

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL



ÜLDMÕÕTMISTE,
MEHAANIKA JA
MOLEKULAAR-
FÜÜSIKA
PRAKTIKUMI
TÖÖJUHENDID

TARTU 1968

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL
Üldfüüsika kateeder

ÜLDMÕÕTMISTE, MEHAANIKA
JA MOLEKULAARFÜÜSIKA
PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID

Teine, täiendatud ja parandatud trükk

Koostanud ja toimetanud E. Tamm

Tartu 1968

E e s s õ n a .

Käesolev füüsika praktikumi tööjuhendite kogumik on 1962. a. ilmunud samalaadse kogumiku oluliselt täiendatud ja parandatud väljaanne. Kogumikus trükitud tööjuhendid on mõeldud kasutamiseks peamiselt TRÜ Füüsika-Keemia- ja Matemaatikateaduskonna, vähemas ulatuses ka teiste teaduskondade üliõpilastele.

Kogumikus on püütud vältida liigset detailsust tööülesannete kirjeldamisel, jätta üliõpilastele rohkem iseseisvat mõttetööd. Paljudes töödes tuleb üliõpilastel leida õige meetodika minimaalse piirveaga katsetulemuse saamiseks. See juhib tähelepanu eksperimendi planeerimise vajadusele. On pööratud tähelepanu katseandmete graafilise töötlemise meetodile, mis mõnel juhul tööd tunduvalt kergendab ja on ülevaatlikum.

Praktilised tööd, mille juhendid on võetud käesolevasse kogumikku, on enamikus klassikalised füüsika praktikumi tööd. Juhendid on kateedri õppejõudude poolt täiendatud ja kohandatud konkreetsetele tingimustele. Kogumiku koostaja on paljusid juhendeid muutnud üliõpilastega töötamisel omandatud kogemuste alusel.

Kateedri õppejõududest on kogumikus esitatud tööde ülesseadmisel ja juhendite kohandamisel rohkem vaeva näinud K. Kudu, H. Marran, E. Tamm. Originaaltöödest tuleks mainida H. Tammeti "Tõmbedeformatsiooni uurimist" ja E. Tamme "Ajarelee kaliibrimist". Kogumiku kokkuseadmisel olid toimetajale suureks abiks T. Punga, H. Voolaid, L. Taraste, H. Uibo ja H. Kõrge.

Toimetaja.

1. LUGEMISSEADMETEGA TUTVUMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine mitmesuguste lugemisseadmetega ja lugemi võtmisel tekkivate vigade hindamine.

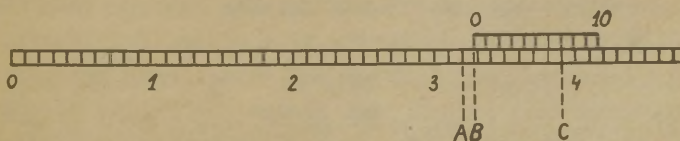
2. Töövahendid.

Skaaladega lükatid nr. 1, 2 ja 3, spiraalnooniuse mudel, paks mõõtjoolaud, risttahukas ja koonustega silinder, kruvik, mõõtokulaariga mikroskoop, voltmeeter, taskulampipatarei, metallmõõtjoolaud.

3. Nooniuse põhimõte.

0,01-mm täpsusega ja täpsema millimeeterskaala valmistamine pole mõõteriistatööstusele probleemiks. Probleemiks võib aga osutuda niisuguse skaala kasutamine, sest keegi pole suuteline millimeeterjaotistega skaalalt eksimatult silma järgi sajandik- ja tuhandikmillimeetreid lugema. Väiksemate jaotiste kandmine skaalale teeks aga selle kalliks ja raskendaks tema kasutamist (lugeda tuleks mikroskoobi abil). Seetõttu kasutatakse skaalajaotiste murdosade lugemiseks tavaliselt lihtsat abiseadet - noonius.

Lihtsaim noonius on piki põhiskaalat nihutatav väike abiskaala (joon. 1).



Joon. 1.

Abiskaala nullkriips on ühtaegu märgiks, mille järgi on vaja põhiskaalalt lugem võtta.

Nooniuse kasutamisel teeme kõigepealt kindlaks, kas abiskaala jaotised on põhiskaala jaotistest pikemad või lühemad. Tavaliselt on nad lühemad. Parema loetavuse huvides tehakse nooniuse jaotised vahel pikemad, nii et nad on veidi lühemad (või pikemad) kui põhiskaala 2, 3 jne. jaotist.

Järgnevalt nihutame nooniust nii, et abiskaala nullkriips langeks täpselt kokku mõne põhiskaala kriipsuga. Näeme nüüd, et abiskaala järgmised kriipsud lähevad põhiskaala kriipsudest ikka enam ja enam lahku, kuni abiskaala lõpu jõudes tema kriipsud hakkavad lähenema põhiskaala kriipsudele teiselt poolt. Abiskaala viimane kriips langeb tavaliselt jälle põhiskaala kriipsuga täpselt kokku. Kui see on nii, siis on nooniuse kasutamine lihtne. Nimelt vastab nüüd terve abiskaala ühele põhiskaala jaotisele. Kui abiskaalal on kümme jaotist, siis on nooniuse jaotise väärtus $1/10$ põhiskaala jaotisest, kui abiskaalal on 30 jaotist, siis on nooniuse jaotise väärtus $1/30$ põhiskaala jaotisest. Vaatame uuesti joonist 1. Siin ei lange abiskaala nulljoon kokku ühegi põhiskaala jaotisega. Abiskaala nulljoone asendi järgi teeme kindlaks, et lugem on 32 täisjaotist ja veel natuke (lõik AB). Nüüd vaatame, mitmes abiskaala kriips langeb kõige paremini kokku mingi põhiskaala kriipsuga. Selleks on 7. kriips. Et 10 jaotisega abiskaalale vastas 1 põhijaotis, siis 7-le abiskaala jaotisele vastab 0,7 põhijaotist. Lugem on seega 32,7.

Vaatleme nooniust veidi lähemalt. Olgu põhiskaala jaotise pikkus a , nooniuse jaotiste arv N , nooniuse kogupikkus olgu m põhiskaala jaotist, nooniuse ühe jaotise pikkus olgu x . Põhiskaala jaotise murdosa (lõik AB, joon. 1) määratakse kahe lõigu vahena:

$$AB = AC - BC = 7a - 7x = 7(a-x). \quad (1)$$

Tuli välja sama, mis eelnevast arutlusest - lõik AB on võrdne 1 nooniuse jaotise 7-kordse väärtusega. Siit on aga näha, et nooniuse jaotise väärtus - nooniuse täpsus Δx - on

põhiskaala jaotise ja noonluse jaotise pikkuste vahe (kui noonluse jaotised on pikemad, siis on noonluse täpsus võrdne $2a-x$, $3a-x$ jne.). Asendades noonluse jaotise pikkuse x tema avaldisega

$$x = \frac{ma}{N}, \quad (2)$$

saame

$$\Delta x = a - \frac{ma}{N} = a \left(\frac{N-m}{N} \right) = \frac{a}{N} \quad (3)$$

(kuna $N-m = 1$; kui noonluse jaotised on pikemad, saame $2N-m = 1$, $3N-m = 1$ jne.). Saime jällegi sama mis varem - noonluse täpsuse leidmiseks tuleb põhiskaala jaotise pikkus jagada abiskaala jaotiste arvuga. Valemid 1 ja 2 on täiesti üldised, kehtivad mistahes noonluste korral.

Kõik mõttekäigud jäävad samaks ka siis, kui on tegemist kraadidivõrse ja minutitesse jaotatud skaaladega. Arvutamise läheb vaid keerulisemaks, sest kraadi ja minuti suhe ei vasta kümnendüsteemile.

Ülesanne. Mis teha siis, kui abiskaala nullseisu korral ei lange põhiskaalaga kokku mitte ainult viimane abiskaala kriips, vaid ka mingi vahepealne kriips?

Ülesanne. Kuidas tuleb mõõta noonlusega, mille abiskaala jaotised on põhiskaala jaotistest pikemad?

4. Ristmastaap ja spiraalnoonlus.

Põhiskaala jaotiste sajandike ja tuhandike määramiseks kasutatakse ristmastaapi ja spiraalnoonlust. Kõige sagedamini kasutatakse neid optiliste lugemisseadmete okulaarides, ristmastaapi aga vahel ka joonlaudade, mallide jne. korral.

Transversaalne noonlus ehk ristmastaap (joon. 2) kujutab ristkülikut, mille kõik küljed on jagatud 10-ks osaks. Põhiskaalaga paralleelse külje (või tema kujutise) pikkus on täpselt võrdne põhiskaala ühe jaotise (või tema kujutise) pikkusega, tema kümnendike abil määratakse põhiskaala jaotiste kümnendikosi. Sajandikke ja tuhandikke võimaldavad lugeda

diagonaaljooned. Kolmnurkade ABC ja ADE sarnasusest saame:

$$AE = AC \frac{ED}{CB} = 0,1 \frac{5,9}{10} = 0,059.$$

Mõõteriista lugem on

13,259.

Ka siin on abiskaala nulljoon põhiskaalalt lugemi võtmise märgiks.

Joonlaudadel oleva ristmastaabi korral ühtib abiskaala null alati ühe põhiskaala jaotisega, märgiks abiskaalalt lugemi võtmisel on mõõdetava eseme ots.

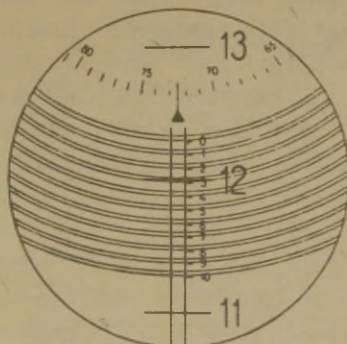
Spiraalnooniust kasutatakse eranditult ainult optilistes lugemisseadmetes. Objektiiv poolt tekitatud põhiskaala kujutisega samas tasapinnas asub klaasplaat, millele on kantud 10 jaotisega liikumatu skaala. (Joon. 3). Skaala pikkus on täpselt võrdne ühe jaotise pikkusega põhiskaala kujutisel. Liikumatu abiskaala nulljoon on märgiks põhiskaalalt lugemi võtmi-

12

Joon. 2.

sel. Liikumatu skaala kohal on teine klaasplaat, mille liikumatu skaalaga samas tasandis asuvale pinnale on kantud 100 jaotisega ringskaala ja kümne topeltkeeruga Archimedese spiraal /2/. Plaati saab pöörata ringskaala ja spiraali ühise keskpunkti ümber. Spiraali keerdude vahe võrdub täpselt liikumatu skaala ühe jaotisega (1/10 põhiskaala jaotisest). Archimedese spiraalil on selline omadus, et kui teda pöörata ümber keskpunkti, siis spiraalikeeru lõikepunkt keeruga ristuva sirgega nihkub mööda sirget, kusjuures nihke suurus on võrdeline pöördenurgaga. Täispöördele vastab ühe keeruvahega

võrdne nihe. Seega saab ringskaalalt liikumatu skaala juures oleva indekstriipsu kohalt lugeda põhiskaala sajandikke ja tuhandikke, silma järgi tuhandikjaotist jagades aga ka kümnetuhandikke.



Joon. 3.

Spiraali keerud on tavaliselt kahekordsed, sest silm hindab väga täpselt ühe joone kauguste võrdsust kahest lähedal asuvast joonest.

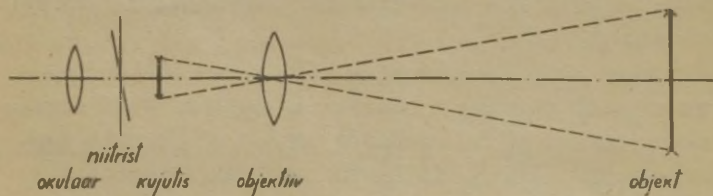
Mikroskoop spiraalnooniusega varustatud okulaariga nihkub tavaliselt tervikuna põhiskaala suhtes. Tema fikseeritud asendi korral on vaateväljas näha 3 põhiskaala jaotist, millest üks lõikab liikumatut skaalat. Jooniselt 3 saame võtta kohe lugemi täisosad ja kümnendikud: 12,2. Et ringskaala nullseisu korral ühtivad spiraalikeerud liikumatu skaala jaotistega, siis pöörates spiraali, kuni üks keerd ühtib põhiskaala jaotisega, loeme ringskaalalt selle põhiskaala jaotise kauguse abiskaala teisest jaotisest: 0,0725. Kogu lugem on siis 12,2725.

5. Parallaktiline viga.

Parallaktiline viga ilmneb hästi paksu joonlauaga mõõtmisel. Mõõteskaala on niisugusel juhul tublisti ülal-

pool objekti ja lugem oleneb silma asendist. Õige lugemi saamiseks tuleb vaadelda täpselt risti skaalaga. Seda polegi nii kerge teha. Mõnel juhul võib vaatesihi korrigeerimiseks tarvitada kolmnurka, see on aga tülikas. Elektrimõõteriistades tarvitatakse tihti õhukesi nugaosuteid. Sellise osuti ots paistab joonena ainult siis, kui vaatame teda serva poolt. See garanteerib vaatesihi ristiseisu skaalaga. Nugaosuti ei võimalda kuigi suurt täpsust. Hoopiski paremaid tulemusi annab peegelskaala. Peegelskaalaga mõõteriistalt lugemi võtmisel tuleb vaadata nii, et osuti ja tema peegeldus langeksid kokku. Peeglist võib vaadelda ka oma silma. Kui osuti poolitab silma peegelduse, on vaatesiht peegluga väga täpselt risti.

Eriti ohtlik on parallaktiline viga optiliste lugemiseadmete korral, kuna asjatundmatu vaatleja ei taipu niisugusel juhul parallaksile mingit tähelepanu osutada. Parallaktilise vea olemust pikksilmaga viseerimisel selgitab joonis 4.



Joon. 4.

Okulaari edasi-tagasi liigutades (teravustades) võib okulaari asend jääda selliseks, et objekti kujutis asub veidi tagapool niitristi. Kui nüüd vaatleja veidi pead liigutab, näib kujutis niitristi suhtes liikuvat ja täpne viseerimine on võimatu. Et parallaktilist viga vältida, tuleb okulaari koos niitristiga nihutada nii, et objekti kujutis langeks täpselt niitristile. Siis on niitrist ja ku-

jutis ühtviisi teravad. Teravuse järgi aga pole võimalik sellist olukorda täpselt ära tunda. Seetõttu peab optilise lugemisseadme teravustamisel alati veidi pead liigutama, et kontrollida parallaktilise vea esinemist, ja teravustama nii-kausa, kuni kujutis enam niitristi suhtes ei liigu.

6. Reaktsioonaja mõõtmine.

Vaatleja reaktsiooni viibimine piirab ajavahemike mõõtmise täpsust. Reaktsiooniaeg on individuaalne. Kindla vaatleja korral sõltub ta mitmesugustest teguritest, kõigepealt aga signalist. Meie katsetes kasutatakse raskesti märgatavat signaali: joonlaua kukkumise algmomenti. Katse ise on järgmine. Üks osavõtja (abiline) asetab metalljoonlaua vertikaalselt vastu seinale, nii et nullkriips ühtib seinale tõmmatud horisontaaljoonega. Teine osavõtja (katseisik) hoiab kätt vahetult joonlaua juures nullkriipsu lähedal. Abiline laseb ootamatult joonlaua lahti ja katseisik peab joonlaua vastu seinale surudes võimalikult kiirelt peatama. Siis võetakse lugem, mis näitab, kui palju joonlaud jõudis langeda. Vaba langemise valem järgi arvutatakse vastav aeg. Nii tuleb teha kümme mõõtmist. Tulemuste järgi arvutatakse keskmine reaktsiooniaeg \bar{t} ja reaktsioonaja standardhälve:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}},$$

kus t_i on üksikud reaktsioonajad ja n - katsete arv.

Ajavahemike mõõtmisel ei ole oluline mitte niivõrd reaktsiooniaeg kui reaktsiooniaegade vahe. See on juhuslik suurus, mille ruutkeskmine väärtus (standardhälve) on

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{2} \sigma_t.$$

$\sigma_{\Delta t}$ iseloomustab võimalikku mõõtmisviga ajavahemike registreerimisel.

Kes viimast valemit ei usalda, võib arvutada ka otsestelt

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1})^2}{n-2}}$$

7. Töö käik.

Töö tehakse terve grupiga ühel päeval. Selleks on töö jagatud nummerdatud etappideks.

Etapid on järgmised:

1. Tutvumine noonluste mudeliga nr. 1. Lugemite leidmine märkjoonte a, b, c ja d järgi.
2. Tutvumine noonluste mudeliga nr. 2. Lugemite leidmine märkjoonte a, b, c ja d järgi. Lugemit märkjoone a järgi tuleb kontrollida millimeeterjoonlauaga. Lubatav eksitus lugemisel on kuni 5 ühikut.
3. Tutvumine noonluste mudeliga nr. 3. Lugemite võtmine märkjoonte a, b, c järgi.
4. Tutvumine spiraalnoonluse mudeliga. Lugemite võtmine märkjoonte a, b ja c järgi.
5. Mõõtmise paksu joonlauaga. Mõõdame kahe paberilehele tehtud märgi vahelise kauguse. Sama kauguse mõõdame kontrolliks uuesti, asetades joonlaua küljele, nii et skaala puudutab paberit. Paksu joonlauaga mõõdame veel metallist risttahuka kolm külge. Samad kolm külge mõõdame kontrolliks tavalise metalljoonlauaga. Tavalise metalljoonlauaga mõõdame kooniliste otstega silindri diameetri. Sama diameetri mõõdame kontrolliks kruvikuga.
6. Tutvumine mõõtskaalaga mikroskoobiga. Harjutame mikroskoobi parallaxivaba teravustamist mingile objektile.
7. Patarei pinge mõõtmise peegelskaalaga voltmeetri abil. Voltmeetri osuti algseis ei ole nullis, seetõttu tuleb arvesse võtta nulli parand. Teeme kindlaks garanteeritud mõõtmistäpsuse.

8. Reaktsioonaja mõõtmine.

8. Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 46 - 55, lk. 58 - 64.

2. A. Borkvell. Matemaatilise analüüsi kursus I. ERK, Tallinn, 1958, lk. 48.

3. Физический энциклопедический словарь. Т.3. Москва, 1963, стр. 433.

2. TAHKE KEHA ERIKAALU MÄÄRAMINE NIHIKU, KRUVIKU JA TEHNILISTE KAALUDE ABIL.

1. Tööülesanne.

Tutvumine nihiku, kruviku ja tehniliste kaaludega. Korrapärase geomeetrilise kujuga keha erikaalu määramine lineaarmõõtmete ja kaalu kaudu.

2. Töövahendid.

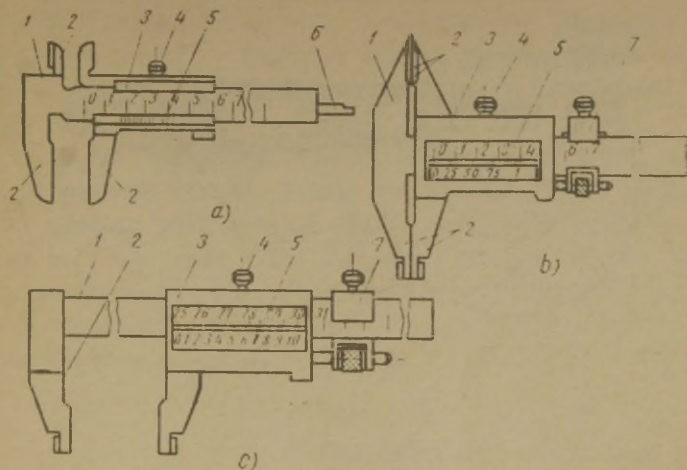
Nihik, kruvik, tehnilised kaalud, vihid ja uuritav keha.

3. Lineaarmõõtmete määramine.

Uuritava keha lineaarmõõtmete määramiseks kasutatakse antud töös nihikut ja kruvikut.

Nihik on mõõtehaaradega (2, joon. 1) varustatud mõõtjoonlaud. Nõukogude Liidus toodetakse ainult millimeeter-skaalaga nihikuid. Nihik on ette nähtud välis- ja sisemõõtmete mõõtmiseks, mõned tüübid ka avade sügavuse mõõtmiseks mõõtevardaga. Üks mõõtehaaradest on osa liikuvast raamist (3) ja on nihutatav teise suhtes. Lugemi täpsemaks võtmiseks on liikuvale raamil lineaarnoonius täpsusega 0,1 või 0,05 mm. (Nooniuse põhimõttest ja kasutamisest loe käesoleva kogumiku juhendist nr. 1.) Nooniuse nulljoon on märk, mille kohalt võetakse lugem joonlaua skaalalt.

Välismõõtmete mõõtmiseks asetatakse mõõdetav ese mõõtehaarade vahele. Sealjuures tuleb saavutada mõõtepinde parast kontakti mõõdetava esemega; ei tohi esineda loksutusi, kuid ei tohi suruda mõõtepinde ka liiga tugevasti eseme

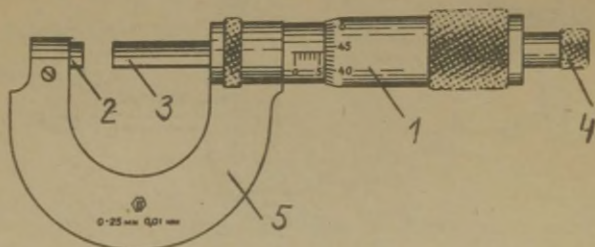


Joon. 1.

vastu, sellest võib näit väheneda. Mõnedel nihikute tüüpidel on peenreguleerimiskruvi (7) raami sujuvaks nihutamiseks. Sisemõõtmete mõõtmisel tuleb mõnede nihikutüüpide korral (joon. 1, b,c) lugemile liita mõõtepindadevaheline kaugus nullasendis (tavaliselt on see märgitud mõõttehaara-dele).

