindriga A, mille koefitsient k on teada (suur silinder $k=19,30$). Koefitsient f leidke graafikult (joon.28).
- Kui vedelik on väga viskoosne, siis suurte mõõtmetega silinder ei sobi. Sel juhul võetakse väiksemate mõõtmetega silinder ja määratakse sellele vastav koefitsient k_1 tuntud sisehõõrdekoefitsiendiga vedelikus. Antud juhul määrake väiksema silindri koefitsient sama vedelikku kasutades ilma lisakoormusteta ($n = 0$):

$$\eta = f k_1 \frac{t_2}{s} x.$$

- Toodud kolmest võrrandist kolme tundmatu jaoks määrake suurused x , η ja k_1 . Selleks tehke kolm viiekordset katset: kaks suure silindriga kahe erineva P_1 korral ja üks katse väikese silindriga ilma lisakoormusteta:

Suur silinder		Väike silinder
Lisakoormus $P_{11} =$	Lisakoormus $P_{12} =$	Lisakoormus $P_1 = 0$
1. $t_1 = \dots s$	$t_2 = \dots s$	$t_3 = \dots s$
2. $t_1 = \dots s$		
3.		
4.		
5.		

Keskmiised

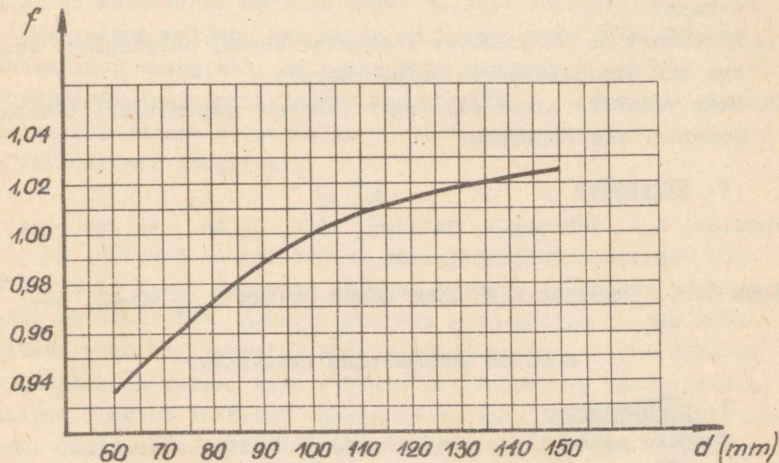
$$\frac{t_1}{s} = \dots$$

$$\frac{t_2}{s} = \dots$$

$$\frac{t_3}{s} = \dots$$

Anuma sisemine diameeter $d = \dots$

Anuma koefitsient $f = \dots$



Joonis 28.

9. Hinnates mõõdetavate suuruste s ja t vigu (ülejäanud suuruste vigu loeme väikesteks viimastega võrreldes ja neid ei arvesta), määrake mõõdetud suuruste vead $\Delta \eta$, Δk_1 ja Δx .

5. Küsimused

1. Sisehõõrdeegur ja tema dimensioon SI-s.
2. Mida tähendab kiiruse gradient $10 \frac{1}{s}$?
3. Millist suunda omab sisehõõrdejõud, mis mõjub kujuteldavale tasapinnalisele vedeliku kihile voolavas vedelikus?
4. Millisel alltoodud vedelikkudest on suurim sisehõõrdeegur: petrooleum, piim, vesi, piiritus?
5. Miks peavad kokku langema anuma J ja silindri A teljed?
6. Miks eespool mainitud teljed peavad olema vertikaalses asendis?
7. Määrata koefitsiendi f dimensioon.
8. Miks ei saa kasutada antud meetodit vee sisehõõrdeeguri määramiseks?
9. Miks koormus G ei hakka kohe liikuma ühtlaselt?
10. Millest oleneb hõõrdejõud, mis mõjub vedelikus liikuvale kehale?
11. Mispärast on turbulentsse voolamise korral hõõrdejõud suurem kui laminaarse voolamise korral?
12. Miks vedelike sisehõõrdeegur väheneb temperatuuri tõustes, gaasidel aga suureneb?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, Tallinn, 1964, §§ 48...54, 94...95, lk.171...200; 356...360.

Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I, § 40-42, 56-57.

SOOJUSE MEHAANILINE EKVIVALENT

1. Tööülesanne

Soojuse mehaanilise ekvivalendi katseline määramine.

2. Töövahendid

Callendari riist koos vajalike vahenditega (vedrukaal, pael, vihid), termomeeter, lehter, mensuur.

3. Töö teoreetilised alused

Kui tehakse tööd hõõrdejõudude ületamisel, siis selleks kulutatud mehaaniline energia muundub soojusenergiaks. Ja vastupidi, kulutades osa mingist soojushulgast selleks, et teha tööd (soojusmasinad), muundub see osa soojushulgast mehaaniliseks energiaks. Sellistes protsessides ei ole tegemist millegi muuga kui ühe ja sama füüsikalise suuruse - energia muundumisega ühest liigist teise, kusjuures peab kehtima energia jäävuse seadus.