Kruvik koosneb massiivsest klambrist (5, joon.2), mille külge kinnitatud keermeetatud avaga torus - mutris - võib edasi-tagasi liikuda kruvi (3). Kruvisamm on 0,5 mm, see-ga nihkub kruvi mõõtepind ühe täispöördega kruvi telje si-his mutri suhtes 0,5 mm. Täispöörete arvu (nihke täis- ja poolmillimeetreid) loetakse mutrile kantud kahekordselt skaalalt. Lugemi võtmiseks 0,01-mm täpsusega on kruviga ühendatud trumlile (1) kantud 50 jaotisega ringskaala. Ring-skaala lugem võetakse lineaarskaala keskjoone kohalt.

Enne mõõtmisele asumist tuleb kontrollida, kas mõõtte-



Joon. 2.

pindade kokkupuutel võrdub mõlema skaala näit nulliga. Mõõtepinna viimisel kokkupuutesse tuleb trumlit pöörata tema otsas olevat kärstit (4) kasutades (pöörata tuleb kuni iseloomuliku ragina tekkimiseni), mis garanteerib alati ühtlase surve. Kui ringskaala näit erineb nullist, tuleb kruvik seadistada nulli (juhendaja juuresolekul!) või arvestada lugemitele parand.

Mõõdetav ese asetatakse klambri kannale (2) ja kruvi vahele ning mõõtepinna viiakse kärstit kasutades esemega kokkupuutesse. Keelatud on pöörata trumlit!

4. Kaalumine tehnilistel kaaludel.

II klassi tehnilised kaalud БМТ-5 on võrdõlgse kangakaalud, mille maksimaalne lubatud koormus on 5 kg. Muidugi ei saa kaalusid valmistada absoluutselt täpselt võrdõlgsetena (mittevõrdõlgsest tingitud vea kohta loe raamatust /3/). Kaalumiseks kasutatakse tavaliselt 3. või 4. klassi

vihte (loe /3/).

Kaalude kasutamisel peavad jalakruvide all olema metallalused, kaalud seatakse loodi jalakruvide ja ripploodi abil. Nulltäpi kontrolliks vabastatakse kaalud ettevaatlikult arretiirist. Osuti peab asetuma pärast mõningaid võnkeid skaala keskele. Vajaduse korral reguleeritakse nulltäppi kaalukangi otstes olevaid reguleerimiskruvisid kasutades.

Kaalutav ese asetatakse vasakule kaalukaasile, vihid paremale (vasakukäeline toimib vastupidi). Vihte ja kaalutavaid esemeid võib asetada ainult arreteeritud kaaludele! Kaalumisel valitakse vihte raskemast alates, minnes järkjärgult kergemate poole. See kindlustab minimaalse vihtide arvu kasutamise, seega ka minimaalse võimaliku vea. Vihtide käsitlemise kohta loe /3/.

5. Töö käik.

1. Kaalume uuritava keha tehnilistel kaaludel.
2. Mõõdame keha ruumala arvutamiseks vajalikud mõõtmepunktid. Sentimeetrist suuremad mõõtmepunktid mõõdame nihikuga, väiksemad aga kruvikuga. Kontrolliks mõõdame iga mõõdet eseme mitmest kohast. Kui esineb erinevusi, mida mõõteriista mõõtmistäpsuse juures võib märgata, kirjutame protokollile 5 - 10 erinevatest kohtadest saadud mõõtmistulemust. Kui erinevusi ei esine, piisab ühest mõõtmistulemusest.
3. Lisaülesandena mõõdame juuksekarva läbimõõdu ja paberilehe paksuse.
4. Arvutame keha erikaalu ja selle vea ülemmäära.
5. Teeme uuritava keha joonise (mõõtkavas), vajaduse korral mitmes projektsioonis või aksonomeetrilise.

6. Lisaküsimusi.

1. Kui suurt täpsust võimaldab nooniusskaala, millel põhiskaala 48 jaotisele vastab 50 jaotist nooniusskaalal?
2. Millal tuleb kruviku nullpunkti parand skaalalt võetud lugemiga liita, millal sellest lahutada?

3. Kuidas on ehitatud kruviku käristi?

7. Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 52-55.

2. I. Kosmatšov. Tööriistalukksepa õpperaamat. "Valgus", Tallinn, 1967, lk. 68-71, 93-96.

3. H. Tammet. Praktilise metroloogia almed III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.

3. TEHNILISED MÕOTMISED.

1. Tööülesanne.

Mõõta kolmnurga kolm nurka erinevate mõõteriistadega ja võrrelda mõõteriistade täpsust. Mõõta õõnsusega silindri ruumala. Mõõta paberilehe paksus.

2. Töövahendid.

Kuulidega kolmnurk, õõnes silinder, paberileht, nihik, kõrgusnihik, tasane plaat, kruvik, optilise skaalaga nurga-mõõtur.

3. Sissejuhatus.

Mõõteriista tähtsaim omadus on täpsus. Suure täpsusega mõõteriist võib olla muus osas mitte halvemate omadustega, kuid on ebatäpsest riistast võrreldamatult komplitseeritum ja kallim (interferomeeter maksab rohkem kui 10 000 mõõtjoolauda).

Mõõteriistade täpsusest aitab ettekujutust saada ühe ja sama suuruse mõõtmine erinevate mõõteriistadega. Üheks sobivaks objektiks, mis võimaldab mõõtmisel rakendada erinevaid meetodeid, on kolmnurk. Kolmnurga elementide mõõtmine aitab meenutada trigonomeetriat ja on heaks illustratsiooniks mõõtmisvigade hindamise teooriale.

Lihtsamate mõõteriistade kasutamisevilumuse omandamiseks on käesolevas töös ette nähtud ka mõnede muude objektide mõõtmine.

4. Kolmnurga arvutus.

Kui kolmnurga kolm külge on tuntud, siis saab nurkade arvutamiseks kasutada koosinuslauset. Külge a vastasnurga

koosinus on

$$\cos A = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{c} + \frac{c}{b} - \frac{a^2}{bc} \right). \quad (1)$$

Analoogiliste valemitega arvutatakse ka teised kaks nurka. Erilist tähelepanu tuleb pöörata arvutustäpsusele. Et eesmärgiks on nurkade usaldatavate vahemike määramine, peab arvutama mõõtmistäpsusest 1 - 2 suurusjärku täpsemalt. Plirvea arvutamiseks tuleb võtta valemist (1) täisdiferentiaal. Nii leitakse

$$\Delta(\cos A) = \frac{1}{c} - \frac{c}{b^2} + \frac{a^2}{b^2 c} \left| \frac{\Delta b}{2} + \frac{1}{b} - \frac{b}{c^2} + \frac{a^2}{bc^2} \right| \frac{\Delta c}{2} + \frac{a}{bc} \Delta a. \quad (2)$$

Ülesanne. Tõestada, et kolmnurga külgedele tõmmatud kõrgused h_a , h_b ja h_c on vastavate külgedega a , b ja c pöördvõrdelised.

Kui see ülesanne on lahendatud, on hõlpus tuletada valemeid kolmnurga nurkade arvutamiseks kolme kõrguse järgi. Selleks tarvitseb vaid valemis (1) ja (2) asendada küljed vastavate kõrguste pöördväärtustega. Saame

$$\cos A = \frac{1}{2} \left(\frac{h_c}{h_b} + \frac{h_b}{h_c} - \frac{h_b h_c}{h_a^2} \right), \quad (3)$$

$$\Delta(\cos A) = \left| \frac{h_c}{h_b^2} + \frac{h_c}{h_a^2} - \frac{1}{h_c} \right| \frac{\Delta h_b}{2} + \left| \frac{h_b}{h_a^2} + \frac{h_b}{h_c^2} - \frac{1}{h_b} \right| \frac{\Delta h_c}{2} + \frac{h_b h_c}{h_a^3} \Delta h_a. \quad (4)$$

5. Kolmnurga elementide mõõtmine.

Mõõdetava kolmnurga tippudeks on kolme teraskuuli keskpunktid. Kaugusi keskpunktini pole aga võimalik otsestelt mõõta. Kolmnurga külgede ja kõrguste leidmiseks tuleb mõõta kuulide pindade vaheline kaugus ja sellest lahutada

kuuli läbimõõd. Nurkade mõõtmisel kuuli läbimõõd tulemust ei mõjuta.

Mõõtmised teeme järgmiselt.

A. Mõõdame kruvikuga kõigi kolme teraskuuli läbimõõdud. Need läbimõõdud peavad võimaliku mõõtmisvea piires kokku langema. Kui see nii on, siis võtame kolmest tulemustest keskmise.

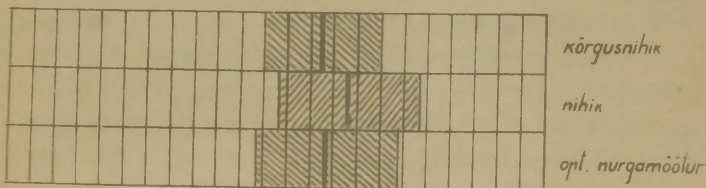
B. Mõõdame nihikuga kolmnurga küljed.

C. Mõõdame kõrgusnihikuga kolmnurga kõrgused.

D. Mõõdame optilise skaalaga nurgamõõturiga kolmnurga nurgad.

6. Tulemuste esitamine.

Arvutame kolmnurga nurgad eraldi kolmnurga külgede järgi ning kolmnurga kõrguste järgi. Nüüd on meil kolmnurga nurgad mõõdetud kolme erineva riista abil. Tulemuste võrdlemiseks teeme iga nurga jaoks järgnevat tüüpi joonise.



Sellel joonisel on ära näidatud iga meetodi jaoks mõõtmistulemus koos võimaliku mõõtmisvigade vahemikuga (viirutatud). Arvutame mõõtmistulemuste kaalutud keskmise.

Lisaks arvutame kõigi nelja meetodi tulemuste järgi kolmnurga sisenurkade summa ja teeme kindlaks, mitu korda selle suuruse mõõtmisviga erineb piirveast.

7. Lisamõõtmised.

A. Mõõdame nihiku abil õõnsa metallsilindri mõõtmised ja arvutame metalli ruumala.

B. Mõõdame kruviku abil paberilehe paksuse kahel viisil: esiteks mõõdame ühtainsat lehte, teiseks aga õhukest paberipakki. Teeme kindlaks, kummal juhul on mõõtmistäpsus suurem.

8. Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 52-55.

2. A. Žuravljev. Tolerantsid ja tehniline mõõtmine. ERK, Tallinn, 1965, lk. 63-70, 108-110.

3. I. Kosmatšov. Tööriistalukksepa õpperaamat. "Valgus", Tallinn, 1967, lk. 68-71, 90-91, 93-96.

4. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.

4. MIKROSKOOPILISTE PIKKUSTE MÕÖTMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine väikeste (mikroskoopiliste) pikkuste mõõtmise mitmesuguste vahendite ja meetoditega. Kapillaartoru de sisediameetrite mõõtmine.

2. Töövahendid.

Klaaskapillaarid orgaanilisest klaasist raamis, mõõtemikroskoop MIP-1 statiiviga, bioloogiline mikroskoop, okulaarmikromeeter MOB, objektmikromeeter OMI.

3. Teoreetiline ülevaade.

Mikroskoopiliste objektide lineaarmõõtmete määramise meetodid võib jagada põhimõtteliselt kahte rühma:

a. Läbi mikroskoobi vaadeldavat objekti nihutatakse koos aluslauaga. Sealjuures nihkub objekti kujutis mikroskoobi okulaaris asuvale liikumatule klaasplaadile tehtud märgi (joon, rist vm.) suhtes. Aluslaua nihe on mikromeetriliselt mõõdetav.

b. Liikumatu objekti kujutis tekitatakse okulaaris asuvale klaasplaadile kantud skaalaga samas tasandis. Vaadeldes skaalat ja objekti kujutist okulaaris, võrreldakse neid. Täpsemaks mõõtmiseks (skaalajaotiste murdosade määramiseks) võib kasutada veel teist, nihutavat klaasplaat sellele kantud märgiga (märk asub skaalaga peaaegu ühes tasandis). Märgi nihe on jällegi mikromeetriliselt mõõdetav.

Vähemtäpseteks mõõtmisteks kasutatavatel mõõtemikroskoopidel on üks kindel objektiiv ja okulaarskaala on neil juba eelnevalt kalibreeritud. Täpsema töö jaoks tuleb aga skaala uuesti kalibreerida. Universaalsetel okulaarkruvikutel e. okulaarmikromeetritel, mida saab kasutada kõigi bioloogiliste mikroskoopidega, on millimeeterjaotistega okulaarskaala ja 0,01-mm jaotistega kruvik, mis võimaldavad mõõta objekti kujutise pikkust. Objekti enda pikkuse leidmiseks tuleb määrata veel objektiivi suurendus, s.t. kalibreerida okulaarskaala otsekohe objekti enda mõõtmeid väljendavates arvudes. Mõlema riista kalibreerimiseks kasutatakse mikroskaalat e. objektmikromeetrit - klaasplaati sellele kantud täppisskaalaga, mis asetatakse objekti asemele mikroskoobi objektiivi ette.

4. Riistade ehitus ja täpsus.

Mõõtemikroskoobil MIP-1 on reguleeritav tuubuse pikkus, s.t. objektiivi ja okulaari vahemaa on muudetav. Tuubuse pikkust näitab sisemisele torule kantud skaala. Koos sellega muutub muidugi ka suurendus ja okulaarskaala kalibratsioon. Mikroskoobi passis antaksegi skaalajaotise väärtus tuubuse erinevatel pikkustel.

Tuubuse pikkus (mm)	130	140	150	160	170	180	190
Skaala 1 jaotise väärtus a (mm)	0,058	0,053	0,049	0,045	0,041	0,038	0,036

MIP-1 skaala kalibratsiooni kohta pole passis antud garanteeritud täpsust, s.t. ta ei ole taadeldud mõõteriist ja teda võib kasutada vaid pikkuste orienteerival hindamisel. Kui tahetakse teda kasutada mõõtmiseks, tuleb mikroskoobi okulaarskaala eelnevalt (või hiljem) kalibreerida objektmikromeetri abil, muutmata tuubuse pikkust.

Okulaarkruvikul MOB on liikumatu 1-millimeetrise jaotistega skaala ja mikromeetriliselt nihutatav klaasplaat

sellele kantud, plaadi liikumise suunaga ristuva kaksik-kriipsu ning ristikujujulise märgiga. Mõlemad märgid ja skaala on okulaari ühe läätse nihutamiseega samaaegselt teravustatavad, nii et nende kujutised on parallaksivabad, s.t. nad ei nihku üksteise suhtes, kui me muudame silma asendit. Märkidega klaasplaadi nihutamiseks kasutataval mikromeeterkrivil on 100 jaotisega ringskaala; kruvi üks täisring vastab klaasplaadi nihkele 1 mm võrra, seega on ringskaala jaotise hind 0,01 mm (mitte unustada, et see vastab objekti kujutise, mitte objekti enda mõõtmetele!). Okulaarmikromeeter asetatakse bioloogilise mikroskoobi tuubusele tavalise okulaari asemele, kinnitatakse käega pööratava kruvi abil.

Liikumatu millimeeterjaotistega skaala on mõõtmisel vaid abivahendiks, mikromeeterkruvi täispöörete lugejaks. Seepärast ei anta ka selle skaala jaotistele passis lubatud vea piiri. Mõõtmiseks nihutatakse alati liikuvale plaadil olevat märki (kas kaksik-kriipsu või kahe kaldkriipsu ristumispunkti) mõõdetava objekti kujutisel ühest äärmisest punktist teise.

Mikroskaalal OMII on 100 jaotist, mis on kantud klaasplaadile, kaetud katteklaasiga ja liimitud (mitte-lahtivõetavana) terasraamis olevasse avasse. Skaala jaotise hind on 0,01 mm, skaala kogupikkus, s.t. äärmiste jaotiste vahemaa, on 1 mm. Skaala joonte laius on 0,002 ± ± 0,001 mm; jaotiste lugemisel tuleb arvestada pikkusi kas kriipsude samapoolsest äärest või keskelt.

Skaala lubatud vea kohta vt. /1/.

5. Töö käik.

1) Määrame orgaanilisest klaasist raamis asuvate klaaskapillaaride sisemiste avade diameetrid mõõtemikroskoobi abil tuubuse 3 erineva pikkuse korral. Tuubuse vastavate pikkuste korral kalibrime ka okulaarskaala. Arvutame diameetrite keskmised väärtused.

2) Mõõdame samade kapillaaride sisediameetrid bioloogilise mikroskoobi ja okulaarkruviku abil. Mõõtmised teeme 2 erineva suurendusega objektiiviga kasutades, tulemustest arvutame keskmised.

3) Arvutame piirvead, võrdleme 2 erineva mõõteriistaga saadud tulemuste täpsust. Mõõtmisvigade piires peavad tulemused kokku langema.

6. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia alused III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.

5. PIKKUSE MÕOTMINE TÄPPISMÕOTERIISTADE ABIL.

A. Sissejuhatus.

Mõoteriistatööstus on tänapäeval võimaline valmistama mõoteskaalasad, millele millimeeterjaotised on kantud $0,5 \mu\text{m}$ täpsusega. Neile skaaladele antakse veel parandid $0,1 \mu\text{m}$ täpsusega. Selliste skaalade kasutamisel on tarvis garanteerida, et mõõdetava objekti skaalaga võrdlemisel ja skaala jaotiste murdosade lugemisel tekkivad vead oleksid väiksemad skaala jaotiste veast või sellega vähemalt samas suurusjärgus.

Mõõdetava eseme ja skaala asetamisel kohakuti või kõrvalt (nagu joonlauaga mõõtmisel) ei ole võimalik palja silmaga skaala nulljaotist mõõdetava lõigu otspunktiga sellise täpsusega kokkulangevaks sobitada. Sageli ei ole mõõdetav lõik selliseks otseseks mõõtmiseks ligipääsetav (asub näit. mõne süvendi põhjas). Selline mõõtmine võib skaalat ka mehaaniliselt kahjustada (kriimustused jm.). Seepärast kasutatakse niisugustes mõoteriistades tavaliselt optilisi viseerimisseadmeid - pikksilmi või mikroskoobe. Mõõdetavat eset (tavaliselt koos spetsiaalse aluslanaga) või viseerimisseadet nihutades sobitatakse lõigu otspunktide kujutised kokku okulaaris asuva märgiga, skaalalt võetakse lugemid ristmastaapi või spiraalnooniust kasutades (vt. käesoleva kogumiku töö nr. 1). Sealjuures on skaala lugemiseks tavaliselt omaette optiline süsteem. Mõõdetav lõik peab sealjuures olema skaalaga rangelt paralleelne. Kõvade pindadega esemete mõõtmete määramiseks kasutatavates mõõte-

riistades on viseerimisseade mõnikord asendatud nihutatava mõõtepinna-ga.

Käesolevas töös tutvutakse kolme sellise täppismõõte-riistaga - horisontaalkomparaatori, katetomeetri ja sfäro-meetriga. Neist kahel esimesel on viseerimisseade, viimasel aga mõõtepinna (otsik). Et me siin kirjeldatavaid riistu või-me täppismõõteriistadeks nimetada, seda iseloomustab hästi rea mõõteriistade lubatud suhteliste põhivigade võrdlus 200-mm lõigu mõõtmisel:

metallmõõtjoolaud	0,05%
0,05 mm nooniusega nihik	0,025%
komparaator WBA-2	0,001%
katetomeeter KM-6	0,003% - 0,01%

B. Pikkuste mõõtmine komparaatoriga.

1. Tööülesanne.

Tutvumine horisontaalkomparaatori ehituse ja tööprintsiibiga. Pikkuste mõõtmine komparaatoriga.

2. Töövahendid.

Komparaator WBA-2 koos kolme klambriga esemete kinnitamiseks, klaasplaat sellele graveeritud joontega, ümarava-ga detail (mikroskoobi diafragma).

3. Sissejuhatus.

Horisontaalkomparaator WBA-2 on riist horisontaal-tasandis asuvate lõikude pikkuse täppismõõtmiseks. Tal on 200 mm pikkune klaasplaadile kantud millimeeterskaala, mis on kinnitatud aluslaua külge ning on koos sellega lugemimikroskoobi all nihutatav. Viseerimismikroskoop on asetatud selliselt, et mõõdetava lõigu siht peab langema kokku skaala sihiga. Skaala ja mõõdetav lõik asuvad siin järjestikku. Selliseid komparaatoreid nimetatakse longitudinaalseteks.

Transversaalkomparaatorites asetatakse mõõdetav lõik skaala kõrvale, mikroskoobid nihkuvad skaala ja mõõdetava lõigu sihiga risti.

Komparaatori *ИЗА-2* lubatud põhiviga 200-mm lõigu mõõtmisel on $2\mu\text{m} / 1/$, seega normaaltingimustel on saavutatav suhteline piirviga 10^{-5} (0,001%). Metrooloogilistel komparaatoritel saavutatakse mitmemeetrise mõõteulatuse korral põhivea suuruseks $0,1\mu\text{m}$, seega on suhteline piirviga siin juba kuni 10^{-7} (0,00001%). Geodeetilistel mõõtmistel kasutatavad 24- ja isegi 50-m mõõteulatusega komparaatorid on võimaldanud mõõtmistäpsust 10^{-7} saavutada isegi 10 - 15-km baaspikkuste mõõtmisel.

4. Töö käik.

1) Tutvume komparaatori ehitusega tehase poolt välja antud juhendi abil. Selgitame kõikide reguleerimisseadmete otstarbe, harjutame lugemi võtmist skaalalt spiraalnooniuse abil.

2) Vastavalt juhendaja valikule määrame kas klaasplaadile joonestatud kolmnurga pindala või kahe sirge vahelise nurga. Selleks määrame komparaatori abil vajalike joonelementide pikkused ja arvutame nõutava suuruse. Mõõtmisel tuleb jälgida, et mõõdetav lõik oleks seatud rangelt paralleelseks aluslaua käigusihiga.