Ajalooliselt kujunes välja selline olukord, kus ühe ja sama füüsikalise suuruse - energia eri liike hakati mõõtma erinevates ühikutes. Soojushulka hakati mõõtma kalorites (cal) ja kilokalorites (kcal) ning mehaanilist energiat (tööd) - džaulides (J), kilogramm-meetrites (kgfm), ergides (erg) jne. Hiljem, kui avastati muundumine ühest liigist teise, tekkisid füüsikas mõisted "soojuse mehaaniline ekvivalent" ja "töö termiline ekvivalent". Sest leiti, et kindla hulga mehaanilise energia kulutamisel tekib alati kindel hulk soojusenergiat ja vastupidi. Antud soojushulga täielikul muundumisel tööks saadakse viimast alati ühel ja samal hulgal. Soojuse mehaaniline ekvivalent näitab, kui palju on tarvis teha tööd (kulutada mehaanilist energiat), et saada ühte soojushulga ühikut töö muundumisel soojuseks. Teades tehtud tööd A ja sellele vastavat ekvivalentset soojushulka Q, võib leida soojuse mehaanilise ekvivalendi järgmiselt:

$$E = \frac{A}{Q} \cdot$$

Kui mõlemad energiahulgad oleksid mõõdetud samades ühikutes, siis $E = 1$ (energia jäävuse seadus). Järelikult ei tähenda ekvivalendid midagi muud kui soojushulga ja töö mõõtühikute vahelisi seoseid. Mõõtes kõiki energia liike ühtedes ja samades ühikutes, kaob vajadus ekvivalentide kasutamiseks. Selline olukord tekkiski seoses rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) kasutuselevõtmisega. Igat liiki energiat mõõdetakse selles süsteemis džaulides (J).

Callendari riistaga mõõdetaksegi ühelt poolt tehtud töö hulka A ja teiselt poolt tekkinud soojushulka Q.

Seadeldis kujutab endast silindrilist kalorimeetrit, mis on kinnitatud horisontaalsele teljele. Silindri külgpindadele on mähitud lintide süsteem, mida pingutavad vihid. Silindri pöörlemisel tekib hõõrdumine, mille tagajärjel silindri pööramiseks vajalik töö muundub soojuseks.

Tehtud töö arvutatakse hõõrdejõu ja läbikäidud tee korutisena:

$$A = F s.$$

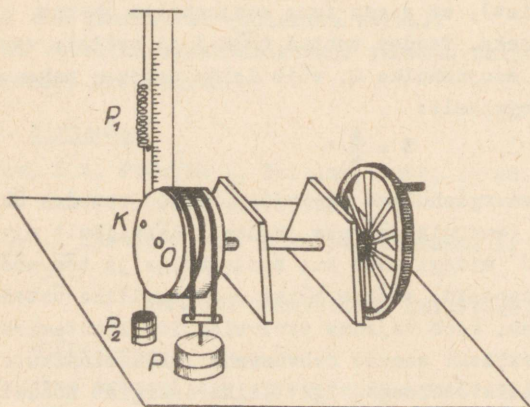
Läbikäidud tee on võrdne silindri pinna edasinihkumisega pöörlemise suunas. Kui katse vältel silinder teeb n tiiru, siis läbitud tee s leiame seosest:

$$s = n\pi D,$$

kus D on silindri läbimõõt ja n - pöörde arv.

Hõõrdejõud F tuleb arvutada vastavalt paela pingutamiseks kasutatavale süsteemile. See süsteem peab tagama hõõrdejõu küllaldase jäävuse katse vältel ja võimaldama selle küllalt täpset mõõtmist.

Antud seadme juures pingutatakse linti vihtidega kahelt poolt (vt. joonis 29). Paigalseisva silindri korral koormus P



Joonis 29.

toetub aluslauale. Koormust P_2 võib muuta ja tema suurus valitakse katsetamise teel. Tasakaalu saavutamiseks kasutatakse veel vedrukaalu (P_1), mis on seotud koormusega P_2 . Kui koormuse P_2 suurus on õieti valitud ja silinder pöörleb ühtlaselt,

siis on koormus P kogu aeg samal kõrgusel ja vedrukaalu lugem P_1 on jääv.

Hõõrdejõu suurus on siis arvutatav järgmiselt:

$$F = P - (P_2 - P_1) = P + P_1 - P_2$$

ja kogu tehtud töö

$$A = F S = (P + P_1 - P_2) \pi D n.$$

See töö läheb silindri välispinna soojendamiseks. Kuna lint on halb soojusjuht, siis praktiliselt kogu soojushulk antakse kalorimeetritele. Kalorimeeter on täidetud veega, mis samuti soojeneb. Kui kalorimeetri mass on m_1 ja erisoojus c_1 , vee mass m_2 ja erisoojus c_2 , siis paela hõõrdumisel tekkinud soojushulk Q väljendub valemiga

$$Q = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t_2 - t_1).$$

Eeldades, et kogu hõõrdumisest tekkinud soojus läks silindrisse ja vette, võib kirjutada

$$E = \frac{A}{Q} = \frac{(P + P_1 - P_2) \pi D n}{(m_1 c_1 + m_2 c_2) (t_2 - t_1)}.$$

4. Töö käik

1. Mõõtku silindri läbimõõtu.
2. Asetage lint ümber kalorimeetri ning kinnitage vihid ja vedrukaal. Valige vihtide raskus P_2 selliselt, et silindri ühtlasel pöörlemisel oleksid koormused tasakaalus. (Enne lindi asetamist tuleb veenduda, et silindri pealispind oleks kuiv.)
3. Kallake silindrisse umbes 300 g vett, mille kogus määrake enne täpsusega 0,1 g. Vee temperatuur (t_1) olgu 2...3°C madalam toatemperatuurist.
4. Märkige tiirudelugeja algseis. Seejärel pange silinder kiiresti, kuid võimalikult ühtlaselt pöörlema. Tuleb jälgida, et vedrukaalu osuti oleks enam-vähem samal jaotisel, mille registreerime (P_1).
5. Vee temperatuur mõõtku läbi silindri teljel oleva ava hariliku termomeetriga. Silinder peab pöörlema niikaua, kuni

temperatuur on tõusnud ligikaudu niisama palju üle toatemperatuuri, kuipalju enne oli alla. Pärast pöörlemise katkestamist oodake seni, kuni temperatuur enam ei tõuse, siis registreerige termomeetri näit t_2 .