3) Koostame parandite tabeli mõõtjoonlaua sentimeeterjaotistele. Selleks mõõdame kõigi sentimeeterjaotiste kaugused nulljaotisest. Nii siin kui eelmise ülesande juures tuleb kasutada viseerimismikroskoobi okulaaris kahekordsete jaotistega okulaarvõrku (joon. 6a "Juhendis"), sest mõõta tuleb teatud lõpliku laiusega kriipsude keskjoonte vahelisi kaugusi, silm aga võimaldab väga täpselt seada üht joont sümmeetriliselt kahe joone vahele.

4) Mõõdame ringikujulise ava läbimõõdu. Selleks on sobiv kasutada lõikuvate joontega okulaarvõrku (joon. 6, "Juhendis"), kusjuures okulaarvõrgu joonte lõikepunkt peab nihkuma täpselt mööda ava diameetrit. Avaga detaili aseta-

me klaasplaadile, nihutatava joonlauaga plaati lükates seame ava diameetri niitristi alla. Võib aga kasutada ka teist okulaarvõrku, sel juhul seame ühe kahest joonest ava puutujaga ühtivaks.

5) Mõõteriista skaalade ehituse suure täpsuse tõttu tuleb komparaatoriga mõõtmisel alati arvestada, et viseerimise viga on riista põhiveast suurem või temaga vähemalt võrdne. Seepärast tuleb kõikide mõõtmiste korral viseerimist korrata 3 - 5 korda, reguleerides lugemi võtmisel iga kord uuesti ka spiraalnooniust. Tulemustest võtame keskmise, arvutame keskmise vea. Võtame arvesse parandid lineaarskaala passist, siis võib põhivea leida "Juhendis" antud valemist. Ava läbimõõdu mõõtmisel tuleb arvestada ka temperatuuriparand (detail on valgevasest, $\alpha = 1,89 \cdot 10^{-5} / \text{deg}$).

5. Kirjandus.

1. Н. Таммет. Практилilise metroloogia algmed III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.
2. Физический энциклопедический словарь. Том 3. Москва, 1962, стр. 427.

C. Mõõtmisi sfäromeetriga.

1. Tööülesanne.

Tutvumine sfäromeetri ja tema tööpõhimõttega. Kumera ja nõgusa läätse kõverusraadiuste määramine.

2. Töövahendid.

Sfäromeeter ИАС -7 (CCO) koos mõõterõnga ja sfäärilise mõõteotsikuga, paks tasaparalleelne klaasplaat, vastukaal (kergete esemete mõõtmiseks), transformaator 220/3,5 V skaala valgustuslambi toiteks, mõõtmisobjektid: 2 läätse.

3. Sissejuhatus.

Sfäromeeter võimaldab mõõta väga täpselt vertikaalsuunas nihutatava mõõteotsiku ülemise pinna asendeid. Ta on

ette nähtud sfääriliste pindade kõverusraadiuse mõõtmiseks, kusjuures otseselt mõõdetakse sfääri segmendi kõrgus ja lõikeringi diameeter.

Sfäromeetri ehitusega tuleb tutvuda tehase poolt kaasa antud juhendi abil. Juhendis on antud valem (10) sfääri raadiuse vea arvutamiseks, kus noole (s.o. kahe näidu vahe) põhiviga on $0,8 \mu\text{m}$. Sealjuures peavad olema arvestatud mm-skaalale passis antud parandid.

4. Töö käik.

1) Tutvume sfäromeetri M3C-7 ehitusega ja töötamise meetodiga tehase poolt kaasa antud juhendi abil.

2) Mõõdame ühe nõgusa ja ühe kumera läätse kõverusraadiused. Nii siin kui järgnevas tuleb iga näidu võtmisel korrata spiraalnooniuse seadmist põhiskaala jaotisele 3 - 5 korda ja võtta tulemustest aritmeetiline keskmine.

5. Väljavõtteid riista passist.

1) Mõõterõngas nr. 3.

Rõnga raadius $r = (30,0001 \pm 0,0012) \text{ mm}$,

kuuli raadius $\varphi = (4,3600 \pm 0,0005) \text{ mm}$.

2) Millimeeterskaala parandid. (Parandid on antud 0-jaotise suhtes.)

<u>Jaot. nr.</u>	<u>Parand μm-tes</u>
1	-0,2
2	0
3	0
4	0
5	0
6	-0,1
7	+0,1
8	0
9	0
10	+0,1
11	+0,2
12	+0,1
13	+0,2

<u>Jaot. nr.</u>	<u>Parand μm-tes</u>
14	+0,1
15	+0,1
16	+0,1
17	+0,3
18	+0,2
19	+0,3
20	+0,3
21	+0,2
22	+0,3
23	+0,4
24	+0,4
25	+0,3
26	+0,3
27	+0,5
28	+0,4
29	+0,2
30	+0,2

6. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed III. TRÜ rota-print, Tartu, 1968.
2. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 55-58.
3. Физический энциклопедический словарь. Том 5. Москва, 1966, стр. 106.

D. Vedeliku erikaalu määramine U-toru ja katetomeetri abil.

1. Tööülesanne.

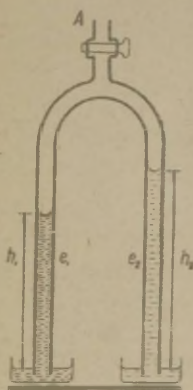
Katetomeetri ehituse ja tööprintsibiiga tutvumine. Katetomeetri töökorda seadmine, vedeliku erikaalu määramine U-torus.

2. Töövahendid.

Katetomeeter KM-6 koos lisa-läätsede komplektiga, transformator skaala valgustuslambi toiteks, kraaniga U-toru statiivil koos kahe anumaga, kummipirn hõrenduse tekitamiseks.

3. Sissejuhatus.

Harudega allapoole vertikaalselt asetatud U-toru otsad on pistetud erinevate vedelikega täidetud anumatesse (vt. joonis). Kui tekitada U-torus hõrendus, tõuseb vedelik mõlemas harus, erikaalude erinevusest tingituna on tõusu kõrgused harudes erinevad. On lihtne tuletada seost (tuletada see!):



$$e_1 h_1 = e_2 h_2.$$

Kui nüüd ühes (näiteks vasakpoolses) harus on tuntud erikaaluga vedelik, saame arvutada ka teises harus oleva vedeliku erikaalu:

$$e_2 = \frac{e_1 h_1}{h_2}.$$

Tuntud erikaaluga vedelikuna kasutatakse tavaliselt puhast (destilleeritud) vett, vedelikusammaste kõrgused mõõdetakse katetomeetriga.

Katetomeeter on mõõteriist vertikaalsete lõikude pikkuse täppismääramiseks. Sageli kasutatakse katetomeetrit mitte niivõrd suure mõõtmistäpsuse tõttu, vaid seetõttu, et mõõdetav lõik ei ole otseseks mõõtmiseks (näit. nihikuga) ligipääsetav. Viseerimisseadmena kasutatakse katetomeetris pikksilma, mis on fokuseeritav erineval kaugusel asuvatele esemetele. Seetõttu saab temaga mõõta kõiki vertikaalseid lõike, mille otspunktid on nähtavad.

Katetomeetri mõõteskaala asub massiivsel vertikaalsel sambal, mida mööda nihkub pikksilm koos lugemi võtmise sead-

mega. Mõõtmiseks tuleb seega seada sammas rangelt vertikaalseks. Seda tehakse samba alusel oleva 3 reguleeritava jalakruvi ja vesiloodide abil.

Katetomeetri KM-6 ehituse ja töökorda seadmise metoodikaga tuleb tutvuda tehase poolt välja antud juhendi abil. Sealjuures tuleb tähele panna, et sammast rangelt vertikaalseks seada pole võimalik üksnes alusel olevat ümarloodi kasutades, kuna selle täpsus on liiga väike. Seadmist tuleb täpsustada pikksilma küljes oleva reguleeritava pikliku vesiloodi abil. Sellel loodil puudub kahjuks skaala, sellepärast tuleb seadmisel arvestada lihtsalt reguleerimiskruvi pöördenurka (täispöörete arvu). Samba vertikaalseks seadmine on ekvivalentne samba aluse horisontaalseks seadmisega kolme jalakruvi ja reguleeritava vesiloodi abil (vt. käesoleva kogumiku töö nr. 6); vesiloodi saab ümber pöörata koos sambaga, mis pöörduv ümber vertikaaltelje.

U-toru tuleb seada minimaalsele võimalikule kaugusele pikksilmast (miks?). Antud juhul pole harude range vertikaalasend oluline, kuna mõõdetakse vaid vedeliku tasemete vahet. Vastasel juhul kontrollitakse objektilõigu vertikaalsust sellega, et õige asendi korral ei ole tarvis lõigu teise otsa juures korduvat fokuseerimist ega pikksilma pööramist (asimutaalset reguleerimist). Tuleb aga meeles pidada, et täiendav fokuseerimine ja asimutaalne reguleerimine suurendavad mõõtmisvigu, seetõttu tuleb lubatud põhiviga korrutada kahega. Pikksilma fokuseerimise ja ristmasstaabi kasutamise kohta loe käesoleva kogumiku juhendist nr. 1.

Kõrgused h_1 ja h_2 mõõdetakse vedeliku pinna tasemest anumaskuni meniski alumise pinnani torus. Kuid küllalt peenes torus esineb alati ka vedelikusamba tõus, mis on tingitud kapillaarsusest - osa vedelikusamba kaalust tasakaalustavad vedeliku ja klaasi vahelised adhesioonijõud. Nende arvestamiseks mõõdetakse vedelikusammaste kõrgused harudes alarõhu puudumisel U-torus: h_1' ja h_2' . Valem e_2 arvutamiseks tuleb siis:

$$e_2 = e_1 \frac{h_1 - h_1'}{h_2 - h_2'}$$

Kokku tuleb seega antud töös mõõta 4 lõigu pikkus, s.t. viseerida katetomeeter 8-le punktile. Igale punktile viseerimist tuleb korrata vähemalt 5 korda, arvutada keskmised. Enne iga viseerimist tuleb kontrollida, pikksilma horisontaalsust vesiloodi järgi, vajaduse korral järele reguleerides.

4. Töö käik.

1. Asetame hästi pestud (piirituse. eetri või kroomise- seguga) U-toru statiivile katetomeetri pikksilma objektiivist 14 - 15 cm kaugusele.
2. Seame katetomeetri töökorda, suuname pikksilma U-torule, täpsustame viimase kaugust objektiivist ja seame ta võimalikult vertikaalseks.
3. Mõõdame vajalike lõikude pikkused.
4. Arvutame erikaalu e_2 koos piirveaga.

5. Lisaküsimusi.

1. Mõõtes samba kõrgust kuni meniski alumise pinnani, jäetakse arvestamata sellest pinnast kõrgemale tõusnud vedeliku kaal. Miks ei põhjusta see lisaviga antud töös?
2. Kuidas on mõõtmistäpsuse huvides õigem, kas kasutada võimalikult suurt või väikest hõrendust U-torus?

6. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed III. TRÜ rota-print, Tartu, 1968.
2. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 64-70.

6. VESILOODI KALIIBRIMINE JA TUNDLIKKUSE MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine vesiloodiga, vesiloodi õiendamine, kolmele jalakruvile toetuva aluse horisontaalseks seadmine, vesiloodi kaliibrimine ja tundlikkuse määramine vesiloodi eksaminaatoriga.

2. Töövahendid.

Vesilood, kolmele jalakruvile toetuvad alused, vesiloodi eksaminaator, ca 5 mm paksune klaasplaat ja kruvik.

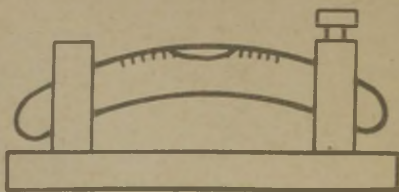
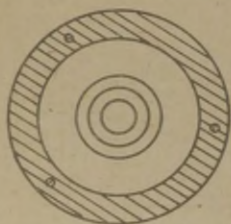
3. Teoreetiline sissejuhatus.

a) Vesiloodi ehitus. Vesiloode kasutatakse tasapindade ja aparaatide horisontaalasendi kontrollimiseks. Väliskujult võime neid jaotada kahte liiki.

Ümmargune vesilood on klaaskaanega karp, mille klaaskaane seesmine külg on siledaks lihvitud kerapind. Karp täidetakse kuuma piirituse ja eetri seguga ning suletakse õhukindlalt. Jahtudes tõmbub vedelik kokku ja karpi tekib vedeliku auruga täidetud ruum - vesiloodi mull. Karp kinnitatakse alt tasasele metallalusele.

Et mull on vedelikust kergem, siis asetseb ta alati karbi kõrgeimas osas. Vesiloodi ehitus on säärane, et mull on karbi kaane all keskel, kui vesilood paigutatakse horisontaalpinnale. Mulli seisu paremaks jälgimiseks on kaa-

nel rida kontsentrilisi ringe. Seesuguse vesiloodiga saame pealeasetamisel otsekohe veenduda tasapinna kallakuses. Kui aluspind pole horisontaalne, siis nihkub mull kõrgema serva poole. Ümmargust vesiloodi kasutatakse kiiretel ja väiksema täpsusega loodimistel.



Joon. 1. Ümmargune vesilood. Joon. 2. Piklik vesilood.

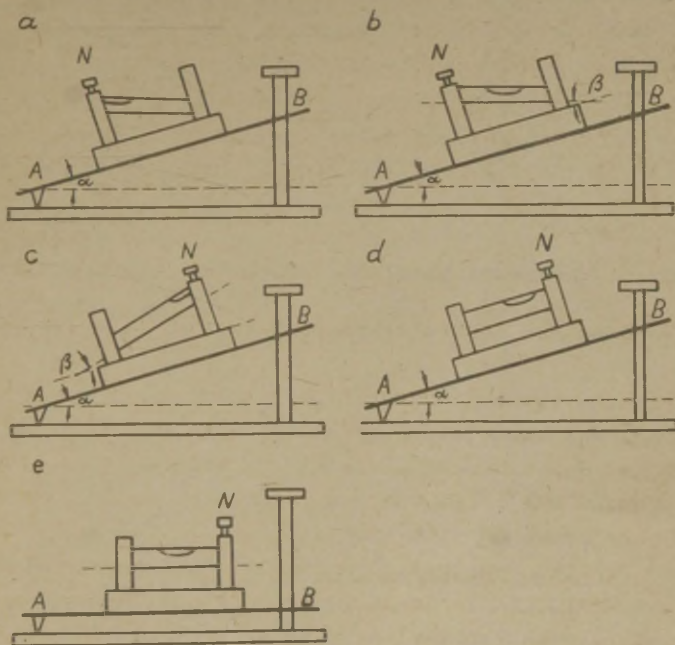
Täpsemateks loodimisteks tarvitatakse piklikke vesilooide.

Piklik vesilood on veidi painutatud klaastoru, mis samuti nagu ümmargune vesilood on täidetud piirituse ja eetri seguga. Kasutamiseks kinnitatakse klaastoru vastavasse metallraami. Mulli asukoha määramiseks on klaasi pealmisele küljele tõmmatud rida kriipse.

b) Pikliku vesiloodi õiendamine. Vesilood on õiendatud, kui horisontaalpinnal asetsedes ta mull on keskel. Kui aluspind pole horisontaalne, siis nihkub mull kõrgemal asuva otsa poole. Et veenduda, kas vesilood on õiendatud, selleks asetatakse ta mingile enam-vähem horisontaalsele pinnale ja määratakse mulli asukoht. Seejärel pööratakse vesiloodi 180° ja määratakse jälle mulli asukoht. Kui vesilood näitab mõlemal juhul tasapinna sama suurt kallakust, s.o. mull ei nihku üldse või nihkub niisama palju keskasendist kõrvale, siis on vesilood õiendatud. Kui aga vesilood näitab kummaski asendis tasapinna erineva suurusega kallakust, siis vajab vesilood ise õiendamist.

Õiendamiseks asetatakse vesilood reguleeritava kaldega alusele AB (joon. 3 a). Aluse kalle reguleeritakse nii, et mull asetseks keskseisus (joon. 3 b). Vesiloodi pööratakse 180° . Õiendamata vesiloodi mull kaldub siis kõrvale

keskasendist (joon. 3 c). Mull viiakse uuesti keskasendisse muutes kruviga N vesiloodi kaldenurka alusraami suhtes nii, et mull nihkub poole kõrvalekaldest keskseisu poole ja ülejäänud pool kaotatakse, muutes aluspinna kallet.



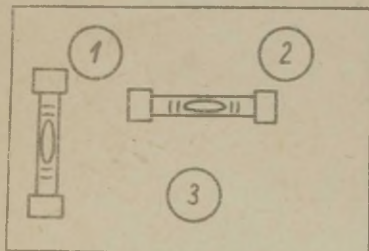
Joon. 3. Vesiloodi õiendamine.

Teoreetiliselt on vesilood õiendatud juba kruvi N keeramisega, sest aluslaua kaldenurk α horisontaalpinnaga on võrdne vesiloodi kaldenurgaga β laua suhtes (joon. 3 b) ja pööratud asendis (joon. 3 c) on vesiloodi kaldenurk horisontaalpinnaga $\alpha + \beta$. Seega tehes poole mulli nihutamist kruvi N keeramisega on nurk β kaotatud ja vesilood on paralleelne oma alusega (joon. 3 d). Vesiloodi mulli nihkumine pole aga täpselt jälgitav ja seepärast peab reguleerimist jätkama ning reguleerima ka aluse horisontaalseks (joon. 3 e). Vesiloodi pööratakse jälle 180° , s. o. esimesse asendisse, ja jälgitakse, kas mull jääb keskele. Kõrvalekaldumine on

palju väiksemaks muutunud. Mull viiakse jälle keskele, tehes poole nihutamist loodi kruvi keeramisega ja teise poole aluspinna kaldenurga muutmisega. Pööratakse loodi 180° ja korratakse võtet, kuni mull jääb keskele mõlemas asendis. Siis on vesilood õiendatud ja mull on vesiloodi horisontaalpinnal asetsedes keskel, s. o. nullseisus.

Tundlikkude loodide puhul ei jälgitagi mulli poole võrra nihkumist, vaid tehakse kogu nihutamine vesiloodi kruvi N pööramisega pöördeid loendades, kuni mull on kesk-asendis. Poole nihkumise saamiseks pööratakse pool pöörete arvust tagasi.

c) Kolmele jalakruvile toetuva aluse horisontaalseks seadmine. Vesiloodiga võib horisontaalasendisse viia kolmele jalakruvile toetuvaid aluseid, kusjuures seesugused alused on kasutatavad ka loodi õiendamiseks. Selleks kasutatakse eelmises punktis kirjeldatud menetlust järgmiselt. Vesilood asetatakse paralleelselt kaht jalakruvi ühendava sirgega üks kord ühes ja teine kord 180° võrra pööratud suunas (joon. 4). Aluse kaldenurka muudetakse kahe vastava jalakruvi



Joon. 4. Kolmele kruvile toetuva aluse horisontaalseks seadmine.

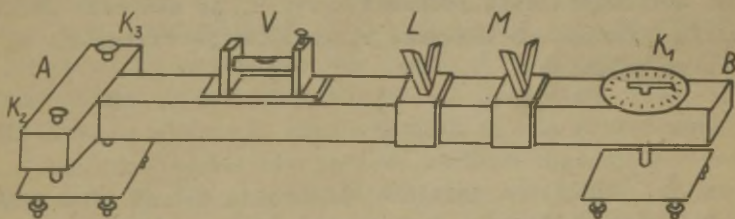
(1, 2) vastassuunalise pööramisega. Kui mull asetseb vesiloodi mõlemas asendis keskel, siis on alus selles sihis horisontaalne. Vesilood asetatakse risti eelmise sihiga, s. o. kolmanda jalakruvi suunas, ja mull viiakse keskele ainult kolmandat jalakruvi keerates. Kontrolliks pööratakse loodi veel kord 90° võrra; kui mull pole keskel, tu-

leb kogu protseduuri veel kord korrata. Nüüd on alus horisontaalne, ja ükskõik millises suunas ka vesilood asetseb, ikka jääb mull keskele. Enamik loodidega varustatud aparate toetubki kolmele jalakruvile (katetomeeter, teodoliit, analüütilised kaalud jne.). Selliste aparatuuride rõhtsaks seadmiseks rakendataksegi eespool kirjeldatud meetodit.

d) Vesiloodi kalibrimine ja tundlikkuse määramine.

Headel vesiloodidel on klaastoru painutatud ringjoone kaare kujuliselt, nii et mulli nihutamiseks ühe jaotise võrra vesiloodi skaala mistahes punktis tuleb loodi alust kallutada sama nurga võrra. Selle nurga suurust nimetatakse loodi tundlikkuseks. Väikeste kaldenurkade mõõtmiseks horisontaaltasandi suhtes sellise vesiloodiga ongi tarvis vaid teada tema tundlikkust. Hea vesiloodi tingimusele mittevastava loodi korral tuleb aga kogu tema skaala kalibrida, s. o. leida loodi aluse kaldenurk horisontaaltasandi suhtes mulli kõikvõimalike asendite korral skaala (torule kantud jaotiste) suhtes.

Vesiloodi kalibrimiseks ja tema tundlikkuse määramiseks kasutatakse vesiloodi eksaminaatorit (joon. 5). See on kolmele jalakruvile K_1 , K_2 ja K_3 toetuv T-kujuline metall-



Joon. 5.

telg. Telje ühes otsas üksikult asetsev kruvi K_1 on varustatud 100 osaks jaotatud ringskaalaga pöördenurga täpseks lugemiseks. Teljel AB asuvad alused L ja M torukujuliste alusraamita vesiloodide asetamiseks.