6. Samuti märkige üles tiirudelugeja näit n_2 .

Lõpuks eemaldage riista küljest kõik abivahendid, valage vesi välja.

Vaatlustulemused kandke alljärgnevasse tabelisse:

Tiirudelugeja näidud	n_1
	n_2
Pingutavad koormused	P
	P_2
Vedrukaalu keskmine näit	P_1
Hõõrdejõud	F
Silindri läbimõõt	D
" übermõõt	πD
Hõõrdejõu poolt tehtud töö	A
Silindri mass (passi andmetel)	m_1
Silindri erisoojus	c_1
Vee mass	m_2
erisoojus	c_2
Temperatuur algul	t_1
lõpul	t_2
Tekkinud soojushulk	Q
Soojuse mehaaniline ekvivalent	E

5. Küsimused

1. Töö, soojus, energia, nende ühikud.
2. Millised soojuskaod esinevad sellisel mõõtmismeetodil?
3. Miks valitakse vee temperatuur algul 2...3°C alla toatemperatuuri (ja lõpus vastavalt kõrgem)?
4. Kuidas avaldub pöörleval liikumisel töö jõumomendi kaudu?
5. Temperatuuri mõõtmine ja skaalad.
6. Mida nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks?

6. Kirjandus

Lang, J. jt. Füüsika üldkursus I, §§ 268, 269, 228.
Putilov, K.A. Füüsika I, §128.

TAHKE KEHA ERISOOJUS

1. Tööülesanne

Tahke keha erisoojuse määramine segamismeetodil.

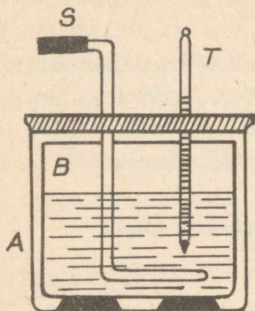
2. Töövahendid

Kalorimeeter, termomeeter, uuritav tahke keha, termos-
taat, elektripliit, tehnilised kaalud.

3. Töö teoreetilised alused

Erisoojuse määramisel segamismeetodil viiakse kuumutatud (allajahutatud) uuritav keha kontakti tuntud soojusmahtuvusega kehaga (või kehadega) (nii-õelda segatakse läbi). Keha erisoojus arvutatakse toimunud soojusvahetusel üleminevate soojushulkade kaudu. Et seejuures ei toimuks soojusvahetust ümbritseva keskkonnaga, kasutatakse sageli selleks otstarbeks konstrueeritud riista - kalorimeetrit. Kalorimeeter koosneb kahest nõust: välimisest (B) ja sisemisest (A), mis on asetatud teineteise sisse ja teineteisest isoleeritud (joon 30). Praktikumis oleval kalorimeetril on põhiliselt isolaatoriks õhk. Kalorimeeter suletakse kaanega, milles on kaks avast: üks segaja jaoks, teine termomeetri jaoks.

Kui kalorimeetris on vee temperatuur madalam kalorimeetrisse paigutatud keha temperatuurist, siis vesi soojeneb ja



Joonis 30.

vee ja keha üldine temperatuur θ . Selle katse tulemust võime väljendada võrrandiga:

$$c_x m(t - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c m_2 (\theta - t_1). \quad (1)$$

Võrrandist (1) leitakse otsitav erisoojus:

$$c_x = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1) + c m_2 (\theta - t_1)}{m (t - \theta)}. \quad (2)$$

Tuleb silmas pidada, et peale soojushulga vahetamist uuritava keha, vee ja kalorimeetri vahel kulub osa soojust segaja ja termomeetri temperatuuri tõstmiseks, samuti on võimalik soojust vahetada keha ja kalorimeetrit ümbritsevate kehade vahel. Mõõtmistel on vaja teha soojuskaod võimalikult väikeseks ja arvutustes võtta arvesse see energia osa, mis on antud katse tegemise jooksul ümbritsevale keskkonnale. Need soojuskaod on suuremalt osalt arvesse võetavad kalorimeetri efektiivse soojusmahtuvuse määramisega.

Formaalselt võime kõik soojuskaod liita juurde sellele soojushulgale, mis kulus kalorimeetri sisemise nõu soojendamiseks - kalorimeeter just nagu neelaks soojust rohkem, kui see on määratud korrutisega $c_1 m_1 (\theta - t_1)$. Seepärast asendame kalorimeetri sisemise nõu soojusmahtuvuse $c_1 m_1$ tundmatu suurusega q , mille nimetame kalorimeetri efektiivseks soojusmahtuvuseks. Viimase saame aga määrata järgmise lisakatse abil.