Eksaminaator tuleb kõigepealt ise kalibrida, s. t. määrata nurk, mille võrra muutub telje AB siht kruvi K_1 pööramisel 1 jaotise võrra. See nurk leitakse valemist:

$$\alpha = \frac{h_1}{l} [\text{rad}], \quad (1)$$

kus l on telje AB pikkus, s. t. kaugus jalakruvi K_1 tipu ja kruvide K_2 ning K_3 tippe ühendava sirge vahel; h_1 on $1/100$ osa kruvi K_1 sammust, s. o. pikkus, mille võrra tõuseb telje AB üks ots kruvi K_1 tipu kohal selle kruvi pöörämisel ringskaala ühele jaotisele vastava nurga võrra. Valemist 1 leitud nurga võib avaldada ka kraadimõõdu sekundites:

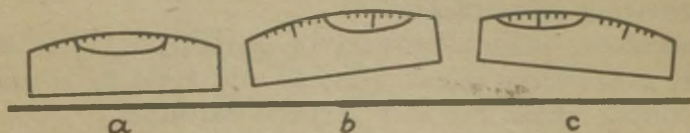
$$\alpha'' = 206265 \frac{h_1}{l} \approx 2,063 \cdot 10^5 \frac{h_1}{l}. \quad (2)$$

Eksaminaator asetatakse jalakruvidega kahele klaasplaadile, millest kumbki toetub kolmele jalakruvile ja on eelnevalt horisontaalseks seatud. Vesiloodi V abil seatakse eksaminaatori teljed AB ja K_2 K_3 horisontaalseteks (nagu on kirjeldatud punktis b). Suuruse h_1 leidmiseks asetatakse varem horisontaalseks seatud eksaminaatori jalakruvi K_1 alla hästi töödeldud pindadega klaasplaat, mille paksus d mõõdetakse (näit. kruvikuga). Seejärel seatakse eksaminaatori telg AB uuesti horisontaalseks pöörates kruvi K_1 ja määrates selleks vajaliku pöördenurga väärtuse ringskaala jaotistes-N. h_1 arvutatakse valemist

$$h_1 = \frac{d}{N}. \quad (3)$$

Pikkus l määratakse vajaliku täpsusega, nii et tema suhteline piirviga ei ületaks d ja N suhtelist piirviga.

Vesiloodi kalibrimiseks ja tema tundlikkuse määramiseks asetatakse uuritav lood horisontaalseks seatud eksaminaatori teljele AB (alusraamita lood asetatakse alustele L ja M). Mull peab siis asuma keskel (joon. 6 a). Kruvi K_1 pööramisega



Joon. 6.

seatakse mull ühele äärmistest kriipsudest (joon. 6 b). Seejärel nihutatakse mulli ühe jaotise kaupa tagasi, luges igas jaotise võrra nihutamiseks vajaliku skaalajaotiste arvu, kuni jõutakse joonisel 6 c kujutatud asendisse. Sama korratakse teises suunas. Leitakse keskmine tundlikkus, arvutatakse mulli igale asendile vastav kaldenurk horisontaaltasandi suhtes.

4. Töö käik.

1. Õiendame pikliku vesiloodi, kasutades üht eksaminaatori jalakruvide alla mõeldud klaasplaatidest. Üntlasi seame siis ka selle plaadi horisontaalseks.

2. Seame horisontaalseks ka teise klaasplaadi, asetame eksaminaatori plaatidele ja seame ta mõõtmiseks korda. Kaliibrime eksaminaatori ringskaala. Klaasplaadi paksuse d mõõdame kruvikuga. Skaalajaotiste arvu N (s. o. ringskaala kahe näidu vahe) lubatud põhiveaks tuleb lugeda $0,1$ jaotist (juhul, kui mõlemad näidud on saadud nii, et kruvi K_1 on pööratud samas suunas; sel juhul ei tule arvesse kruvi surnud käik). Antud juhul võivad aga juhuslikud vead tunduvalt ületada põhiviga, mistõttu neid ei saa arvestamata jätta. Juhuslike vigade hindamiseks kordame vähemalt 5 korda loodi nulli seadmist mingile konkreetsele jaotisele, kusjuures parallaktilise vea vähendamiseks tuleb silm seada loodist võimalikult kaugemale. Kui saadud näidud erinevad üksteisest rohkem kui $0,1$ jaotist, kordame katset veel viis korda, leiame üksikmõõtmise juhusliku vea ülemmäära $3\sigma/2$. Siis suuruse N piirviga avaldub

$$\Delta N = (3\sqrt{2\sigma} + 0,1) / \text{jaot.} / . \quad (4)$$

Saadud ΔN kasutame ringskaala kahe näidu vahe piirveana ka edaspidi. Nüüd mõõdame orienteerivalt pikkuse l , arvutame tema lubatud vea ülemmäära, lähtudes eespool toodud tingimusest, et tema suhteline piirviga ei tohi ületada d ja N suhtelist piirviga. Valime sobiva mõõtevahendi ja mõõ-

dame pikkuse l . Sobiv mõõtmise meetodika tuleb leida üliõpilasel endal.

3. Määrame vesiloodi keskmise tundlikkuse ja loodi aluse kaldenurgad horisontaaltasandi suhtes, mis vastavad nulli otste asenditele skaala kriipsude kohal. Selleks on soovitatav nummerdada vesiloodi jaotised. Loeme skaala nulli nende kriipsude kohale, mille juurde jäävad nulli otsad loodi horisontaalasendis (seega saame keskelt katkestatud skaala). Nullist paremale jäävad jaotised nummerdame positiivsete arvudega 1, 2, 3, ..., vasakule jäävad aga negatiivsete arvudega -1, -2, -3, ... Hakkame ülalkirjeldatud meetodika järgi nihutama nulli skaala ühest otsast teise, kuid märgime üles mitte nulli vesiloodi jaotise võrra nihutamiseks vajaliku ringskaala jaotiste arvu, vaid ringskaala näidud n_1 , mis vastavad nulli otsa asenditele i -nda kriipsu kohal. Seda protseduuri kordame vähemalt 3 korda, liikudes iga kord nulliga samas suunas (miks?). Arvutame keskmised N_1 . Kui siinjuures nulli ühest otsast teise nihutamiseks vajalik kruvi K_1 pöördenurk ületab 2π , on soovitatav lugeda ringskaala jaotisi sajast edasi. Joonistame graafiku

$$n_1 = f(i).$$

See peaks olema sirge, mis läbib punkti $(0, n_0)$. Sirge tõus annab loodi keskmise tundlikkuse, kui korrutame teda ringskaala jaotise hinnaga α^n (vt. valem 2). Punktide hajumine sirge ümber võimaldab määrata keskmise tundlikkuse piirvea.

4. Graafik võib osutada sirgeks ainult skaala keskel, äärmiste jaotiste kohal tundlikkus muutub. Määrame graafikult loodi skaala konstantse tundlikkusega piirkonna. Sama graafik võib olla ka loodi kalibrimise kõveraks, kui n -teljele ehitada kaldenurga skaala. Et aga siin ei saa enam ühikut vabalt valida (miks?), siis on sellist skaalat ebanugav kasutada. Seepärast on soovitatav ehitada uus graafik, kus abstsisssteljele kanname ikka vesiloodi jaotised, ordinaatteljele aga neile jaotistele vastavad kaldenurgad horison-

taali suhtes φ . Graafikule kirjutame juurde siit määratavate kaldenurkade φ piirvea.

5. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed I-III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.
2. P. Prüller, H. Tammet. Mõõtmisvigade arvutamine. TRÜ rotaprint, Tartu, 1962.
3. J. Lang, A. Pae. Füüsika praktikum Tartu Riiklikus Ülikoolis II. Teaduslik kirjandus, Tartu, 1946, lk. 31-36.

7. NURKADE JA PIKKUSTE MÕOTMINE TEODOLIIDI ABIL.

1. Tööülesanne.

Teodoliidi ehitusega tutvumine, teodoliidi korrastamine. Punktide projektsioonide vahelise kanguse ja nende suhtelise kõrguse määramine, plaani (kroki) koostamine.

2. Töövahendid.

Teodoliit TT-5 kolmejalgsel alusel, reguleeritava kõrgusega kolmejalgne statiiv koos ripploodiga, mõõtlint, raskus mõõtlindi pingutamiseks, pang veega võnkumiste summutamiseks.

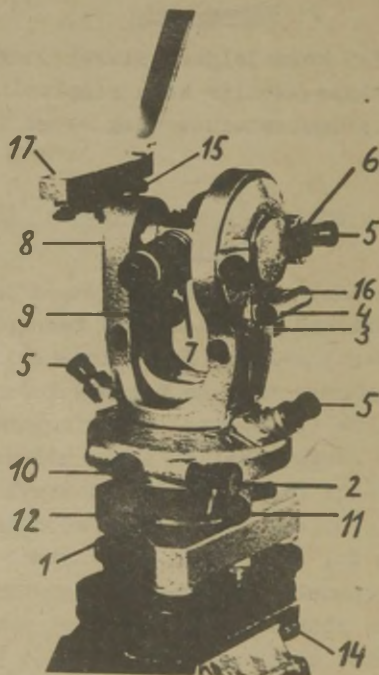
3. Teodoliidi ehitus ja korrastamine. Töö teodoliidiga.

Teodoliit on püst- ja rõhttelje ümber pööratav pikksilm, mis on varustatud vesiloodidega tema pöörlemistelgede seadmiseks vertikaalseks ja horisontaalseks ning püst- ja rõhttasapinnas olevate ringskaaladega nurkade mõõtmiseks. Põhiline (primaarne) mõõtmisoperatsioon teodoliidiga on kahe sirge vahelise nurga mõõtmine. Selleks tuleb teodoliit seada kolmejalgsele statiivile nii, et tema vertikaalne pöörlemistelg läbiks mõõdetava nurga tippu, korrastada ta, suunata ja teravustada pikksilm kordamööda nurga kummalegi haarale ülesseatud märkidele ja mõõta pikksilma pöördenurk kahe asendi vahel. Võimaluse korral püütakse ülesanne seada nii, et tegemist oleks ainult nurkade mõõtmisega vertikaal- ja horison-

taaltasendis. Siis saab kasutada ühe nurga mõõtmisel ainult üht ringkaaladest.

Teodoliidi (joon.1) põhiosad on pikksilm, horisontaal- ja vertikaalnurkade mõõteseadmed koos vesiloodidega ning reguleeritava kõrgusega jalgadega kolmjalg.

Pikksilma on võimalik teravustada esemetele, mis asuvad temast kaugustel $2\text{ m} - \infty$, objektiivi ja okulaari vahel asuva fokuseerimislaätse nihutamiselega piki pikksilma telge tema torul oleva kremaljeerrõnga abil. Eseme kujutis tekib sel juhul samas tasendis klaasplaadile kantud okulaarvõrguga. Võrk koosneb tsentraalristist, mille vertikaaljoone üks pool on kahekordne (bisektor), ja kahest horisontaalsest kaugusemõõturi-joonest. Okulaari nihutamise-



Joon. 1.

ga reguleeritakse okulaarvõrgu kujutis teravaks. Tsentraal-risti keskpunkti objektiiviga keakpunktiga ühendavat sirget nimetatakse viseerimisteljeks, ta on risti pikksilma horisontaalse pöörlemisteljega. Nurkade mõõtmisel tuleb nurga haaral valitud märgi (punkti) kujutis reguleerida ühtivaks tsentraalristi keskpunktiga (viseerimistelg läbib siis valitud punkti).

Mõlemad nurgamõõteseadmed koosnevad kahest kontsentrisest rõngast, mille keskpunkt asub pikksilma pöörlemisteljel. Väline rõngas - limb - on jagatud kogu lõikeringjoone ulatuses kraadideks ja nende osadeks, sisemisele rõngale - alidaadile - on kantud sümmeetriliselt ringi keskpunkti suhtes 2 nooniust. Limb ja alidaad pöörduvad teineteise suhtes. Nooniusse põhimõttest ja tema täpsuse arvutamisest loe käesoleva kogumiku juhendist nr. 1.

Pikksilm pöörduv ümber vertikaaltelje koos kogu teodoliidi ülaosa ja horisontaalse alidaadiga. Ka horisontaalne limb võib pöörduda sama telje ümber. Limbi asendi fikseerimiseks, samuti alidaadi kinnitamiseks limbi külge on olemas fiksaator kruvid (11, 10). Kinnikeeratud fiksaator kruvide korral on võimalik nihutada limbi koos alidaadi ja pikksilmaga kui ka alidaadi ja pikksilma limbi suhtes spetsiaalsete mikromeetriliste kruvide abil (12, 2). Horisontaalse alidaadiga on liikumatult kinnitatud piklik vesilood pikksilma pöörlemistelgedele seadmiseks vastavalt vertikaalseks ja horisontaalseks.

Vertikaalnurkade mõõteseadme juures on pikksilmaga ühendatud ja pöörduv koos temaga ümber horisontaaltelje limb, kuna alidaadi saab ümber sama telje pöörata ainult väikeses ulatuses mikromeetrilise reguleerimiskruvi (3) abil. Vertikaalsel limbil on ka olemas fiksaator kruvi ning mikromeetriline reguleerimiskruvi (15, 9). Vertikaalse alidaadiga on ühendatud vesilood (16) alidaadi mõlema nooniusse nulljoonte seadmiseks ühele rõhtsirgele ja pikksilma seadmiseks horisontaalasendisse.

Mõlemad nurgamõõteseadmed on suletud (tolmu eest kaitsitud) konstruktsiooniga. Lugemeid võetakse läbi aknakeste

luupide (5) abil.

Kolmjalg on vahelüli teodoliidi ja statiivi vahel. Statiivi küljes oleva põhikruviga kinnitatakse kolmjalg keskest statiivi külge. Jalakruvide pööramisega saab muuta teodoliidi pöörlemistelgede asendit. Teodoliit ise kinnitub kolmjala külge fiksaatorkruviga (1).

Lisaosana kuulub teodoliidi TT-5 komplekti orientiirbussool (17), s.o. magnetnõel alusel, mis on kinnitatav teodoliidi külge ja mida kasutatakse maastikul joonte (suundade) magnetilise asimuudi määramiseks. Magnetiliseks asimuudiks nimetatakse nurka Maa magnetilise meridiaani põhjasuuna ja antud joone horisontaalprojektsiooni suuna vahel, mida loetakse meridiaanist kellaosuti liikumise suunas. Asimuudi määramisel on seega alati tegemist suunatud joontega. Igal sirgel on 2 asimuudi väärtust. Asimuut võib omada väärtusi $0 - 360^{\circ}$.

Bussooli alusel oleva kahe märgi poolt määratud sirge on paralleelne pikksilma viseerimisteljega; kui magnetnõela telje siht ühtib selle sirgega, on viseerimistelg seatud põhja-lõuna sihis. Bussoolil on arreteerimiskruvi; magnetnõela võib vabastada ainult limbi orienteerimise ajaks.

Teodoliidi TT-5 osade ja detailide paigutust vaata joon. 1.

T ä h e l e p a n u ! 1. Teodoliidi pööramisel ümber vertikaaltelje ei tohi hoida pikksilmast!

2. Pikksilmal on helendatud (läbipaistvust suurendavate kihtidega kaetud) läätsed, neid ei tohi mingil juhul puutuda! Kate võtta objektiivilt ainult vaatluse ajaks!

Teodoliiti kasutatakse põhiliselt geodeesias (maamõõtmisel).

Mõõdetava nurga tipp tähistatakse maapinnal (põrandal) vaia või mõne muu märgiga. Teodoliit koos kolmjalaga kinnitatakse põhikruvi abil statiivi külge. Põhikruvi küljes olevale konksule kinnitatakse ripplood, kasutades loodi nõõril olevat liikuvat plaadikest. Statiiv seatakse märgi (nurga tipu) kohale nii, et jalad moodustaksid võrdkülgse

kolmnurga ja ripplood oleks suunatud võimalikult täpselt märgile. Seda toimingut nimetatakse teodoliidi tsentreerimiseks. Täpsemaks tsentreerimiseks on tehtud põhikruvi statiivi avas nihutatavana. Enne lõplikku tsentreerimist tuleb reguleerida statiivi jalgade pikkust selliselt, et tema plaat oleks enam-vähem rõhtne ja pikksilm vaatlemiseks mugaval kõrgusel.

Teodoliidi korrastamisel tuleb algul seada pikksilma pöörlemistelg vertikaalseks, kasutades kolmjala jalakruvisid ja vesiloodi horisontaalse alidaadi juures. Eeldusel, et vesilood on õiendatud (s.t. kui alidaadi tasand on horisontaalne, on mull keskel), tuleb seda operatsiooni teostada järgnevalt (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 6). Vesiloodi telg seatakse paralleelseks kahte jalakruvi ühendava sirgega, nende kruvide abil seatakse mull keskele. Teodoliiti pööratakse 90° , seatakse mull keskele 3. jalakruviga. Seda protseduuri korratakse veel üks kord. Nüüd on pöörlemisteljed jämedalt paika seatud. Täpsem reguleerimine teostatakse vertikaalringi alidaadi vesiloodiga, kuna sellel on olemas reguleerimiskruvi (3, joon. 1). Siin kasutatakse aluse horisontaalseks seadmise ja vesiloodi samaaegse õiendamise meetodit (vt. käesoleva kogumiku juhend nr.6). Siinjuures tuleb saavutada, et vertikaalringi vesiloodi mull jääks keskele pikksilma mistahes asendis teodoliidi pööramisel ümber vertikaaltelje. Nüüd on üks telgedest vertikaalne ja teine horisontaalne (telgede omavahelist perpendikulaarsust garanteerib tehas).

Kui vertikaalringi vesilood on õiendatud, siis on nüüd korrastatud ka vertikaalne alidaad, s.t. tema mõlema nooniusse nulljooned asuvad ühes horisontaaltasandis. Pikksilma viseerimistelg on nüüd horisontaalne, kui lugemid vertikaallimbilt on $0^{\circ} 00' 00''$ ja $180^{\circ} 00' 00''$. Et selles veenduda, seatakse pikksilm nii, et lugemid vertikaalringilt oleksid $0^{\circ} 00' 00''$ ja $180^{\circ} 00' 00''$, otsitakse (pikksilma ümber vertikaaltelje pöörates) mingi selgesti eraldatav punkt ja fokuseeritakse pikksilm sellele. Vertikaalnurkade mõõtesead (vertikaalring) on seejuures paremal

(või vasakul), sellisel juhul vertikaalringilt võetud lugem-
nit tähistatakse RP (ring paremal) (või RV). Seega siis
RP = $0^{\circ} 00' 00''$, $180^{\circ} 00' 00''$ (või RV = $0^{\circ} 00' 00''$, 180°
 $00' 00''$). Pikksilm pööratakse nüüd üle seniidi, samuti üm-
ber vertikaaltelje 180° võrra, fokuseeritakse samale punk-
tile. Kui nüüd ka RV = $180^{\circ} 00' 00''$, $0^{\circ} 00' 00''$ (või RP =
 $180^{\circ} 00' 00''$, $0^{\circ} 00' 00''$), on alidaad korrastatud. Kui see
aga pole nii, siis on vaja vesilood õiendada, kasutades re-
guleerimiskruvisid (4, joon. 1); selleks tuleb paluda juhenda-
daja või laborandi abi.

Töötamisel teodoliidiga (nagu ka mistahes teise mõõte-
riistaga) tuleb valida meetodika selliselt, et võimalikult
vähendada meetodilisi ja instrumendi ebatäpsusest tingitud
süsteemilisi vigu. Selleks peab aga teadma vigade allikaid.
Nurga mõõtmisel teodoliidiga on vigade allikaid küllalt pal-
ju. Neist tähtsamad on: 1) teodoliidi ja nurga haaradele
seatavate märkide tsentreerimise ebatäpsus, 2) suunamise eba-
täpsus, 3) teravustamise ebatäpsus (okulaarvõrgu ja eseme ku-
jutiste sattumisel mitte rangelt ühele tasandile tekib paral-
laktiline viga), 4) lugemi võtmise ebatäpsus (silma viga),
5) limbi ja nooniusse jaotiste valmistamise ebatäpsus, 6) pikk-
silma pöörämistelgede mittehorisontaalsus ja mittevertikaal-
sus, 7) pikksilma viseerimistelje ja horisontaalse pöörämiste-
telje mitteristseis (kollimatsiooniviga), 8) alidaadi ja
limbi ekstsentrilisus (pöörämistelg ei läbi alidaadi ja lim-
bi keskpunkti), 9) juhusliku iseloomuga välismõjud (maapin-
na kõikumine, õhu virvendus).

Teodoliidi passis ei limiteerita kõiki neid vigu üksi-
kult. Kui teodoliit on korrastatud passis antud meetodika
kohaselt, kui mõõtja enda silm on nooniusse lugemiseks kül-
lalt treenitud, siis võib kõiki neid vigade allikaid vaadel-
da küllalt väikeste, nõrkade põhjustena. Väga paljude nõr-
kade veaallikate olemasolul on aga vigade esinemissagedus
normaaljaotusega ja me võime mõõtmistulemusi iseloomustada
ruutkeskmise (või aritmeetilise keskmise) veaga. Teodoliidi
TT-5 passis antaksegi üksikmõõtmise ruutkeskmise viga
 $\sigma = \pm 15''$. Täheand, tõenäosusega 99,7% on garanteeritud, et

korduval viseerimisel mingile punktile saadud näidud ei erine nende aritmeetilisest keskmisest rohkem kui $36 = 45''$ võrra. Et nurk arvutatakse kahe näidu vahena, siis kummalgi haarale ühekordse viseerimisega mõõdetud nurga väärtuse (üksikmõõtmise) ruutkeskmine viga $\sigma_1 = \sqrt{26} \approx 22''$. Seega ühekordsel mõõtmisel saadud nurga piirviga on $36, \approx \approx 1'$. Tuleb pidada meeles, et see kehtib hästikorrastatud teodoliidi ja kogenud mõõtja korral.

Üldiselt kasutatakse teodoliidiga mõõtmisel alati korduval mõõtmisi, kusjuures meetodika õige valikuga on võimalik mõningaid vigu kompenseerida. Kahe noonluse abil saadud nurga väärtuste keskmistamisel kompenseeruvad ekstsentrilisusest tingitud vead (miks?). Kollimatsooniviga ja pöörlemistelje mittehorisontaalsusest tingitud viga saab kompenseerida, mõõtes nurka vertikaalringi kahe asendi korral (s.t. võttes lugemid RP ja RV, pöörates vahepeal pikk-silma üle seniidi) ja keskmistades (miks?). Limbi ja noonluse jaotiste ebatäpsusest tingitud viga oleks võimalik kompenseerida, korrates mõõtmisi n korda ja pöörates vahepeal limbi $\frac{1}{n}$ võrra täispöördest (näit. võib mõõta 3 korda, limbi igakordne pööre peab olema 120°). Seda aga tavaliselt ei tehta, kuna jaotiste viga on väiksem teistest põhjustest tingitud vigadest ($< 3''$). Limbi pööramisega on võimalik muuta lugemi võtmise viga juhuslikuks, kuna korduval mõõtmisel skaala samas punktis harjub silm skaala pilddiga ja viga muutub süstemaatiliseks. Seepärast pööratakse lugemite RP ja RV võtmise vahel ka limbi mõningal määral. Eriti hoolikas peab olema märgile teravustamisel, kuna tekiv parallaktiline viga võib mitmekordselt ületada kõik teised. Teravustamist tuleb alati kontrollida parallaksi puudumise järgi - silma nihutatakse okulaari ees, niitris-ti ja märgi kujutised ei tohi nihkuda teineteise suhtes (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 1).

Vastavalt eespool toodud piirvea suurusele võivad lugemitest RP ja RV arvutatud horisontaal- ja vertikaalnur-kade väärtused erineda üksteisest mitte rohkem kui $2'$ võrra. Vastasel korral tuleb mõõtmisi korrata. Kui erinevused

on ka nüüd suuremad, tuleb teodoliit uuesti korrastada ja mõõtmisi korrata. Saadud aritmeetilise keskmise väärtus ei sisalda nüüd enam kolmest eelmainitud põhjusest tingitud süstemaatilist viga; tema vea täpsemaks hindamiseks tuleks kogu mõõtmistsükli mitu korda korrata ja leida RP või RV aritmeetiliste keskmiste keskvaartus ja tema ruutviga. Seda tavaliselt ei tehta; RP ja RV keskmisena leitud nurga väärtuse maksimaalseks veaks loetakse 1' nagu ühekordselgi mõõtmisel. (RP ja RV keskmise maksimaalne viga on muidugi väiksem.)

Kauguse l mõõtmine teodoliidi tsentreerimispunkti kuni mõne ülesseatud märgini on teine põhiline mõõtmisoperatsioon teodoliidiga. Seejuures kasutatakse trigonomeetriat: täisnurkse kolmnurga kaatet leitakse teravnurga ja teise kaateti väärtustest. Punkti, milleni kaugust mõõdetakse, seatakse vertikaalselt püsti silmaga hästi eraldatavate sentimeeterjaotistega latt (nivelleerimislatt). Horisontaalse viseerimisteljega pikksilm suunatakse latile, seejärel mingile kõrgemal või madalamal olevale jaotisele latil, mõõdetakse pöördenurk ja jaotiste vahe latil pikksilma kahes asendis. Kaugus (teine kaatet) arvutatakse. Tänapäeva teodoliitidel on mõõtmis- ja arvutusoperatsioonide lihtsustamiseks nn. niitkaugusemõõtur. Nimelt kantakse okulaarvõrgule lisaks tsentraalristile veel kaks horisontaalset joont. Neid jooni läbivad valguskiired määravad konstantse teravnurga, mille tipp asub võimalikult lähedal vertikaalsele pöörlemisteljele. Viseerimistelje horisontaalasendi korral kehtib nüüd valem

$$l = k h,$$

kus h - lati kujutisel kaugusemõõturi joonte vahele jääv jaotiste arv,

k - kaugusemõõturi konstant.

Enamikul teodoliitidest (sealhulgas ka TT-5) on valitud $k = 100$; lati kujutisel leitud sentimeeterjaotiste arv annab siis kohe kauguse l meetrites.

Konstanti k ei normita, tema viga tuleb määrata iga

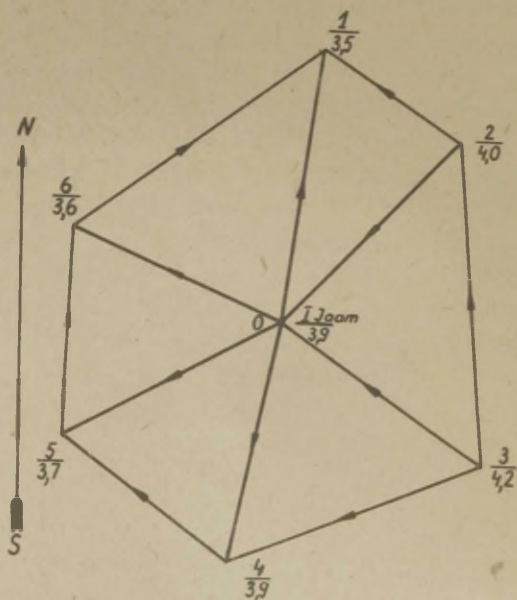
teodoliidi jaoks eraldi. Selleks võrreldakse teodoliidiga ja metallmõõtlindiga mõõdetud ühe ja sama kauguse väärtusi. Praktikumis kontrollitakse konstanti k eespool kirjeldatud meetodikaga kauguse mõõtmise tulemuste järgi. Nivelleerimislätte samuti ei normita, on ette nähtud lattide perioodiline kontroll täpsete mõõtlintide või joonlaudadega. Pikemaajalised uurimused on näidanud, et temperatuuri ja niiskuse muutuste mõjul võib lati pikkus muutuda kuni 0,5 mm meetri kohta. Seega võib võtta lati jaotiste vahe lubatud veaks pikkuste korral kuni 1 m - 0,5 mm, üle 1 m - 0,05%.

Töötamisel teodoliidiga, millel on olemas vertikaalring ja kaugusemõõtur, on võimalik määrata maastikupunkti-de projektsioonide asendit horisontaaltasandil (plaanis), samuti ka nende punktide suhtelisi kõrgusi (reljeefi), kusjuures teodoliit jääb kogu mõõdistamise ajaks ühte punkti. Sellist mõõdistamisviisi nimetatakse polaarviisiks, ta on väga levinud hulknurgakujuliste maatükkide mõõdistamisel. Teodoliidi tsentreerimispunkti nimetatakse jaamaks. Punktide asukohtade määramiseks plaanis valitakse üks punktidest algpunktiks (suunda jaamast algpunktile nimetatakse alg-suunaks), määratakse selle punkti asimuut ja algsuuna ning jaama teiste punktidega ühendavate sirgete vahelised nurgad, samuti kaugused jaamast kõigi punktideni. Orientiirbussooli kasutamise korral on soovitatav orienteerida limb magnetilise meridiaani järgi, siis annab limbilt võetud luge-m otsekohe antud suuna asimuudi. Limbi orienteerimiseks seatakse limbi null ühte alidaadi ühe nooniusse nulliga (teise nooniusse näit võib erineda 180°-st nooniusse jaotise väärtuse võrra), kinnitatakse alidaad ja limbi pööramise-ga seatakse pikksilm bussooli järgi põhja-lõuna sihis. Limb kinnitatakse, ta ongi nüüd orienteeritud.

Punktide suhtelise kõrguse määramiseks juhul, kui valitud punktide kõrguste vahed pole väga suured, kasutatakse horisontaalkiirega nivelleerimist. Selleks võetakse laltilt lugemid kõigis punktides pikksilma horisontaalasendi korral, nende lugemite vahed annavad punktide suhtelise kõr-

guse. Kõrguste leidmiseks jaama suhtes peab teadma veel teo-
doliidi kõrgust.

Mõõtmistulemuste ümbertöötamise lihtsustamiseks skit-
seeritakse mõõdetava maa-ala plaan (silma järgi) mõõtmise
ajal - koostatakse kroki. Krokiile märgitakse tingimata
põhja - lõuna suund, jaama ja mõõdetavate punktide asukohad
(nummerdatakse). Kõik punktid ühendatakse omavahel ja jaa-
maga sirglõikudega, lõigule märgitud nool näitab kallaku
languse suunda. Mõõtmistulemuste ümbertöötamisel tehakse
täpne joonis mõõtkavas, kusjuures kõigile punktidele kirju-
tatakse lisaks punkti numbrile juurde ka kõrgus (meetrites)
mingist valitud nivoo-pinnast (punkti numbriga alla murru ni-
metajana). Seda joonist nimetatakse plaaniks. Plaani näide
on toodud joonisel 2.



Joon. 2.

4. Töö käik.

Punktide väikese kauguse korral jaamast ei saa kasutada tavalisi nivelleerimislatte, kuna jaotiste väike täpsus ja lati väikesed kõrvalekalded vertikaalasendist põhjustavad mõõtmistulemustes vigu, mis muudavad teodoliidi enda suure täpsuse mõttetuks. Seepärast kasutatakse selles töös metallmõõtlinti, mis kinnitatakse laes olevate poltide külge ja mille otsas ripuv raskus lindi rangelt vertikaalsena hoiab. Võnkumiste vältimiseks võib raskuse lasta vette. Mõõta tuleb kolme eespool nimetatud poldi asend plaanis ja nende suhtelised kõrgused ühe (kõige rohkem laest välja ulatuva) poldi suhtes. Mõõdetavateks punktideks võib valida mistahes punktid poltide otste juures (näit. mõõtlindi kinnitustihvti ots); punkti valik ei mõjusta mõõtmisprotsessi üldse, kuna pikksilm teravustatakse ainult mõõtlindile.

Tsentreerime teodoliidi juhendaja poolt näidatud punkti (jaama O) kohale, korrastame ta. Orienteerime limbi. Riputame mõõtlindi ühe äärmise poldi (soovitav vasakpoolse) otsa, nii on määratud algsuund. Teravustame horisontaalse pikksilma mõõtlindile, võtame horisontaallimbilt lugemid mõlema nooniuuse järgi, samuti niitkaugusemõõtluri lugemi ja kõrguse lugemi, siis teravustame pikksilma mõõtlindi võimalikult kõrgesse (või madalasse) punkti, võtame lugemi lindilt selles punktis ja vertikaallimbi lugemid mõlema nooniuuse järgi. Viimased andmed on vajalikud kaugusemõõtluri konstandi kontrollimiseks. Täieliku lugemi võtame ainult ühe nooniuuse järgi, teise järgi loeme ainult minutid ja sekundid; kahe nooniuuse näitude minutite-osad keskmistame. Tuleb jälgida ainult, et kõikide punktide mõõdistamisel võetaks täielik lugem alati ühe ja sama nooniuuse järgi. Nüüd on saadud kõik vajalikud andmed vertikaalringi ühe asendi (RV või RP) korral. Pöörame pikksilma üle seniidi ja kordame kogu tsüklit. Sama teeme kahe ülejäänud mõõdistatava punkti korral, ainult kaugusemõõtluri kalibrimist ei ole vaja korrata. Andmed on soovitav kanda tabelitesse:

Horisontaalnurkade $\hat{102}$ ja $\hat{103}$ mõõtmise andmed:

Punkti tähis krokiil	Nooniuste lugemid (RP)		Nurga suurus (RP)	Nooniuste lugemid (RV)		Kesk- mine lugem	Nurga suurus (RV)
	I	II		I	II		
1.	$\hat{102}$ ...	.....	.....	.....	$\hat{102}$...
2.	$\hat{103}$ ...	.....	.....	.....	$\hat{103}$...
3.	
Nurkade keskm. väärtused:							

Kõrguste ja kauguste mõõtmise andmed:

Vertikaalringi nooniuste lugemid horisontaalse viseerimis-
telje korral: $0^{\circ} 00' 00''$ ja ...

Punkti tähis krokiil	Niit- kauguse- mõõturi lugem	Lindi lugem pikk- silma horis. asen- dis a	Lindi lugem pikk- silma kald- asen- dis b	/a-b/	Vert-ringi nooniuste lugemid		Kesk- mine lugem	Ver- ti- kaal- nurk
					I	II		
1.	RP			
				
					RV			
				
					keskm.			
2.						
3.						

Koostame krokiil.

Kodus arvutame punktide 1, 2 ja 3 vahelised kaugused ja nende suhtelised kõrgused (koos veaga). Kauguste arvutamisel kasutame niitkaugusemõõturi konstandi täpsustatud väärtust. Joonestame plaani sobivas mõõtkavas (kasutades malli ja joonlauda). Kõrgused kanname ainult mõõdistatud punktide juurde kõige madalama punkti suhtes, jaa ma kõrgus jääb antud töös määramata.

5. Lisaküsimusi.

1. Miks on okulaarvõrgu vertikaaljoon tehtud bisektorina?
2. Millal on kasulik kasutada pikksilma täpseks suunamiseks märgile mitte alidaadi, vaid limbi mikromeetrist pöörämist?
3. Tõestada, et kahe nooniusse järgi võetud näitude keskmistamine kompenseerib ekstsentrilisusest tingitud vead.
4. Selgitada, miks kompenseerib näitude RP ja RV keskmine horisontaaltelje kallakusest tingitud vead ja kollimatsioonivea.
5. Tõestada geomeetriselt, et kaugusemõõturi valem $l = kh$ on täpne ainult viseerimistelje horisontaal-asendi korral.
6. Põhjendada, miks võib teise nooniusse lugemist kirjutada üles ainult minutid ja niiviisi saadud kahe nooniusse lugemid kohe keskmistada (selle asemel et keskmistada kahe nooniusse lugemitest arvutatud nurga väärtusi).
7. Millal pole rakendatav horisontaalkiirega nivelleerimine?

6. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed III. TRÜ roteprint, Tartu, 1968.
2. N. A. Nazarov. Geodeesia. EHK, Tallinn, 1952, lk. 102 - 121.

8. KAALUMINE SUMMUTIGA ANALÜÜTILISTEL KAALUDEL.

KEHA TÕELISE MASSI MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine summutiga analüütiliste kaalude ehituse ja kaalumise meetoditega. Tutvumine vigade allikatega kaalumisel. Keha tõelise massi arvutamine (õhu üleslükkest tingitud parandi arvestamine).

2. Töövahendid.

Analüütilised kaalud AA-200, vihtide komplekt, kaalutav keha (õhuga täidetud kinnijoodetud klaaskuul), mõõtsilinder.

3. Analüütiliste kaalude ehitus ja massi mõõtmise metoodika.

Mõõtmisel suhtelist piirviga 10^{-5} kuni 10^{-6} (s.o. $10^{-3}\%$ kuni $10^{-4}\%$) võimaldavad II klassi analüütilised kaalud on võrdõlgised kangkaalud. Põhiliseks mõõteoperatsiooniks on tundmatu massiga keha massi mõõtmine tema võrdlemise teel etaloonidest - vihtidest - koostatud sobiva komplekti kogumassiga.

Kaalude **põhisaks** on jäik metallkang, mis oma väga kõvast materjalist - ahhaadist, kvartsist v.m. - prisma terava servaga toetub samast materjalist tasasele alusplaadile. Kaalukangi otstel on samasugused prismad kinnitatud toetusservaga ülespoole. Nendele servadele toetuvad tasased plaadid, mille küljes ripuvad kaalukaunid.

Kogu see süsteem on suletud klaasustega kappi. Spetsiaalselt seadme - arretiiri abil tõstetakse nii kang kui kaunid üles, nii et prismad on plaatidest isoleeritud. Kaal vabastatakse arretiirist ainult vahetult mõõtmise ajaks.

Tühjade või võrdsete koormustega koormatud kaussidega kaalukang peaks arretiirist vabastamisel jääma rangelt horisontaalsesse asendisse - tasakaaluseisu. Reaalselt saab ta aga alati arretiirist vabastamisel väikese tõuke, mis viib ta tasakaaluasendist välja. Kaalukang on ehitatud nii, et tema masskese on madalamal kui toetusprisma serv, seega kujutab ta endast füüsilist pendlit ja hakkab võnkuma tasakaaluasendi ümber. Sealjuures võngub kaalukangi keskel kinnitatud pika vertikaalse osuti ots skaala ees, võimaldades kangi liikumist paremini jälgida.

Analüütiliste kaalude täpsem kirjeldus ja teooria on antud kirjanduses /1, lk. 80 - 84/. Selgub, et kaal on seda tundlikum, mida lähemal on masskese toetusprisma servale. Aga siis on ka võnkeperiood suurem ja võnkumiste sumbumine võtab rohkem aega. Seepärast määratakse tundlike kaalude kangi tasakaaluasend tavaliselt võnkeamplituudide kaudu /1, lk. 75 - 79/. Selliselt määratud lugem on ühtlasi ka täpsem, sest hõõrdumise olemasolu tõttu prisma ja toetusplaadi vahel võib kaalukang peetuda õigest tasakaaluasendist veidi kõrval.

Tänapäeval osutub võimalikuks nimetatud hõõrdumist küllalt väikseks teha. Kaalud varustatakse elektromagnetiliste või õhksummutitega võnkumise kiireks kustutamiseks. Õhksummuti koosneb kahest teineteise sisse käivast kausist. Üks kauss on kinnitatud liikumatult kaalu tugisamba külge, teine aga ripub koos kaalukaasiga. Kahe kausi vahele jääb kitsas õhupilu. Kaalukangi võnkumisel tekib ühes summutitest alarõhk, teises ülerõhk; rõhumisjõud liikuvalle kausile on alati suunatud liikumisele vastu. Läbi kitsa pilu kausside vahel voolab õhk, tekkivad hõõrdejõud on ka alati liikumisele vastassuunalised. Kõige selle tulemusena sumbib võnkumine väga kiiresti ja kangi tasakaaluasend mää-

ratakse skaala ette seisma jäänud osuti asendiga. Sealjuures tekib muidugi (hõõrdumise olemasolust tingituna) väike viga, mis on juhuslikku laadi. Selle vea ülemmäär on GOST-iga määratud ja sõltub kaalu tüübist - lubatud variatsioon $\Delta_m / 2$.

Kaalukang on võrdse massiga koormuste korral horisontaalasendis tasakaalus ainult siis, kui tema õlad, s.o. otsmiste ja keskmise prisma servade vahelised kaugused on rangelt võrdsed. Mõõtmistäpsuse 10^{-5} saavutamiseks peab näit. 10 cm pikkuste õlgade korral nende võrdsus olema garanteeritud $1 \mu\text{m}$ täpsusega. Ideaalset võrdsust pole kunagi võimalik saavutada, pealegi muutub õlgade pikkuste suhe kangi võnkumisel, sest prisma silindriliselt töödeldud toetuserv veereb mööda plaati ja toetuspunkti asukoht muutub. Seepärast määrab GOST ka mittevõrdõlgasusest tingitud vea ülemmäära sõltuvalt kaalu täpsusklassist /2/.

Kaalumisel määratakse kõigepealt tühjade kaalude tasakaaluasend - nulltäpp. Nulltäpp võib asuda skaala keskmisest joonest maksimaalselt 1 jaotise võrra kõrvval, vastasel juhul tuleb kaalu reguleerida. Seejärel asetatakse kaalutav ese vasakule kaalukaussile, vihid aga paremale. Soovitav on keha eelnevalt kaaluda vähemtäpsetel kaaludel, siis on lihtsam valida sobivat vihtide komplekti. Vihtide valikut alustatakse alati suurematest vihtidest ja minnakse järkjärgult kõige väiksemani välja. Niimoodi koostatakse vajalik komplekt minimaalsest arvust vihtidest, mis kindlustab ka minimaalse vea. Vihtide valimisel ei tohi kaale arretii-rist täielikult vabastada. Kangi mittetäielikul vabastamisel kaldub ta juba ühele poole ja on selge, kas paremal kaalukaussil tuleb vihtide massi vähendada (s.t. asendada viimasena asetatud viht järgmise kergemaga) või suurendada (asetada peale järgmine viht).

Tavaliselt ei õnnestu olemasolevate vihtidega kaalu tasakaalustada - kaal on selleks liiga tundlik. Täpsemaks tasakaalustamiseks kasutatakse ratsurit. Ratsur on kindla massiga (antud juhul 10 mg) traadist kujund, mis asetatakse kaalukangi ülemisele servale teatud kaugusele toetus-

prisma servast. Ratsuri raskusjõu õlg on väiksem kui kaalukausile asetatud vihtide oma, seepärast on ta oma pöörava momendi poolest ekvivalentne kaalukausile asetatud kergema vihiga. Ratsuri ekvivalentne mass m' määratakse seosest

$$m' = m \frac{\ell'}{\ell} = m \alpha,$$

kus m - ratsuri mass,

$\alpha = \frac{\ell'}{\ell}$ - ratsuri kauguse ja kaalu õla pikkuse suhe, mis määratakse kaalukangi ülemisel serval oleva skaala abil.

Ratsuri abil oleks võimalik kaalude ΔM -200 korral seada koormatud kaalu tasakaalutäpp nulltäpiga ühtivaks nii, et mittetasakaalustatusest tingitud viga ei ületaks 0,1 mg. Aja kokkuhiciuks määratakse aga tavaliselt tasakaalutäpp N_1 , püüdmata teda täpselt N_0 -ga kokkulangevaks ajada (N_1 ei tohi N_0 -st erineda rohkem kui 5 jaotist), ja arvutatakse parand ΔM vihtide ja ratsuri summaarsele massile (M'):

$$\Delta M = \frac{1}{\tau} (N_1 - N_0).$$

Siin τ on kaalude tundlikkus - ühikulise massiga keha poolt tekitatud osuti hälve. $\frac{1}{\tau}$ on jaotise hind (mõõdetakse tavaliselt ühikutes mg/jaot). Kui skaala jaotised on nummerdatud vasakult alates, siis annab see valem parandi õige märgiga. Et τ oleneb koormusest, tuleb ta iga kord konkreetselt määrata. Selleks nihutatakse ratsurit kaalukangil, nii et kang võtab uue tasakaaluasendi; tasakaalutäpp N_2 peab asuma teisel pool N_0 . τ arvutatakse siis

$$\tau = \frac{|N_2 - N_1|}{\Delta m}.$$

kus Δm - ratsuri nihkele vastav ekvivalentne massi muutus kaalukausil.