Kallame kalorimeetrise veehulga massiga m_3 , mille temperatuur t_3 (määratakse kalorimeetris vahetult enne järgmise veehulga juurdelisamist) ulatub mõni kraad allapoole toatemperatuuri. Sellele lisame veehulga massiga m_4 ja temperatuuriga t_4 (mõõdetakse vahetult enne kalorimeetrise kallamist), mis on toatemperatuurist mõni kraad kõrgem. Seejärel, kasutades segajat ja jälgides termomeetrit, määrame segu temperatuuri maksimaalväärtuse t_5 .

Sooja vee poolt äraantud soojushulk peab võrduma külma vee poolt saadud soojushulga ja kalorimeetrile (efektiivse soojusmahtuvusega q) ära antud soojushulga summaga:

$$cm_4(t_4 - t_5) = cm_3(t_5 - t_3) + q(t_5 - t_3).$$

Kalorimeetri efektiivse soojusmahtuvuse jaoks saame viimasest avaldisest:

$$q = c(m_4 \frac{t_4 - t_5}{t_5 - t_3} - m_3). \quad (3)$$

4. Töö käik

1. Uuritava keha annab juhendaja. Kaaluge see keha tehnilistel kaaludel (m).
2. Täitke soojendus anum (mitte selle keskel olev silindriline õõnsus, kuhu paigutatakse uuritav keha) rohkem kui poolest saadik veega ja asetage elektripliidile. Laske uuritav keha peenikese niidi otsas soojendus anuma õõnsusesse. Laske uuritaval kehal sel viisil soojeneda veel vähemalt 10-15 minutit pärast vee keemahakkamist, et ta omandaks vee keemistemperatuuri (t).
3. Keha soojenemise ajal määrake kalorimeetri efektiivne soojusmahtuvus. Selleks kaaluge tühi kalorimeeter (m_0) ja kallake kalorimeetrise 100 g külma kraanivett (m_3).
4. Kaaluge 100 g sooja ($25...27^\circ\text{C}$) vett (m_4).
5. Määrake kalorimeetris oleva vee temperatuur (t_3).
6. Määrake sooja vee temperatuur (t_4) ja kallake see kalorimeetrise. Sulgege kalorimeeter kaanega. Segades vett kalorimeetris, jälgige termomeetri näitu ja fikseerige selle maksimum (t_5).

7. Efektiivse soojusmahtuvuse määramiseks vajalikud mõõtmistulemused kandke kohe järgmisse tabelisse.

Efektiivse soojusmahtuvuse määramine.

Mõõdetud suuruste tähised	m_0	$m_0 + m_3$	m_3	m_4	t_3	t_4	t_5	c	q
Väärtused koos mõõtühikutega									

Kalorimeetri efektiivne soojusmahtuvus arvutage valemist (3).

8. Tühjendage kalorimeeter. Täitke kalorimeeter umbes $\frac{2}{3}$ ulatuses külma kraaniveega ja kaaluge kalorimeeter koos veega (m_2).
9. Sulgege kalorimeeter kaanega ja pange termomeeter läbi vastava ava vette. Segage vett kalorimeetris ja jälgige selle temperatuuri. Soovitav on, et vee temperatuur kalorimeetris oleks mõni kraad alla toatemperatuuri.
10. Kui keha on soojendusnumas küllalt soojenenud, mõõtkte kalorimeetris oleva vee temperatuur (t_1) ja laske uuritav keha kiiresti, kuid ettevaatlikult kalorimeetrisse. Seejuures hoidke keha kogu aeg niidi otsas rippumas (mitte põhja lasta) ja segage vett kalorimeetris. Kalorimeeter peab olema kaanestatud. Jälgides pidevalt vee temperatuuri tõusu, fikseerige selle maksimaalne väärtus θ .
11. Mõõtmistulemused erisoojuse määramiseks kandke kohe järgmisesse tabelisse:

Mõõdetav suurus	Mõõdetav S ja mõõtühik	Mõõtmisvead	
		ΔS	$\frac{\Delta S}{S}$
Uuritava keha mass m			
Kalorimeetri ja vee mass $m_0 + m_2$			
Vee mass m_2			
Vee algtemperatuur t_1			
Segu lõpptemperatuur θ			
Uuritava keha algtemperatuur t			
Keha aine erisoojus c_x			

Uuritava keha erisoojus arvutage valemist (2), võrdsustades seal kalorimeetri sisemise nõu soojusmahtuvuse $c_1 m_1$ tema efektiivse soojusmahtuvusega q .

12. Leidke, millisel mõõdetud suurusel on suurim relatiivne viga. Kontrollige võrratuse $c_1 m_1 < q$ kehtivust. Suuruste c_1 ja m_1 väärtused annab juhendaja.

5. Küsimused

1. Defineerige soojushulga ühikud (cal, kcal, J).
2. Mitme kaloriga võrdub 1 J?
3. Mida nimetatakse tahke keha erisoojuseks?
4. Mille poolest erinevad mõisted "erisoojus" ja "soojusmahtuvus"?
5. Erisoojuse ühikud.
6. Kuidas saab mõõta tahke keha erisoojust?
7. Mis põhimõttel koostatakse soojusliku tasakaalu võrrand?
8. Andke vee erisoojus SI-süsteemis?
9. Kui suur soojushulk kalorites on vajalik, et soojendada m grammi vett temperatuurilt t_1 temperatuurini t_2 ?
10. On ühesuguse ruumalaga vase, tina ja alumiiniumi tükid. Millisel tükil on väiksem ja millisel suurim soojusmahtuvus?
11. Mispärast soojendatakse keha kuivalt, mitte aga keevas vees hoides?
12. Kas keeva vee temperatuur on alati 100°C ?
13. Miks ei tohi soojendatavat keha kalorimeetri põhja lasta?
14. Kas erisoojus sõltub temperatuurist, millest soojendamine algas?
15. Kirjeldage kalorimeetri ehitust.