Kaalutava keha massi arvutamiseks saame valemi:

$$M = M' + \Delta M = M' + \Delta m \frac{N_1 - N_0}{N_2 - N_1} \quad (1)$$

Kaalumise lõpul määratakse kontrolliks uuesti nulltäpp. See ei tohi esialgsest erineda rohkem kui 0,2 jaot. võrra.

Tasakaalutäpid tuleb antud töös määrata 0,1 - 0,2 jaotise täpsusega. Seda võimaldab parallelski vältimiseks kasutatav nugaosuti (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 1).

Mõõtmistulemuse M piirviga määratakse vihtide summaarse lubatud põhivea, kaalu mittevõrdõlgususest tingitud piirvea ja parandi ΔM piirvea summana. Parandi piirviga ei arvutata tavaliselt valemi (1) alusel, vaid ta võetakse võrdseks maksimaalse lubatud variatsioonini ja ratsuri ekvivalentse massi vea summaga. Variatsiooni on võimalik tasakaalutäppide korduvaid määramisi kasutades vähendada, nii et temast tingitud vea võib arvestamata jätta /1, lk. 25/. Ratsuri ekvivalentse massi viga leitakse korrutades ratsuri massi vea suhtega α ja liites kaalukangi skaala ebatäpsusest tingitud vea (A_{Ω} -200 korral 0,2 mg). Asendusmeetodit kasutades on võimalik elimineerida ka mittevõrdõlgususest tingitud viga /1,2/. Sel juhul määrab M 'vea ainult vihtide lubatud vigade summa.

4. Keha tõelise massi arvutamine.

Et kaalumine toimub õhus, mõjub nii vihtidele kui kaalutavale kehale Archimedese seaduse järgi üleslükkejõud ja kaalukangi tasakaaluolukorra (horisontaalseisu) korral ei ole kaalutava keha ja vihtide massid võrdsed. Kehtib ilmselt võrdus

$$M_t g - V_k \rho_{\text{õ}} g = M g - V_v \rho_{\text{õ}} g.$$

Siin M_t on keha tõeline mass (mida saaks määrata vaakuumis kaaludes), M on kasutatud vihtide taandatud mass /2, lk.22/ (koos parandiga valemi (1) järgi), $\rho_{\text{õ}}$ on õhu tihedus, V_k ja V_v - vastavalt keha ja vihtide ruumala. Kui kaalumise täpsus

ei ületa 10^{-5} , siis võime keha ruumala V_k arvutamisel asendada $M_t - M$ ja valem saab kuju:

$$M_t = M \left[1 + \rho_{\delta} \left(\frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_v} \right) \right]. \quad (2)$$

Siin ρ_k on keha tihedus, $\rho_v = 8000 \text{ kg/m}^3 / 2$, lk. 22/. Kui keha tihedus pole teada, on lihtsam määrata tema ruumala V_k . Siis valem (2) saab kuju:

$$M_t = M + \rho_{\delta} \left(V_k - \frac{M}{\rho_v} \right). \quad (3)$$

Mõõtmistäpsuse kuni 10^{-5} korral võib õhu tiheduse ρ_{δ} arvutada valemist

$$\rho_{\delta} = 347 \frac{p/\text{mb}/}{T/^{\circ}\text{K}/} / \text{gm}^3/. \quad (4)$$

Kui M suhteline piirviga on väiksem kui 10^{-5} , tuleb valemite (2), (3) ja (4) asemel kasutada kirjanduses /1, lk.91 - 94/ antud täpsemaid valemeid.

5. Kaalude ja vihtide käsitlemise reeglid.

1. Kaalukangi ja -kausse ei tohi käega puudutada.
2. Kaalukaussidele pole lubatud panna midagi määrivat, märga ega kuuma.
3. Kaalutav keha asetatakse vasakpoolsele kaalukaussile, vihid parempoolsele.
4. Tuuletõmbuse ärahoidmiseks peavad kapi klaasüksed kaalumise ajal olema suletud.
5. Kaalude ülekoormamine on keelatud. AD -200 lubatud maksimumkoormus on 200 g.
6. Vihte ei tohi käega tõsta. Vihtide käsitlemisest loe /2/. Kaalukaussilt eemaldatud vihid asetatakse otse kapi tagasi, mingil juhul ei tohi neid lauale panna. Karbis peavad vihid asuma suuruse järjekorras.
7. Kaalusid võib arreteerist vabastada ainult vahetult mõõtmise ajaks, kusjuures osuti ei tohi skaala piiri-

dest välja minna. Kaalud tuleb arreteerida sujuva liigutusega momendil, mil osuti läbib skaala nulli.

8. Kaalumise ajal ei tohi toetuda kaalude aluslauale. Arreteerimata kaalusid ei tohi tõugata ega pörutada!

6. Töö käik.

1. Tutvume põhjalikult analüütiliste kaalude ehituse ja teooriaga. Harjutame kaalude arreteerimist ja arreteerimist vabastamist. Seame kaalud loodi alusel oleva ümmarguse vesiloodi abil. Jälgime, kas kaalukang võngub vabalt, takistusteta.

2. Määrame kaalude nulltäpi.

3. Kaalume õõnsa klaaskuuli maksimaalse võimaliku täpsusega.

4. Määrame mõõtsilindri abil klaaskuuli ruumala.

5. Arvutame klaaskuuli tõelise massi koos piirveaga.

7. Lisaküsimusi.

1. Miks võib ΔM piirvea lugeda võrdseks kaalude lubatud variatsiooni ja ratsuri ekvivalentse massi vea summaga?

2. Kuidas on võimalik reguleerida analüütiliste kaalude nulltäppi ja tundlikkust?

8. Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 74-96.

2. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968, lk. 21-26.

9. MÕÖTKOLVI KALIIBRIMINE.

1. Tööülesanne.

Määrata kolvi maht kuiva ja märja kasutusviisi jaoks.

2. Töövahendid.

Märgiga kolb, analüütilised kaalud, vihid, destilleeritud vesi, termomeeter, nihik.

3. Sissejuhatus.

Mõõtkolbe ja mõõtsilindreid on kahesuguseid: märga tüüpi ja kuiva tüüpi. Kõigil märga tüüpi mõõtudel on märk "O" (отливной) ja kuiva tüüpi mõõtudel märk "H" (наливной). Märke ei ole bürettidel, pipettidel ja koonilistel mensuuridel, kuna neid valmistatakse ainult märga tüüpi.

Kuiva tüüpi mõõdu nominaalmaht võrdub mõõdus oleva vedeliku mahuga tingimusel, et vedeliku meniski puutetasand lõikab märkjoont ja temperatuur on 20°C.

Mõõdu õigeks täitmiseks tuleb ta asetada horisontaalsele lauale. Vaatleja silm peab asuma vedeliku meniskiga samal kõrgusel, siis paistab meniski tasane osa serva poolt vaadates joonena.

Klaasi joonpaisumistegur on $\approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$, ruumpaisumistegur seega $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ deg}^{-1}$. Siit on näha, et temperatuuri erinevus normaaltemperatuurist 5 deg võrra põhjustab $\approx 0,015\%$ meetodilise vea. Meetodilist viga

saab vajaduse korral vähendada temperatuuriparandi arvesse võtmisega.

Ei tohi unustada, et vedelike ruumpaisumistegurid on klaasi ruumpaisumistegurist umbes 100 korda suuremad. Seetõttu peab alati olema selge, millise temperatuuri korral on vaja vedeliku ruumala teada. Kui mõõtmine toimub erineval temperatuuril, tuleb ruumala ümber arvutada.

Kuiva tüüpi mõõduga saab mõõta ainult mõõtu sissevalatava vedeliku hulka. Väljavalatava vedeliku hulk on mõõdu nominaalruumalast väiksem, sest osa vedelikku jääb anuma seinte külge. Praktikas on aga enamasti vaja teada just väljavalatava vedeliku hulka. Sel puhul kasutatakse märga tüüpi mõõte.

Märga tüüpi mõõdu nominaalmaht võrdub märkjooneni täidetud mõõdust välja valatud vedeliku hulgaga tingimusel, et temperatuur on 20°C ja mõõtu hoiti ümberpööratud asendis 30 s (2 l mõõtu erandina 60 s). Märga tüüpi mõõtudega saab õigesti mõõta ainult vett ja väikese kontsentratsiooniga vesilahuseid (on ilmne, et siirupi mõõtmisel tekiks mitte just väike viga).

Kui märga tüüpi mõõtu on vaja kasutada sissevalatava vedeliku mõõtmiseks, tuleb ta eelnevalt märjaks teha. Paremini on aga kasutada võimaluse korral kuivi mõõte, kuna need on täpsemad.

Mõnel (vanemat tüüpi) mõõtkolvil on kaks märkjoont: üks märja, teine kuiva kasutusviisi jaoks.

4. Kaliibrimismeetod.

Märkjoonega varustatud kolbe kalibritakse kaalu ja destilleeritud vee abil. Ruumala arvutamiseks vajalik destilleeritud vee tihedus normaalrõhul sõltuvalt temperatuurist on näidatud tabelis 1.

Kaalutakse kuiv kolb ja märkjooneni veega täidetud kolb. Masside vahe annab vee massi, sellele arvutatakse õhu üleslükkest tingitud parand (s.t. leitakse vee tõeline mass) (vt. käesoleva kogumiku töö nr. 8). Arvutamisel võib

Tabel 1.

t/ °C /	/Mgm ⁻³ /	t/ °C/	/Mgm ⁻³ /	t/ °C/	/Mgm ⁻³ /
12	0,99952	18	0,99862	24	0,99732
13	0,99940	19	0,99843	25	0,99707
14	0,99927	20	0,99823	26	0,99681
15	0,99913	21	0,99802	27	0,99654
16	0,99887	22	0,99780	28	0,99626
17	0,99880	23	0,99757	29	0,99597

kasutada täpsust kuni 10^{-5} garanteerivaid valemide. Arvutatakse vee ruumala katse temperatuuril. See annab kolvi nominaalruumala kuiva kasutusviisi jaoks. Et teada sama kolvi nominaalruumala märja kasutusviisi korral, tuleb kaaluda märg kolb. Täidetud kolvi ja märja kolvi masside vahe järgi leitakse nominaalruumala märja kasutusviisi jaoks.

5. Töö käik.

Kaalume tühja kolvi juhendi nr. 8 kohaselt. Järgnevalt täidame kolvi märkjooneni veega (mitte puudutada kolvi väljastpoolt märgade või määrdunud kätega!). Vee tase ja märkjoone vaheline erinevus ei tohiks ületada kümnendikku millimeetrit. Täpse reguleerimise juures võib vett välja võtta või juurde panna pipeti või klaaspulga abil. Kolvi suu peab olema kuiv. Nüüd kaalume veega täidetud kolvi, püüdes jällegi saavutada maksimaalset täpsust, mida võimaldavad kaal ja vihid. Kohe pärast kaalumist asetame kolvi termomeetri ja registreerime vee temperatuuri. Samal ajal registreerime laboratooriumi õhu temperatuuri ja rõhu. Nüüd kallame kolvi tühjaks, hoides teda kummuli 30 s ja kaalume märja kolvi. Pärast seda täidame kolvi uuesti, tuhjendame ta, hoiame kummuli 10 s ja kaalume. Kaalume veel viien-

dat korda, hoides enne seda kolbi kummuli 5 minutit (vahepeal pole vaja kolbi täita).

Pärast katse lõppu mõõdame nihikuga kolvi kaela sise-dia meetri märkjoone kohalt.

Arvutame välja järgnevad suurused:

1. Kolvi nominaalmaht kuiva kasutusviisi korral.
2. Mahu mõõtmise viga vedelikunivoo kõrguse hälbe korral 0,2 mm.
3. Kolvi nominaalmaht märja kasutusviisi korral.
4. Väljavalatud vedeliku mahu viga 10 s kummutamisaja korral.
5. Viga, mille me oleksime teinud vee tihedust täpselt 1 Mgm^{-3} lugedes.
6. Viga, mille me oleksime teinud õhu üleslüket ignoreerides.

6. Lisaküsimusi.

1. Kui kolvil on kaks märkjoont, üks kuiva, teine märja kasutusviisi jaoks, kumb neist on ülalpool?

2. Tõestada, et vee tõelist kaalu võib arvutada tavaliisel viisil, kuigi me oleme vett kaalunud koos klaaskolvi-ga. Lähtuda kaalukangi tasakaalu tingimusest (vt. juhend nr. 8).

7. Kirjandus.

1. Lang, J., Mets, G., Pae, A. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 84-98.

10. AJARELEE KALIIBRIMINE.

1. Tööülesanne.

Elektriliste sekundkellade ehitusega tutvumine. Lihtsaima ajarelee valmistamine ja kaliibrimine. Juhuslike viigade jaotusseaduse tundmaõppimine.

2. Töövahendid.

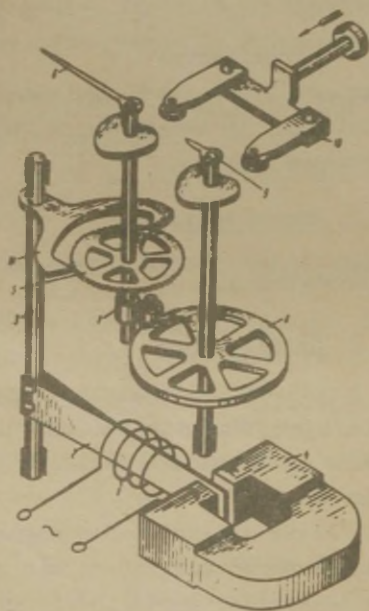
Sekundkell ПВ-53А või П-14М, ajarelee (stend), ühendusjuhtmed.

3. Sissejuhatus.

a) Sekundkell ПВ-53А on vibratsioonüsteemiga mõõteriist, mille juures aja mõõtmiseks kasutatakse 50 Hz vahelduvpinge perioodi konstantsust. Sekundkella töö põmõtet selgitab joonis 1.

Ergutusmähist 1 läbiva vahelduvvoolu magnetvälja toimel magneetub pehmeterasest keeleke 2, mis asub püsivmagneti pooluste vahel. Keeleke hakkab püsivmagneti magnetväljas võnkuma vahelduvvoolu sagedusega, pannes ühtlasi võlli 3 abil võnkuma ka ankru 11, mis keelekese täisvõnke aja jooksul annab hammasrattale 5 kaks tõuget. Hammasrattal on 100 hammast, ta teeb ühe täispöörde sekundis, liikudes hüpetega $1/100$ s ja pannes liikuma ka suure osuti 6. Friktsoon- (hõõrdumis-) ülekande 7, 8 abil pannakse liikuma väike osuti 9, mille pöörlemiskiirus on 10 korda väiksem suure osuti omast. Kangi 10 abil viiakse osuti enne mõõtmist nullasendisse.

Sekundkella toiteks võib kasutada 220-V või 110-V vahelduvpinget. Olemasolevat nelja klemmi tuleb kasutada vastavalt numbrilaua toodud skeemile. Pinge antakse tähekese-ga klemmi (esimene paremalt) ja klemmide "220" või "110" vahele vastavalt võrgupingele. Sealjuures läheb vool ergutusmähisesse läbi eeltakistite. Ergutusmähise enda otsad on välja toodud klemmide "K" ja "Σ" alla, neid klemme võib kasutada kella peatamiseks mähise lühistamise teel. Kell käivitatakse voolu lüütmise või lühise katkestamisega.



Joon. 1.

Numbrilaua maht on 10 s. Väike osuti näitab täissekundeid, suur aga kümnendikke ja sajandikke. Ajavahemike $t > 10$ s mõõtmiseks tuleb visuaalselt ära lugeda väikese osuti täisringide arv. Mõõteriista lubatud põhiviga on 0,03 s ajavahemike $0 < t \leq 3$ s korral ja 0,05 s $t > 3$ s korral. Kui tehakse mitu üksteisele järgnevat mõõtmist, nullistamata vahepeal osuteid, siis summaarse näidu viga on võrdne

üksikute näitude vigade summaga.

On selge, et kella näit sõltub võrdeliselt toitepinge sagedusest, seepärast võib nominaalsest erineva sageduse korral õige mõõtmistulemuse arvutada valemist

$$t' = t \frac{50}{f}, \quad (1)$$

kus t' - mõõdetav ajavahemik,

t - kella näit,

f - vahelduvpinge sagedus, mis mõõdetakse herts-meetriga.

b) Sünkroonsekundkell П-14М on sünkroonmootori ja elektromagnetilise siduriga varustatud ajamõõtja. Sünkroonmootori võlli pöörlemissagedus on rangelt võrdeline vahelduvpinge sagedusega. Mootor lülitatakse mõõtmiste ajaks pidevalt võrku (klemmid 1 ja 2 korpusel). Elektromagnetilise siduri ahelas (klemmid 3 ja 4) voolu lüümisega ühendatakse mootori võlliga hammasratasülekanne süsteem, mis paneb liikuma osutid. Nii mootori kui ka siduri toiteks kasutatakse vahelduvpinget 50 Hz, 220 V.

Kellal on 3 osutit, mis võimaldavad numbrilaua 10-minutilise mahu juures saada lugemeid 0,01 s täpsusega. Kella lubatud põhiviga nominaalsagedusel ongi 0,01 s. Parandatud mõõtmistulemuse arvutamiseks toitepinge 50 Hz-st erineva sageduse korral tuleb kasutada valemit (1).

Väiksema täpsusega mõõtmiste puhul ei mõõdetata võrgusagedust. Sel juhul tuleb mõlema kella korral mõõtmistulemuse t piirviga Δt arvutada valemist

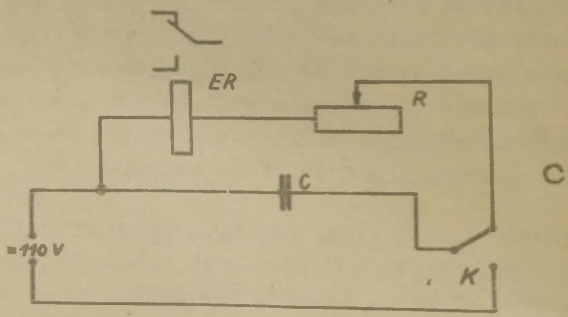
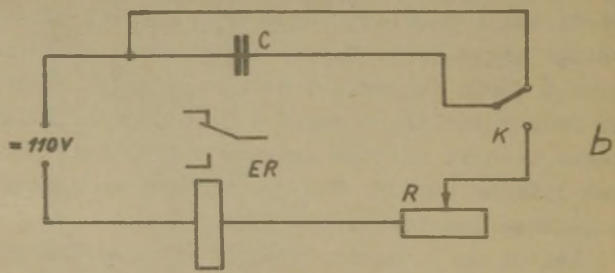
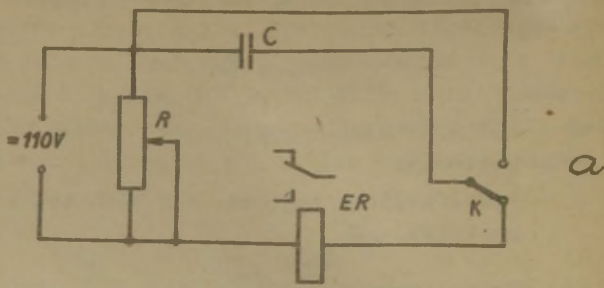
$$\Delta t = 0,01 t + \Delta^0 t, \quad (2)$$

kus $\Delta^0 t$ on kella lubatud põhiviga.

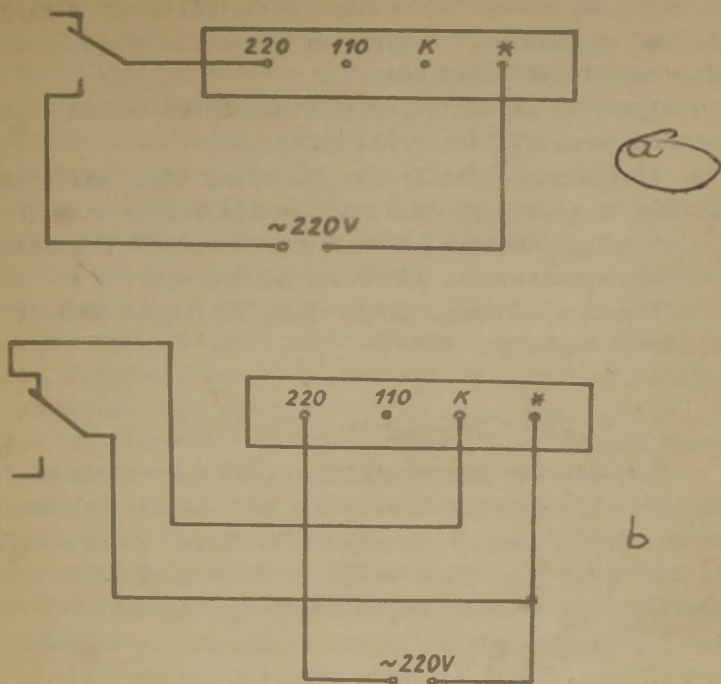
c) Lihtsaima ajarelee võib ehitada elektromagnetilisest releest ER, kondensaatorist C, takistist R ja alalispinge allikast (joon. 2).

Elektromagnetilise relee ankru liikumapanemiseks on

a)



Joon. 2.



Joon. 3.

tarvis läbi relee mähise lasta vool, mille tugevus ületab teatud minimaalse väärtuse. Nimetame selle relee käivitusvooluks I_k . Tõmbunud ankur vabaneb ja liigub vedru toimel algasendisse tagasi teatud väiksema voolutugevuse I_0 korral.

Kondensaatori laadumine üle takisti R pingeni U toimub kindla ajavahemiku jooksul, kusjuures pinge kondensaatoril kasvab ja vool läbi takisti kahaneb ajas eksponentsiaalse seaduse järgi. Kui laadida kondensaatorit läbi relee mähise nii, et algmomendil $I > I_k$, siis on relee ankur tõmbunud teatud ajavahemiku jooksul, kuni $I > I_0$. Relee

kontaktidega ühendatud vooluring (tarbija) on selle aja jooksul kas suletud või katkestatud, sõltuvalt sellest, milline on kasutatud kontaktide normaalasend (s.o. nende seis vabastatud ankrul korral).