6. Kirjandus

- Putilov, K.A. Füüsika I, Tallinn, 1964, §78, lk. 300, § 127, lk. 477.
- Schulz, K. Mõõtühikud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, Tallinn, 1965, VIII ptk.

VEE AURUSTUMISSOOJUS

1. Tööülesanne

Vee aurustumissoojuse määramine keemistemperatuuril.

2. Töövahendid

Kalorimeeter, termomeeter, keedunõu koos aurujuhtimistoruga, tehnilised kaalud, elektripliit, anum auru kogumiseks.

3. Töö teoreetilised alused

Kui vesi on soojenenud keemistemperatuurini, siis edasisel soojusenergia juurdeandmisel toimub agregaatoleku muutumine, aurustumine. Juurdeantav soojushulk kulub vedeliku muutmiseks auruks, s.t. molekulaarsete jõudude ületamiseks ja paisumistööks.

Soojushulka, mis on vaja anda vedelikule selleks, et keemistemperatuuril muuta ühikulise massiga vedeliku hulk auruks, nimetatakse aurustumissoojuseks.

Kondenseerudes annab aur ära sama soojushulga. Sel põhimõttel määrataksegi antud töös aurustumissoojus.

M grammi auru, kondenseerudes vedelikuks keemistemperatuuril t , eraldab soojushulga $L M$, kus L on aurustumissoojus. Kui aur juhtida kalorimeetrisse, milles oleva vee temperatuur on t_1 , siis kondenseerumisel tekkinud vedeliku edasisel jahtumisel kondenseerumistemperatuurist kuni lõpptemperatuurini θ eraldub soojushulk

$$c M (t - \theta),$$

kus c on vedeliku erisoojus.

Järelikult auru kondenseerumisel ja vee jahtumisel äraantud soojushulk on

$$L M + c M (t - \theta). \quad (1)$$

See soojushulk läheb vee ja kalorimeetri sisemise nõu soojendamiseks. Soojushulga, mis kulub termomeetri ja segaja soojendamiseks, ning muud soojuskaod jätame esialgu arvestamata.

Kui vee mass kalorimeetris on m grammi, siis soojushulk, mis kulub vee ja kalorimeetri soojendamiseks, avaldub valemiga

$$m c (\theta - t_1) + m_1 c_1 (\theta - t_1), \quad (2)$$

kus m_1 on kalorimeetri sisemise nõu mass ja c_1 - tema erisoojus.

See soojushulk peab võrduma soojushulgaga (1), mille andsid aur kondenseerumisel ja aurust tekkinud vedelik jahtumisel lõpptemperatuurini θ , s.t.

$$L M + M c (t - \theta) = m c (\theta - t_1) + m_1 c_1 (\theta - t).$$

Siit saame valemi vee aurustumissoojuse arvutamiseks

$$L = \frac{(m c + m_1 c_1) (\theta - t_1) - M c (t - \theta)}{M}. \quad (3)$$

Täpsemal mõõtmisel on tarvis võtta arvesse ka soojushulka, mis kulub termomeetri ja segaja soojendamiseks, samuti soojuskadusid ümbritsevasse keskkonda. Suuremalt jaolt on need arvessevõetavad kalorimeetri efektiivse soojusmahtuvuse (vt. lk. 153 ja 154) kaudu. Kui oleme määranud kalorimeetri efektiivse soojusmahtuvuse q , siis asendame kalorimeetri sisemise nõu soojusmahtuvuse $c_1 m_1$ valemis (3) selle väärtusega.

4. Töö käik

1. Valage keedunõusse vett $\frac{3}{4}$ tema ruumalast ja asetage seejärel keedunõu elektripliidile soojenema.
2. Võtke tühi kalorimeeter ning määrake selle mass m_0 tehnilistel kaaludel.
3. Täitke kalorimeeter $\frac{3}{4}$ ruumala ulatuses veega ja kaaluge uuesti, et leida vee massi m .
4. Kui keedunõust tuleb juba piisavalt auru, võrrelge kalorimeetris oleva vee temperatuuri t_1 toatemperatuuriga t_0 .
5. Viige aurujuhtimistoru ots kalorimeetris olevasse vette, kus siis aur kondenseerub. Ettevaatlikult vett segades jälgige temperatuuri tõusu. Kalorimeetris oleva vee temperatuuri tõstke nii mitme kraadi võrra üle toatemperatuuri, kui mitme kraadi võrra vee temperatuur enne oli alla toatemperatuuri.

Et vältida juba torus kondenseerunud veepiisakeste sattumist kalorimeetrisse, on täpsetel mõõtmistel toru otsa paigutatud püünis, mis laseb edasi ainult auru. Püünise puudumise korral on tarvis kalorimeetrit hoida keedunõust kõrgemal, et torus kondenseerunud vesi valguks keedunõusse tagasi.

6. Kui vajalik temperatuur on saavutatud, siis eemaldage aurutoru kalorimeetrist. (Soojendamist mitte enne lõpetada) Kirjutage üles lõpptemperatuur (θ).
7. Võtke termomeeter välja ja kaaluge kalorimeeter veega veel kord, et teha kindlaks vee massi, mis lisandus auru kondenseerumisel (M).
8. Täpsustage tööülesannet juhendaja juures. Kui laboratoorne töö tuleb sooritada ilma kalorimeetri efektiivse soojusmahtuvuse määramiseta, siis teatab juhendaja kalorimeetri sisemise nõu massi (m_1) ja selle erisoojuse (c_1). Vastupidisel juhul määrake kalorimeetri efektiivne soojusmahtuvus nii, nagu on näidatud lk. 153 ja 154.
9. Mõõtmistulemused kandke järgmistesse tabelitesse:

Mõõdetav suurus	Mõõtarv S ja mõõtühik	Mõõtmisvead	
		ΔS	$\frac{\Delta S}{S}$
Tühja kalorimeetri mass m_0			
Kalorimeetri ja vee mass $m_0 + m$			
Vee mass m			
Vee algtemperatuur t_1			
Toatemperatuur t_0			
Segu temperatuur θ			
Kondenseerunud auru mass M			
Auru temperatuur t			
Kalorimeetri soojusmahtuvus $q = c_1 m_1$			
Aurustumissoojus L			

Efektiivse soojusmahtuvuse määramine

Mõõdetud suuruse tähis	$m_0 + m_3$	m_3	m_4	t_3	t_4	t_5	q
Väärtus ja mõõtühik							

5. Küsimused

1. Defineerige soojushulga ühikud (cal, kcal, J) ja leidke nendevahelised seosed.
2. Mida nimetatakse vee aurustumissoojuseks, aurumissoojuseks?
3. Aurustumissoojuse ühikud.
4. Mida nimetatakse aurumiseks?
5. Andke küllastatud ja küllastamata auru määste.
6. Sõnastage keemisseadused.
7. Mis põhimõttel koostatakse soojusliku tasakaalu võrrand?
8. Kuidas oleneb keemistemperatuur õhurõhust?
9. Miks tõmbub vesi kalorimeetrist keedukolbi, kui tuli kustutada enne kalorimeetri eemaldamist aurutoru otsast?
10. Milline soojushulk on vajalik, et muuta 1 kg vett temperatuuril 0°C auruks temperatuuril 100°C .
11. Milline soojushulk on vajalik, et muuta 1 kg jääd temperatuuril 0°C auruks temperatuuril 100°C .
12. Vee aurustumissoojus on suurem kui eetril. Miks eeter, kui temaga käsi märjaks teha, tugevamini jahutab kätt kui vesi sellisel juhul?
13. Kuidas sõltub aurumissoojus temperatuurist?
14. Kui suur on vee aurustumissoojus keemistemperatuuril ja normaalrõhul?

6. Kirjandus

- Puřilov, K.A, Füüsika I, Tallinn, 1964, § 108, lk.413, § 118, lk.456 ja § 78, lk.300.
- Schul'ts, K. Mõõtühikud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, Tallinn, 1965, ptk. VIII.

POISSONI KONSTANT

1. Tööülesanne

Õhu moolsoojuste (erisoojuste) suhte ehk Poissoni konstandi määramine Clémenti-Desormes'i meetodil.

2. Toovahendid

Clémenti-Desormes'i riist, käekell.

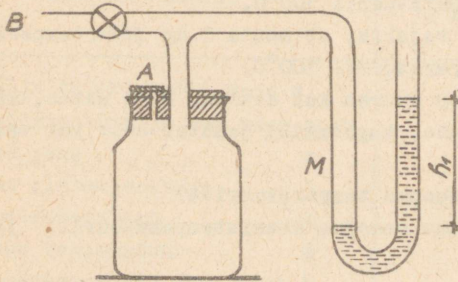
3. Töö teoreetilised alused

Gaasi adiabaatilisel protsessil on kehtiv Poissoni seadus:

$$p V^\kappa = \text{const},$$

kus p on gaasi rõhk, V -ruumala ja $\kappa = C_p/C_v$ - gaasi moolsoojuste (või erisoojuste) suhe (C_p - gaasi moolsoojus jääval rõhul ja C_v - gaasi moolsoojus jääval ruumalal).

Clémenti-Desormes'i meetod võimaldab lihtsal viisil määrata C_p ja C_v suhet. Vastav aparaat koosneb umbes 10 l mahtuvusega pudelist, mille korki läbiva toru ühe haru küljes on vedelikmanomeeter M ja teine haru B on kraaniga suletav. Korgi teine ava A on võrdlemisi suur ja kraaniga A suletav.



Joonis 31.