Ajarelee ehitamisel võib kasutada ka laetud kondensaatori tühjenemist läbi relee mähise.

Ajavahemikku, mille jooksul relee ankur kirjeldatud skeemis on tõmbunud, saab reguleerida kolmel viisil:

- 1) pinge muutmise, milleni kondensaator laetakse;
- 2) kondensaatori mahtuvuse muutmise;
- 3) relee mähisega järjestikku lülitatud takisti takistuse muutmise.

4. Juhuslike vigade jaotusseadus.

Ülal kirjeldatud skeemi on võimalik kasutada ka juhuslike mõõtmisvigade jaotusseaduse uurimiseks. Selleks tehakse potentsiomeetri liugkontakti mingi kindla asendi korral suur hulk n (näit $n = 100$) mõõtmisi. Saadakse sama ajavahemiku t jaoks n mõõtmistulemust t_1 ja n tõenäolisimat viga Δt_1 :

$$\Delta t_1 = \bar{t} - t_1,$$

kus \bar{t} on mõõtarvude t_1 aritmeetiline keskmine.

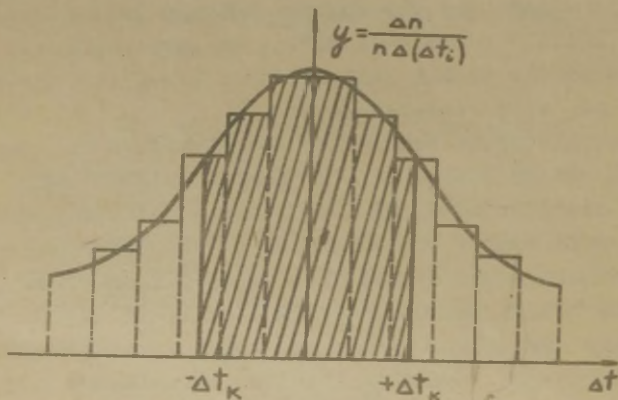
Kui tegemist on juhuslike vigadega, mis on põhjustatud väga paljudest väikese mõjuga teguritest, siis jaotub tõenäosematute vigade Δt_1 arv sõltuvalt Δt_1 suurusest normaalse jaotusseaduse järgi. Absoluutväärtuselt väiksemaid vigu on sel juhul kõige rohkem; mida suurem on vea absoluutväärtus, seda vähem selliseid vigu on. Vea suuruse ja vigade arvu sõltuvust näitav graafik on siis vigade arvu telje (y -telje) suhtes sümmeetriline kõver, nn. Gaussi kõver, mis kujult meenutab kellukest lõikes. Kui aga vigu põhjustavate tegurite seas on mõni teistest tunduvalt tugevama mõjuga, siis see põhjustab teatud kindla suurusega vigade arvu ülekaalu ja jaotusseadust iseloomustava kõvera kuju moondu.

Vigade arvu jaotusseaduse graafiku ehitamiseks tuleb mõista asjaolu, et katsetest leitud tõenäoselmad vead omavad ainult teatud diskreetseid väärtusi, ja see on vaid mõõteriista lõpliku täpsuse väljenduseks. Näiteks antud juhul erinevad üksikmõõtmiste tulemused üksteisest täisarvu sajandiksekundite võrra, seega esineb ka üksteisest minimaalselt ainult ühe sajandiku sekundi võrra erinevaid Δt_1 -sid. See aga ei tähenda, et vigade jaotusseadus on põhimõtteliselt diskreetne. Teostades sama arvu mõõtmisi samades tingimustes täpsema kellaga, saaksime teistsuguse suurusega vigu, kuid vigade arv vea suuruse küllalt laia vahemiku kohta oleks küllalt suure arvu mõõtmiste korral mõlemal juhul sama. Seepärast peabki jaotusseaduse graafikut ehitama mitte punktide, vaid vahemike kaupa.

Absoluutväärtuselt suurimale Δt_1 -le lähedane, temast veidi suurem arv jagatakse osadeks (umbes neljaks kuni seitsmeks), saadakse x -teljel (vea suuruse teljel) kummalgi pool 0-punkti vastav arv vahemikke (kokku seega umbes 8 - 14). Vahemiku suuruse valimisel tuleb silmas pidada, et vahemik oleks mõõtmistäpsusest (antud juhul 0,01 s) suurem ja et vahemike otspunktid ei langeks kokku katsetest leitud Δt_1 -de väärtustega. Leitakse kõigisse vahemikesse langevate vigade arv Δn (vigade esinemissagedused) ja arvutatakse suhtelised esinemissagedused $\frac{\Delta n}{n}$. y -teljele võiks nüüd kanda suuruse $\frac{\Delta n}{n}$; see suurus iseloomustab tõenäosust selleks, et üksikmõõtmise tulemuse viga, s.o. erinevus mõõdetava suuruse tõelisest väärtusest langeb just antud vahemikku. $\frac{\Delta n}{n}$ iseloomustab vahemikku tervikuna, seega saadakse siin trepikujuline graafik. Pidades silmas, et jaotusseadus on põhimõtteliselt pidev, võib treppjoone interpoleerida pidevaks kõveraks. See aga tähendab sisuliselt vahemiku laiuse vähendamist nullini ja siis kaotab ordinadi väärtus oma mõtte - nullilise pikkusega vahemikku ei saa langeda lõplik arv vigu. Seepärast kantakse y -teljele suurus

$$\frac{\Delta n}{n \Delta(\Delta t_1)},$$

kus $\Delta(\Delta t_1)$ on argumendi vahemiku laius. $\frac{\Delta n}{n\Delta(\Delta t_1)}$ näitab argumendi ühikulise pikkusega vahemikku langevate vigade arvu ja säilitab oma mõtte ka pideva kõvera korral. Ordinaadi selline valik lihtsustab ka abstsissitelje vahemikeks jaotamise protseduuri: vahemikud ei pea nüüd tingimata võrdsed olema; kui mõnede vahemike piirile satuvad juhuslikult katsest leitud vea väärtused, võib ainult seda piiri veidi nihutada.



Joon. 4.

Sellisel ehitatud treppjoone ehk histogrammi (joon. 4) ja abstsissitelje vaheline pindala omandab konkreetse tähenduse. Selle pindala saab arvutada üksikute astmete pindalade summana

$$S = \sum \frac{\Delta n}{n\Delta(\Delta t_1)} \cdot \Delta(\Delta t_1) = \sum \frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \sum \Delta n = \frac{n}{n} = 1.$$

On selge, et see pindala kujutab tõenäosust selleks, et üksikmõõtmise tulemuse viga langeks vahemikku $-\left|\Delta t_{i\max}\right|$ kuni $+\left|\Delta t_{i\max}\right|$. Sellepärast peab histogrammi järgi pideva kõvera ehitamisel jälgima, et kõveraalune pindala võrduks histogrammi aluse pindalaga: äralõigatud ja juurde-

lõigatud osade pindalad tuleb valida võimalikult võrdsetena. Pidev jaotuskõver läheneb aga teoreetiliselt mõlemas suunas asümptootiliselt abstsisssteljele, sellepärast on tema alune pindala igal lõplike mõõtmetega joonisel veidi väiksem kui 1.

Jaotuskõveralt on lihtne leida tõenäosust selleks, et üksikmõõtmise tulemuse vea absoluutväärtus ei ületaks teatud etteantud suurust Δt_k : selle tõenäosuse annab pindala, mis jääb x-telje, kõvera ja vertikaalsete sirgete $\Delta t = -\Delta t_k$ ja $\Delta t = +\Delta t_k$ vahele. Pideva kõvera aluse pindala praktilisel määramisel tuleb võtta ühikuks ristküliku pindala, mille külgedeks on x-teljel lõik, mis vastab ajavahemikule 1 s ja y-teljel lõik, mis vastab suuruse $\frac{\Delta n}{n \Delta(\Delta t_1)}$ väärtusele 1 (ühikutes s^{-1}). Pindalasad saab praktiliselt mõõta millimeeterpaberilt, seetõttu tuleb ka graafik tingimata ehitada millimeeterpaberil.

Normaaljaotuse korral valitakse juhuslike vigade suurus iseloomustavateks arvudeks üksikmõõtmise ruutviga

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta t_i)^2}{n-1}} \quad (1)$$

ja aritmeetilise keskmise ruutviga

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta t_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

Väga sageli kasutatakse neid suurusi juhuslike vigade iseloomustamiseks, ilma et oleks teada vigade jaotuskõvera kuju. Tõenäosus selleks, et üksikmõõtmise viga (s.o. antud mõõtmistulemuse erinevus mõõdetava suuruse tõelisest väärtusest) ei ületaks σ , on normaaljaotuse korral 0,68.

Määratud eksperimendist leitud jaotuskõveralt selle tõenäosuse, saab kaudselt otsustada, kas eksperimentaalse kõvera kuju on lähedane normaaljaotuse kõverale. Kui aga ehitada eksperimentaalse kõveraga samas teljestikus ka Gaussi kõver valemil

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta t)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

järgi, saab neid kõveraid ka otseselt võrrelda.

Mida tähendab aga σ_N ? See näitab, et 100 mõõtmise aritmeetilise keskmise kohta on loota tõenäosusega 0,68, et ta ei erine mõõdetava suuruse tõelisest väärtusest rohkem kui σ_N . Teiste sõnadega: kui teha palju selliseid 100-st mõõtmisest koosnevaid seeriaid, siis 68% nende seeriade keskmistest ei erine absoluutväärtuselt tõelisest väärtusest rohkem kui σ_N võrra. Kuna σ_N on \sqrt{n} korda väiksem kui σ , siis on selge, et aritmeetiline keskmine on palju paremaks lähenduseks tõelisele väärtusele kui üksikmõõtmise tulemus.

5. Töö käik.

1. Koostame juhendaja valikul ühe joonisel 2 toodud skeemidest. Tarbija vooluringi skeemi kaks varianti on toodud joonisel 3. Antud juhul on tarbijaks sekundkell. Ka tarbija vooluringi skeemi valib juhendaja. Sünkroonkel-la on võimalik vooluringi lülitada ainult ühel viisil.

Ajarelee ehitamiseks vajalikud detailid on asetatud ühisele alusele (stendile). Osa ühendusi on tehtud aluse all, kõigi olemasolevate ühenduste skeem on kujutatud alusel. Pikemate ajavahemike saamiseks kasutatakse suure mah-tuvusega elektrolüüt-kondensaatorit. Selle keskmisele klem-mile võib anda ainult positiivset potentsiaali korpuse suhtes, pingeallika (alaldi) positiivne poolus ongi ühen-datud kondensaatoriga juba stendi all. Pingejagajana (skeem 2a) ja reguleeritava takistina (skeemid 2b ja 2c) kasutatakse söepinnaga potentsiomeetrit. Kondensaatori laeme (skeem 2c) või tühjendame (skeemid 2a ja 2b) ümber-lüliti abil.

Kaliibrimisel määrame potentsiomeetri kupu asendite-le skaala ees vastavad relee ankru tõmbumise ajad vähemalt kolmel korral. Arvutame keskmised, ehitame kaliibrimise

graafiku, mis väljendab ankrude tõmbumise aega funktsioonina potentsiomeetri nupu asendist skaala ees.

2. Potentsiomeetri nupu selle asendi korral, kus tõmbumise aeg osutus maksimaalseks, teeme vähemalt 100 mõõtmist järjest. Arvutame aritmeetilise keskmise, leiame tõenäoseimad vead, ehitame vigade jaotuskõvera. Leiame tõenäosuse selleks, et üksikmõõtmise viga ei ületaks σ .

3. Samas teljestikus ehitame veel Gaussi kõverad, mis kujutaksid üksikmõõtmiste tulemuste vigade ja seeriaste aritmeetiliste keskmiste vigade (s.t. tõelisest väärtusest erinevuste) jaotumist. Viimasel juhul tuleb valemis (3) σ asendada σ_N -ga.

6. Lisaküsimusi.

1. Tõestada, et pindala jaotuskõvera, x-telje ja vertikaalsete sirgete $\Delta t = - \Delta t_k$ ning $\Delta t = + \Delta t_k$ vahel annab tõenäosuse selleks, et üksiku mõõtmistulemuse vead absoluutväärtus ei ületaks $|\Delta t_k|$.

2. Miks ei saa eelmises küsimuses märgitud pindala mõõtmisel pideva kõvera korral valida ühikuks kõvera ja x-telje vahelist kogupindala?

3. Miks ei või elektrolüütikondensaatori keskmisele klemmile anda korpuse suhtes negatiivset potentsiaali?

4. Kus saab ajareleed kasutada?

7. Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed I. TRÜ rotaprint, Tartu, 1967.
2. P. Prüller, H. Tammet. Mõõtmisvigade arvutamine. TRÜ rotaprint, Tartu, 1962.

11. LIIKUMISSEADUSTE KONTROLLIMINE ATWOODI MASINAGA

1. Tööülesanne.

Ühtlaselt kiireneval liikumisel läbitud tee pikkuse ja kiiruse seaduste ning Newtoni II seaduse kontrollimine.

2. Töövahendid.

Atwoodi masin koos platvormi ja rõngasplatvormiga, põhi- ja lisakoormustega, elektromagneti ja lülituslanaga; sekundkell.

3. Atwoodi masina konstruktsioon ja teooria.

Masina põhiosadeks on seina külge kinnitatud vertikaalne metallvarb A (joon. 1), millele on kantud sentimeeterjaotistega skaala, ja tema ülemisse otsa kinnitatud kerge alumiiniumplokk 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'. Koormuse C' alumine osa on pehmeterasest, 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 rõngasplatvorm F ja platvorm G, nii et nad on nihutatavad vertikaalsihis.

Kui koormusele C asetada lisakoormus massiga m_1 , siis hakkab kogu süsteem ühtlaselt kiirenevalt liikuma. Süsteemi kiirenduse võib arvutada. Jättes arvestamata

niidi kaalu ja hõõrdumisjõud, mõjub koormustele C ja C' ainult raskusjõud ja niidi tõmme. Kui lugeda plekk kaalutuks, siis niidi pinge on ühtlane kogu süsteemi ulatuses. Kui nüüd veel lugeda niit venimatuks, siis hakkavad mõlemad koormused liikuma suuruselt võrdselt, märgilt vastupidiste kiirendustega a. Newtoni II seaduse alusel võib kirjutada võrrandid mõlema koormuse jaoks:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_1) a &= (m + m_1) g - T \\ -ma &= mg - T, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ja kus T - niidi pinge, g - raskuskiirendus. Süsteemi lahendamisel saadakse:

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

$$T = gm \frac{1 + \frac{m_1}{m}}{1 + \frac{m_1}{2m}} \quad (3)$$

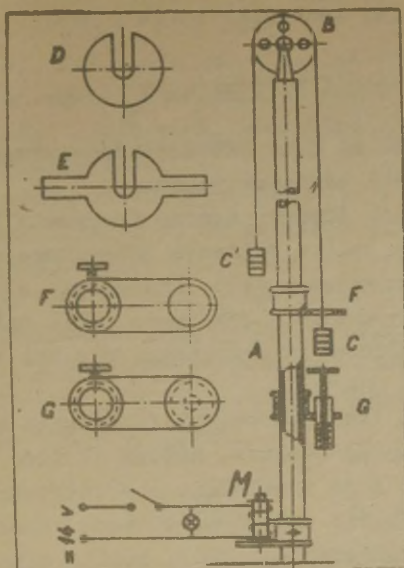
Kiirenduse täpsemal määramisel tuleb arvestada ka ploki massi. Niidi pinge kummalgi pool plokki on sel juhul erinev, süsteemi (1) tuleb juurde ploki pöördliikumist arvestav võrrand. Lugeses niidi ikka kaalutuks ja venimatuks, saadakse

$$\left. \begin{aligned} (m + m_1) a_1 &= (m + m_1) g - T_2 \\ -ma_1 &= mg - T_1 \\ I \varepsilon &= \alpha m_0 r^2 \varepsilon = (T_2 - T_1) r, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

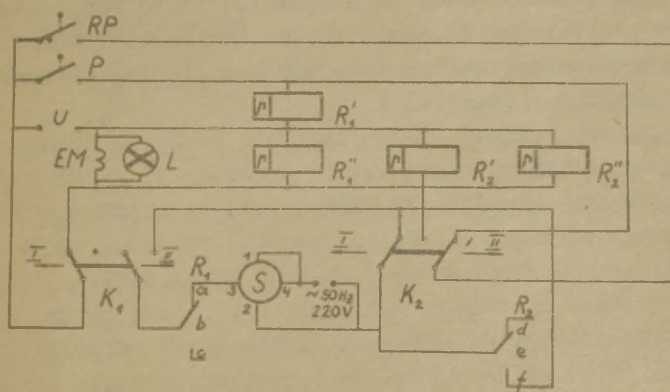
kus $I = \alpha m_0 r^2$ on ploki inertsimoment, m_0 - ploki mass, r - ploki raadius, ε - nurkkiirendus, α - ploki massi jaotusest olenev konstant.

Oletades, et niit ploki pinnal ei libise, on seos ploki nurkkiirenduse ja süsteemi joonkiirenduse vahel:

$$a_1 = \varepsilon r.$$



Joon. 1.



Joon. 2.

Süsteemi (4) lahendiks tuleb nüüd:

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

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

Seega hakkab Atwoodi masina koormuste süsteem liikuma kiirendusega, mille esimeses lähenduses määravad ainult põhi- ja lisakoormuse massid, kusjuures $a < g$. Kui liikumise ajal kõrvaldada lisakoormus, siis hakkab süsteem edasi liikuma ühtlaselt kiirusega, mis tal oli lisakoormuse kõrvaldamise momendil.

Eeltoodust lähtudes võib I lähenduses kontrollida tööülesandes nimetatud seadusi, mõttes läbitud teepikkusi skaalalt varval A ja ajavahemikke elektrisekundkellaga П-14М. (Sekundkella ehitusega tutvuda käesoleva kogumiku juhendi nr. 10 järgi.)

Käesolevas töös on kolm ajamõõtmise operatsiooni - tuleb mõõta raskuse C langemise aeg 1) algasendist kuni platvormini, 2) algasendist kuni rõngasplatvormini (koormus liigub mõlemal juhul ebäühtlaselt) ja 3) rõngasplatvormist platvormini (koormus liigub ühtlaselt). Kõiki kolme operatsiooni võimaldab teostada spetsiaalne releeskeem, mis on kujutatud joonisel 2.

Joonisel 2 antud olukorras (tumbler K_1 on asendis I, K_2 - asendis II) on skeem valmis teostama 1) ja 2) operatsiooni. Elektromagnetit EM läbib vool, ta hoiab koormust C; signaallamp L põleb. Polariseeritud relee R_1 mähist R_1'' läbib vool, tema ankur b on koos kontaktiga a. Polariseeritud relee R_2 mähist R_2'' läbib vool, tema ankur e on koos kontaktiga d. (Skeemis on kasutatud polariseeritud releesid ПП-4, mille ankrul on 2 püsivat asendit. Ankur on alati koos ühega kontaktidest, kuni mähist läbiiva voolu poolt tekitatud magnetväli ei sunni teda teise asendisse üle minema.)

Tumblerümbeslüüti K_1 abil katkestatakse vool elekt-

romagnetis ja releede mähistes R_1'' ning R_2'' (asend II), samaaegselt käivitatakse sekundkell S (lülitatakse pingeklemmidele 3, 4). Kui koormus C jõuab platvormini või koormus E rõngasplatvormini, ühendatakse vastavalt kontaktid P või RP. Mähist R_1' läbib vool, kontaktid a ja b lahutatakse ja kell fikseerib aja.

Kolmanda mõõteoperatsiooni jaoks tuleb lülitada tumbler K_2 asendisse I. Nüüd on sekundkella siduri ahel katkestatud ka pärast K_1 ümberlülitamist (s.t. pärast koormuse C vabastamist) ja ta suletakse alles siis, kui lisakoormus E jõuab rõngasplatvormini ning ühendab kontakti RP - mähist R_2' läbib vool, ankur e ühendatakse kontaktiga f ja sekundkella ahel suletakse. Viimase katkestamine toimub analoogiliselt 1) ja 2) operatsiooniga.

4. Töö käik.

Kogu töö ajal silmas pidada järgmist:

1. Voolu elektromagnetis võib lülitada ainult vahetult töö ajaks. Tööd lõpetades jälgida, et signaallamp oleks kustunud!

2. Lisakoormusi asetades jälgida, et ülekoormus ühel pool ei ületaks 40 G!

1. L ä b i t u d t e e s e a d u s e $s = \frac{1}{2} at^2$
k o n t r o l l. Koormusele C asetame teatud hulga lisakoormusi D, kinnitame need ülemise mutriga, lülitame voolu elektromagnetis ahelas (signaallamp põleb!), si et elektromagnet hoiab koormust C'. Süsteem on nüüd algasendis. Asetame platvormi G mingile kindlale (arvutuste hõlbustamiseks võimalikult ümmarguse arvuga väljenduvale) kaugusele s koormuse C alumisest äärest. Paneme süsteemi liikuma voolu katkestamisega elektromagnetis, mõõdame aja t liikumise alguse momendist kuni koormuse C pörkeni platvormiga G. Mõõtmised teeme vähemalt kolmel kaugusel s, mõõtes igal kaugusel aja t vähemalt kolm korda. Andmed kanname tabelisse.