Olgu pudelis toatemperatuuril mingi gaasihulk ruumalaga V_1 rõhul p_1 . Olgu p_1 natuke suurem atmosfäärirõhust p_2 . Vahet näitab vedelikmanomeeter (näit h_1). Kui avada nüüd momentiks kraan A , siis pudelis saab rõhk võrdseks välisrõhuga p_2 ja gaasi ruumala võrdseks V_2 -ga. Kuna

rõhu võrdsustamine pudelis välisrõhuga toimub momentaanselt, siis võime soojusvahetuse pudeli ja väliskeskkonna vahel luge-

da võrdseks nulliga (soojusvahetus ei saa toimuda silmapilk- selt, vaid selleks kulub mõningane aeg). Seega võib antud protsessi lugeda adiabaatiliseks ja kirjutada:

$$p_1 V_1^{\kappa} = p_2 V_2^{\kappa}. \quad (1)$$

Selle protsessi tulemusena langeb gaasi temperatuur. Nüüd hakkab temperatuur tõusma. Kuna kraan A kohe suleti, siis suureneb ka gaasi rõhk ning saavutab väärtuse p_3 (manomeetri näit h_2), kui gaasi temperatuur on võrdsustunud toatemperatuuriga. Viimase protsessi tulemusena muutub ka gaasi ruumala vedeliku liikumise tõttu manomeetris. Selle jäätame aga arvestamata, sest pudeli mõõtmised on palju suuremad võrreldes manomeetri toru mõõtmetega.

Algoleku ja uue lõppoleku parameetrid rahuldavad Boyle'i-Mariotte'i seadust, kuna nii alg- kui lõpptemperatuurid võrduvad toatemperatuuriga:

$$p_1 V_1 = p_3 V_2. \quad (2)$$

Ruumala V_1 võrdub pudeli ruumalaga, kuid V_2 on tundmatu, sest osa gaasist voolas klapi avamisel pudelist välja. Need suurused on aga elimineeritavad järgmisel viisil. Tõsta me avaldise (2) astmesse κ ja jagame tulemuse avaldisega (1). Saame:

$$\frac{p_1^{\kappa}}{p_1} = \frac{p_3^{\kappa}}{p_2} = p_1^{\kappa-1}. \quad (3)$$

Logaritmidest avaldist (3), võime leida κ jaoks avaldise:

$$\kappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log p_1 - \log p_3}, \quad (4)$$

kus esialgu on tundmatud rõhu väärtused p_1 ja p_3 . Viimased on avaldatavad atmosfääri rõhu p_2 ja manomeetri näitude kaudu järgmiselt:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 + e h_1; \\ p_3 &= p_2 + e h_2, \end{aligned} \quad (5)$$

kus e on manomeetris kasutatava vedeliku eriraskus.

Valemid (4) ja (5) võimaldavad katse tulemuste põhjal arvutada κ . Et arvutused oleksid lühemad, lihtsustame arvutuseeskirja järgmiselt. Kasutame asjaolu, et ülerrõhud e_{h_1} ja e_{h_2} on katse tingimuste kohaselt väikesed, võrreldes rõhuga p_2 . Pärast asendusi (5) avaldises (4) arendame logaritmid ritta väikeste parameetrite e_{h_1}/p_2 ja e_{h_2}/p_2 järgi ning võtame ainult reaksarenduste kaks esimest liiget. Tulemuseks saame:

$$\kappa = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \cdot$$

4. Töö käik

1. Avage kraan B. Tekitage pudelis ülerrõhk. Seda tuleb teha ettevaatlikult, nii et manomeetris olevat vedelikku viimasesest välja ei puhutaks.
2. Sulgege kraan B ja oodake umbes 10 minutit, kuni manomeetri näit enam ei muutu (pudelis on õhk toatemperatuuri juures). Seejärel võtke lugem h_1 .
3. Avage 0,2 - 0,5 sekundiks kraan A.
4. Et gaasi temperatuur saaks pärast kraani avamist-sulgemist jälle võrdseks toatemperatuuriga, oodake enne lugem h_2 võtmist veel vähemalt 10 minutit.
5. Korrake katset vähemalt 3 korda ja võtke tulemustest aritmeetiline keskmine.
6. Rinnake mõõdetud suuruste h_1 ja h_2 mõõtmistäpsusi ja arvutage saadud κ väärtuse absoluutne ja suhteline viga.
7. Katse tulemused kandke tabelisse:

Nr.	h_1	h_2	$h_1 - h_2$	κ
1.				
2.				
3.				

Keskmine $C_p/C_v = \dots$

5. Küsimused

1. Defineerige mõisted: soojusmahtuvus, erisoojus, moolsoojus C_p ja C_v ning nende ühikud.
2. Mida nimetatakse vabadusastmete arvuks?
3. Milline energia vastab molekuli ühele vabadusastmele?
4. Mis on gaasi universaalkonstandi füüsikaline tähendus?
5. Kuidas on moolsoojused sõltuvad gaasi molekulide vabadusastmete arvust?
6. Arvutage õhu moolsoojused.
7. Millest oleneb gaasidel suhte C_p/C_v arvuline väärtus?
8. Milliseid praktikas ettetulevaid protsesse võib lugeda adiabaatilisteks?
9. Millal kehtib Clapeyroni võrrand?
10. Milline gaas on ideaalne?
11. Leida rõhk antud laboratoorse töö katseseadeldises, kui petrooleummanomeetri näit on 1 cm. Vastus anda SI-süsteemi ühikutes.
12. Mida nimetatakse temperatuuriks?
13. Mida tuleb mõista termodünaamilise tasakaalu all?
14. Kas võib rääkida temperatuurist, kui protsess ei ole tasakaaluline?
15. Kuidas muutub gaasi siseenergia adiabaatilises protsessis?
16. Mis pärast antud katseseadeldises on manomeeter täidetud petrooleumiga, aga mitte elavhõbedaga?

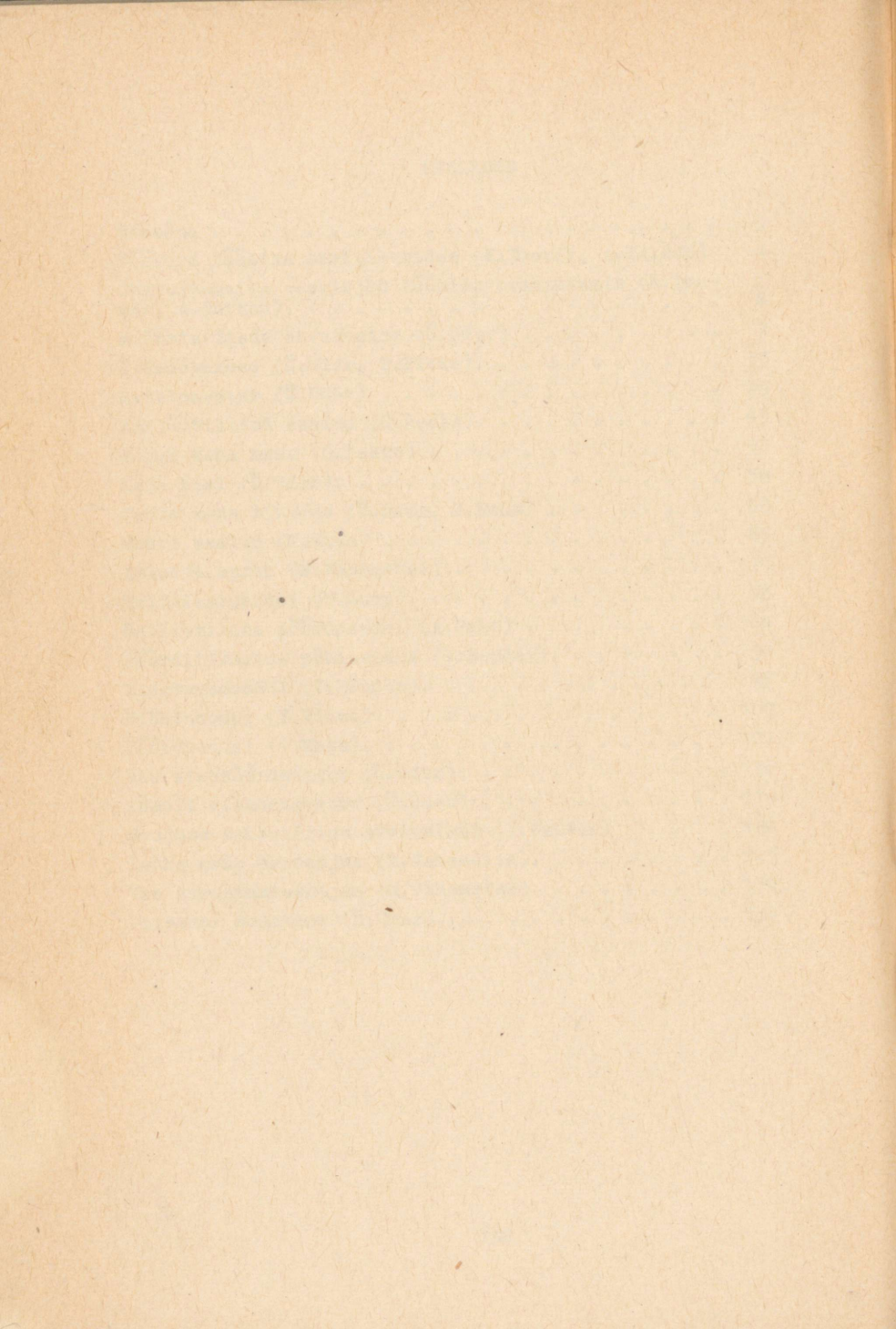
6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I, 1964, §§ 76, 86, 87, 100.

Фрим С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I, § 48,49, 70.

SISUKORD

Eessõna	3
Töökord füüsika praktikumides (K.Tõomik, A.Talkop)	4
Ohutustehnika eeskirjad füüsika praktikumis (K.Tõomik, A.Talkop).	6
Mõõtmisvigade arvutamine (Ü.Uder)	7
Üldmõõtmised (Ü.Uder, T.Pikka).	33
Katetomeeter (Ü.Uder)	39
Analüütilised kaalud (G.Peets).	45
Kerge keha mass (G.Peets)	52
Keha kaal (Ü.Uder).	58
Tahke keha tihedus (Ü.Uder, T.Ruus)	63
Mohri kaalud (T.Ruus)	65
Atwoodi masin (M.Vahemetsa)	71
Trifilaarpendel (N.Lump).	78
Ballistiline pöördpendel (A.Paat)	84
Pöördliikumise põhiseadus (V.Bender).	90
Elastsusmoodul (V.Bender).	95
Nihkemoodul (E.Timma).	100
Pöördpendel (G.Mets).	107
Vee sisehõõrdetegur (Ü.Uder).	112
Kämpfi viskosimeeter (Ü.Uder)	116
Soojuse mehaaniline ekvivalent (J.Valdur)	120
Tahke keha erisoojus (M.Vahemetsa).	125
Vee aurustumissoojus (M.Vahemetsa).	130
Poissoni konstant (Ü.Uder).	134



Hind 24 kop.

A
30602
109 066

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00497025 9