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

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

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

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

2. Kiiruse seaduse $v = at$ kontroll. Koormusele C asetame teatud arvu lisakoormusi E . Need tuleb asetada ülemise mutri peale ja mitte kinnitada. Seame süsteemi algasendisse. Teatud kaugusele s C -st asetame rõngasplatvormi F lisakoormuste äravõtmiseks liikumisel, sellest kaugusele s' platvormi G . Mõõdame C kiireneva liikumise aja t kuni rõngasplatvormini ja samuti ühtlase liikumise aja t' platvormide vahel (mõlemad vähemalt kolmel korral); arvutame keskmised \bar{t} ja \bar{t}' . Arvutame süsteemi liikumise kiiruse lisakoormuse äravõtmise momendil $v = \frac{s'}{\bar{t}'}$. Muudame kiirust v , muutes kaugust s (samuti muudugi s') rõngasplatvormi nihutamisega, vähemalt kolmel korral. Siinjuures peab õigesti valima s ja s' vahekorra ja oskama seda põhjendada, lähtudes tulemuste maksimaalse täpsuse nõudest. Tulemused kanname tabelisse:

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

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

Kuna sama m_1 korral kiirendus on konstantne, peab katsevõlgade piires kehtima:

$$a = \frac{v_1}{t_1} = \frac{v_2}{t_2} = \dots = \frac{v_n}{t_n} .$$

3. Newtoni II seaduse kontroll: $F = Ma$. Asetame lisaraskusi mõlemale poole, kuid nii, et $m_{1C} > m_{1C}'$. Edasi jätame kogu süsteemi massi M muutumatuks, kuid muudame liikumapanevat jõudu, tõstes lisaraskusi põhikoormuselt C' üle põhikoormusele C . Seega muutub ka süsteemi kiirendus. Saame

$$F_1 = Ma_1, \quad F_2 = Ma_2.$$

Jagame

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{s_1 \bar{t}_2^2}{s_2 \bar{t}_1^2} . \quad (6)$$

Mõõtmised teostame nagu tee seaduse kontrollimise korralgi. Võtame kummagi jõu korral vähemalt kolm kaugust, igal kaugusel mõõdame aja vähemalt kolmel korral. Andmed kanname tabelisse.

M =

Katse nr.	Lisamassid ja jõud	s_1	t_1	\bar{t}_1
1.	$m_{1C} = \dots$	....	⋮	....
2.	$m_{1C}' =$			
3.	$F_1 =$			
		s_2	t_2	\bar{t}_2
4.	$m_{2C} = \dots$	....	⋮	....
5.	$m_{2C}' = \dots$			
6.	$F_2 =$			

Saadud andmetest saame arvutada 3 suhet $\frac{s_1 \bar{t}_2^2}{s_2 \bar{t}_1^2}$, mis kõik peavad katsevigade piires võrduma suhtega $\frac{F_1}{F_2}$.

5. Lisaülesandeid.

1. Tutvuda Atwoodi masina ploki telje laagrite ehitusega ja põhjendada, miks sellised laagrid kindlustavad minimaalse hõõrdumise.

2. Lahendada süsteem (4) lõpuni, leides niidi pinged T_1 ja T_2 .

3. Võrrelda saadud kiirendusi (p. 1 ja 2) valemist (2) arvutatutega (koormise hoidja mass $(64,9 \pm 0,1)g$).

6. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 51-54.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.1. М., "Наука", 1966, стр. 12-27.

12. KUHLI KIIRUSE MÄÄRAMINE BALLISTILISEL MEETODIL.

Sissejuhatus.

Kiiresti liikuvate väikese massiga esemete (näit. püsi-
sikuul) kiiruse määramiseks saab kasutada ühe võimaliku
meetodina ballistilist meetodit. Uuritaval kehal lastakse
põrkuda teise suure massiga kehaga. See kujutab endast ta-
valiselt pendlit, s.o. pöörlemistelge omavat süsteemi, mis
võib võnkuda selle telje ümber. Masside suurest erinevusest
tingituna kehtib võrratus

$$\tau \ll T,$$

kus τ on põrke kestus, s.o. aeg, mille jooksul uuritav
keha mõjutab pendlit jõuga, T on pendli võnkeperiood. Sel-
lise võrratuse kehtivus võimaldab pendli liikumist vaadel-
da kahes osas:

1) Kui $t \leq \tau$, pole pendel veel oluliselt liikunud
tasakaaluasendist, taastav jõud on tühiselt väike ja süs-
teemi pendel - uuritav keha võib vaadelda isoleerituna.
Sellele süsteemile võib rakendada liikumise hulga, pöörle-
mise hulga ja energia jäävuse seadusi.

2) Kui $t > \tau$, on põrkejõudude mõju lakanud ja pendel
liigub ainult taastava jõu toimetel - s.o. teostab omavõnku-
misi. Siin võib süsteemile rakendada omavõnkumiste võrran-
dit.

Antud töös on uuritavaks kehaks õhupüssi kuul. Õhupüssi vinnastamisel surutakse kokku vedru tihedalt silindris liikuva kolvi taga. Kuul asetatakse randa tagantpoolt. Kui vabastada päästik, paneb vedru kolvi järsult liikuma; kolvi all tekib suur õhu ülerõhk, mis lükkab kuuli rauast välja.

Kuuli kiirus määratakse antud töös kaht erinevat pendlit kasutades.

A. Ballistiline pendel.

1. Tööülesanne.

Ballistilise pendli ehitusega tutvumine ja kuuli lennakiiruse katseline määramine.

2. Töövahendid.

Ballistiline pendel, õhupüssi, kuulid, mõõtskaala, analüütilised kaalud, tehnilised kaalud, vihid, metallmõõtlint.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Ballistiline pendel on pikkade ja kergete niitide otsa riputatud massiivne keha (käesolevas töös plastiliiniga osaliselt täidetud silinder). Pendlit tulistatakse horisontaalsis. Kui kuul algkiirusega V_k ja massiga m tungib pendlisse massiga M , siis saab mitteelastsel põrkel tekkinud süsteemi $M + m$ kiiruse V . Pendel pöörduv ning ta raskuskese tõuseb teatud kõrguse h võrra. Vastavalt sissejuhatuses öeldule võib süsteemile kuul - pendel rakendada pöörlemishulga jäävuse seadust. Saadakse

$$mV_k r = I \omega, \quad (1)$$

kus r on süsteemi raskuskeskme kaugus pöörlemisteljest, $I = (M + m) r^2$ - süsteemi inertsimoment pöörlemistelje suhtes,

ω - süsteemi kõrvallekaldumise nurkkiirus põrke lõpul.

Võrrandi (1) teisendamisel järeldub

$$mV_k r = (M + m) r^2 \frac{V}{R}$$

või

$$mV_k = (M + m) V. \quad (2)$$

Seega näitab arutus, et antud juhul on süsteemi kuulpendel kohta kehtiv ka liikumishulga jäävuse seadus (2).

Kui aga I pole nii lihtsalt arvatav, siis tuleb kasutada ikka pöörlemishulga jäävuse seadust (1).

Kui massid M ja m ning kiirus V on määratud katseliselt, siis V_k saab arvutada valemi (2) alusel.

Kiiruse V võib leida järgmiselt. Pärast põrget pöördub pendel ümber horisontaaltelje, kusjuures pendli raskuskese tõuseb kõrguse h võrra. Energia jäävuse seaduse kohaselt

$$\frac{M + m}{2} v^2 = (M + m) gh,$$

millest

$$v = \sqrt{2 gh}. \quad (3)$$

h saab arvutada, mõõtes pendli kõrvalekallet piki horisontaali (joon. 1). Liikuva süsteemi raskuskeskme kaugus pendli kinnituspunktist loetakse antuks ning ligikaudu võrdsiks niidi pikkusega. Joonisest 1 järeldub, et

$$h = L - L \cos \alpha = 2 L \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

kus α tähistab pendli kõrvalekalde nurka tasakaaluasendist. α saab määrata tingimusest

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{s}{R}, \quad (5)$$

kus s on viiserniidi nihe horisontaalsihis, $R = L + a$ - nimetatud horisontaali kaugus pendli pöörlemisteljest.

Valemite (2), (3) ja (4) põhjal leitakse:

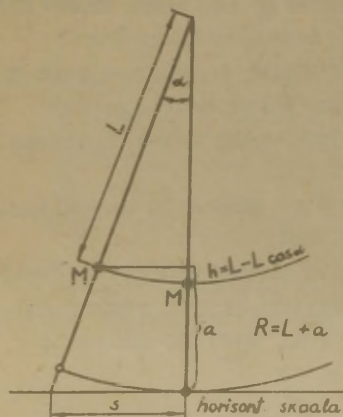
$$V_k = 2 \frac{M + m}{m} \sqrt{gL} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Lugedes

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$$

saadakse kuuli kiiruse arvutamiseks lõppvelem

$$V_k = \frac{(M + m) s}{mR} \sqrt{gL}. \quad (6)$$



Joon. 1.

oleks horisontaalne ning viiserniit vertikaalne. Asetame viiseri juurde peegliga millimeeterskaala; viiser peab asuma skaala ja peegli vahel (miks?). Skaala peab olema viiseri teljega paralleelne.

3. Laeme õhupüssi, sihime hoolikalt silindri keskpunkti (püssirana telg ja silindri telg peavad kokku langema).

4. Kui teine isik (abiline) vabastab pööstiku, registreerime viiserniidi nihke s skaalal, vältides parallakti-list viga (kuidas?). Kordame katsed vähemalt viie kuuliga, arvutame keskmise nihke s_k ja kuulide keskmise kiiruse V_k koos katseveega. Pikkused L ja R mõõdame metallmõõtlindiga.

5. Täiendavaid küsimusi.

1. Leida teoreetiliselt, kas elastse pörke korral kuuli ja pendli vahel viiserniidi nihe tuleks suurem või väiksem kui antud juhul.

B. Ballistiline pöördpendel.

1. Tööülesanne.

Määrata kuuli kiirus ballistilise pöördpendli abil.

2. Töövahendid.

Ballistiline pöördpendel, valgusti, skaala, õhupüss, sekundkell, mõõtjoonlaud, analüütilised kaalud, vihid.

3. Teooria.

Kuul, tabades pendlit (vt. riista kirjeldus), paneb viimase pöörduma ümber oma vertikaaltelje. Jättes kõrvalle hõõrdejõudude momendi, võib kasutada jäävuse seadusi (vt. sissejuhatus). Pidades pörget täiesti mitteelastseks, võib pöörlemishulga jäävuse seaduse alusel kirjutada (enne pörget ja vahetult pärast pörkimisel tekkivate jõudude mõju lakkamist, s.o. aja τ möödumisel pörke algusest):

$$mvL = (I_1 + mL^2) \omega, \quad (1)$$

kus m - kuuli mass,

v - kuuli kiirus,

L - kaugus pöörlemisteljest pörkekohani,

ω - pendli nurkkiirus,

I_1 - pendli inertsimoment.

Mehhaanilise energia jäävuse seadusest (pärast pörget) järeldub:

$$\frac{1}{2} (I_1 + mL^2) \omega^2 = \frac{1}{2} D \varphi^2, \quad (2)$$

kus φ - pendli maksimaalne pöördnurk esimesel võnkel,

D - elastsete jõudude momendi konstant.

Neist võrrandeist saab leida v :

$$v^2 = \frac{D\varphi^2}{m^2L^2} (I_1 + mL^2). \quad (3)$$

Et kuuli inertsimoment mL^2 on palju kordi väiksem kui I_1 , siis võrrand (3) avaldub kujul:

$$v^2 = \frac{D\varphi^2 \cdot I_1}{m^2L^2}. \quad (4)$$

Ballistilise pendli liikumise diferentsiaalvõrrand pärast pörke lõppu, s.t. kui aeg $t > \tau$, on:

$$I_1 \cdot \ddot{\alpha} = -D\alpha,$$

kus α - pendli pöördenurk,
 $\ddot{\alpha}$ - nurkkiirendus.

Selle võrrandi lahendamine annab võnkeperioodi T_1 jaoks avaldise

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{D}}. \quad (5)$$

Suurused D ja I_1 elimineeritakse järgmiselt.
 Muudetakse pendli inertsimomenti, siis

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{D}}, \quad (6)$$

$$I_1 - I_2 = \Delta I. \quad (7)$$

Siin T_2 on pendli võnkeperiood uue inertsimomendi I_2 puhul,

ΔI - inertsimomentide vahe.

Võrdustest (5) ja (6) saame

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

Võrdustest (7) ja (8)

$$I_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \cdot \Delta I. \quad (9)$$

Võrdustest (4), (5) ja (9)

$$v = \frac{2\pi p}{mL} \cdot \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \cdot \Delta I. \quad (10)$$

Inertsimomendi muudetakse lisaraskuste (5 ja 11, joon. 1) nihutamisega. Lugesed need raskused masspunktideks, võib avaldada pendli inertsimomendi

$$I_1 = I_0 + 2 MR_1^2, \quad (11)$$

ja

$$I_2 = I_0 + 2 MR_2^2, \quad (12)$$

kus I_0 on pendli inertsimoment ilma lisaraskusteta,

I_1 - inertsimoment, kui mõlemad koormused on kaugusel R_1 pöörlemisteljest,

I_2 - inertsimoment, kui mõlemad koormused on kaugusel R_2 teljest,

M - ühe koormuse mass.

Võrranditest (11) ja (12) saame

$$I_1 - I_2 = \Delta I = 2 M (R_1^2 - R_2^2). \quad (13)$$

Võrranditest (10) ja (13) tuleb otsitava kiiruse avaldis

$$v = \frac{4\pi p M}{mL} \cdot \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \cdot (R_1^2 - R_2^2). \quad (14)$$

4. Riista kirjeldus.

Katseseadme põhisadeks on torsioonpendel, õhupüü ja valgusti koos skaalaga.

Pendel (joon.1) koosneb vertikaalsele varvale (3) muhvi (7) abil kinnitatud kahest rõhtvarvast (4 ja 10). Rõhtvarbadel on massiivsed metallsilindrid (5 ja 11), mil-

le nihutamisega saab muuta pendli inertsimomenti.

Kummagi rõhtvarva otsas on plastiliiniga täidetud kausike (6 ja 12), mis on samuti mööda varba nihutatavad.

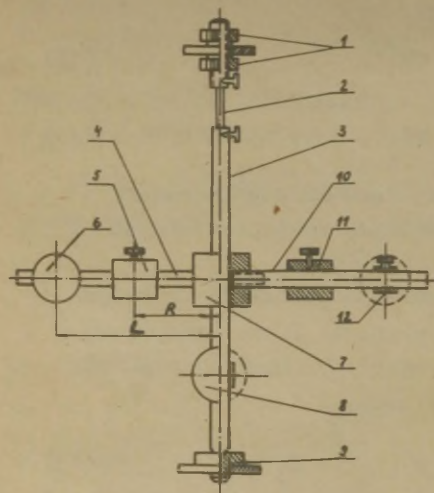
Pendli pöördenurga mõõtmiseks on püstvarvale (3) kinnitatud peegel (8). Eri statiivil asuvast valgustist lähtuv valguskiir peegeldub peeglit ja tekitab valgustiga samal statiivil asuval skaalal valguslaigu. Pendli pöördudes libiseb valguslaik mööda skaalat.

Pöördenurk φ määratakse valemist

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{l},$$

kus l - kaugus peeglist kuni skaalani (mööda rist-sirget); s - laigu nihke suurus skaalal. Seda valemit võib kasutada, kui $\varphi \leq 5^\circ \dots 6^\circ$ (siis võib lugeda $\varphi \approx \tan \varphi$).

Pendel on traadi (2) abil kinnitatud kronsteinile, püstvarda alumine ots toetub laagrisse (9). Varda pöördumisel deformeerub traat ja tekib pööret tasakaalustav elastsete jõudude moment. Vabastanud kinnitusmutri (1), saab pendlit pöörata



Joon. 1.

ta ümber vertikaaltelje ja seada ta vajalikku asendisse.

Pneumaatiline püss on kinnitatud massiivsele jalale.

Valgusti lampi köetakse 6 V pingega. Seade peab olema fokuseeritud, nii et skaalal oleva valguslaigu keskel oleks selgesti näha peenike joon - niidi kujutis, mille järgi mõdetaksegi laigu nihke suurst.

5. Töö käik.

1. Kaalume analüütilistel kaaludel 6 kuuli. Lisakoormiste mass M on antud katseriista konstandina.

2. Seame pendli eksperimendiks korda. Me võime suvaliselt valida plastiliinikausikeste kauguse L ja lisakoormuste kaugused R_1 ja R_2 pöörlemisteljest. Valida tuleb need kaugused aga nii, et katsetulemustest valemi (14) järgi arvutatud kiiruse viga oleks minimaalne. Ebaõigesti planeeritud katse tulemusi ei arvestata.

Valinud kausikeste ja lisakoormuste asendid, mõõdame mõõdtjoonlauaga kaugused L ja R_1 (ühtlasi seame need kaugused mõlemal pool pöörlemistelge mõõtmistäpsuse piires võrdseiks). Reguleerime valgusti ja skaala nii, et valguslaik oleks skaala keskel, skaalale langev valguskiir oleks sellega risti ja et valgusti kondensorlätse pinnal oleva joone kujutis oleks skaalal terav (viiserjoon). Mõõdtjoonlauaga määrame peegli kauguse l skaalast. Püssiraua suu peab asuma vähemalt 60 cm kaugusel kausikesest, et õhujuga viimast ei mõjutaks.

3. Pendli maksimaalse nurkhälbe φ ja võnkeperioodid T_1 ning T_2 määrame vähemalt kolmel korral, arvutame keskmised. Katsete järjekorra määramisel (millal paigutada ümber lisakoormised kaugusele R_2) tuleb lähtuda minimaalse ajakulu printsipibist.

4. Arvutame kuuli kiiruse ja tema piirvea.

5. Võrratuse $\tau \ll T$ kehtivuse hindamiseks mõõdame τ ligikaudselt. Selleks mõõdame kuuli sissetungimise sügavuse d plastiliinisse, arvutame plastiliinis liikumise keskmise kiiruse $\bar{v} = \frac{v}{2}$ ja põrkeaja τ :

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

6. Lisaküsimusi.

1. Oletame, et plastiliinikiht oli väga õhuke, kuul tungis kausi põhjani, pörkus veidi tagasi, kuid ei väljunud plastiliinikihist. Kas muutub sellest katse tulemus?

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр.129-132.
2. С. П. Средков. Механика. М., "Наука", 1965, стр.119-120, 164-180.
3. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.1. М., "Наука", 1966, стр. 61-64, 74-82, 86-89, 125-130.

13. RISTHOORATTA INERTSIMOMENDI MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Risthooratta inertsimomendi katseline määramine ristvarbadele kinnitatud kehade erinevatel kaugustel pöörlemiseljust dünaamilisel meetodil; tühja risthooratta inertsimomendi arvutamine ja dünaamika põhiseaduse kontrollimine.

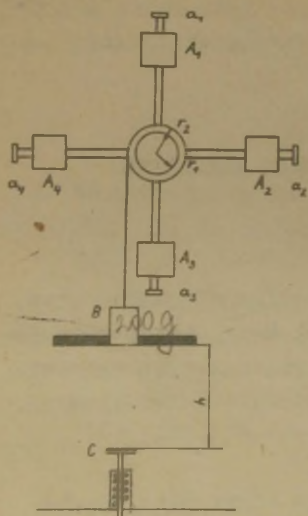
2. Töövahendid.

Risthooratas ühes lisakehadega ja nõõri otsa riputatud raskusega hooratta pöörlema panemiseks, sekundkell, nurklaud, nihik.

3. Teoreetilised alused.

Risthooratas (joon. 1) koosneb teljest, sellele kinnitatud kahest erinevate diameetritega plokist ja ristvarbadest, millele on kinnitatud võrdsete massidega ^{192,0m} m_1 silindrilised kehad A_1 , A_2 , A_3 ja A_4 , mis on varbadel nihutatavad. Kehade fikseerimiseks kindlale kaugusele teljest on varbadel iga cm tagant tehtud süvendid. Teljele on kinnitatud nõõr, mida võib mähkida mõlema ploki soonde. Nõõri otsa on kinnitatud koormis B massiga m . Risthooratta telg on kinnitatud kronsteinil olevates laagrites. Kronsteinile on kinnitatud veel fiksaator-päästik hooratta fikseerimiseks teatud asendis, kui nõõr on ploki keritud ja raskus üles tõstetud, ning tema vabastamiseks. Hooratta all on seinakülge kinnitatud amortisaator-platvorm C keha B pidurdami-

seks. Ristvarbade otstel on kruvid a_1, \dots, a_4 juhuslikult lahtipääsenud kehade A_1 pidurdamiseks.



Joon. 1.

Risthooratta inertsimomendi leidmiseks kasutatakse dünaamika põhivõrrandit pöörliikumise jaoks. Olgu keha B tõstatatud kõrgusele h platvormist C (seinale oleva musta joone alumine serv). Et kõik kehad A_1, \dots, A_4 on kinnitatud võrdsetele kaugustele teljest, siis on hooratas ise indiferentses tasakaalus ja ainsaks mõjuvaks jõuks jääb keha B raskus mg . Selle mõjul hakkab keha B langetama, kuid kiirendusega $a < g$, sest ta paneb pöörlema ka hooratta. Hoorattale mõjub niidi tõmme T , selle moment on Tr (r - ploki raadius, millele niit on mähitud). Dünaamika põhivõrrandist saame:

$$Tr = I\varepsilon. \quad (1)$$

T leitakse, rakendades kehale B dünaamika põhivõrrandit kulgliikumise jaoks:

$$mg - T = ma,$$

$$T = mg - ma,$$

$$T = m(g - a).$$

Asendanud ε valemist $\varepsilon = \frac{a}{r}$, saadakse

$$m(g - a)r = \frac{Ia}{r}.$$

Siit avaldatakse inertsimoment:

$$I = mr^2 \frac{g-a}{a}. \quad (2)$$

Sellest võib kergesti välja lugeda, et mida suurem on hooratta inertsimoment, seda väiksem on raskuse B langemise kiirendus. Kiirendust on lihtne leida raskuse B langemise aja t ja kõrguse h kaudu:

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Asendanud selle valemisse (2), saadakse lõplik avaldis risthooratta inertsimomendi jaoks, võttes veel $r = \frac{d}{2}$, kus d - ketta diameeter:

$$I = \frac{md^2}{8h} (gt^2 - 2h). \quad (3)$$

Tühja hooratta (ilma lisakehadeta A_1, \dots, A_4) inertsimomendi I_0 arvutamiseks kasutatakse süsteemi inertsimomendi avaldist, mille põhjal

$$I_1 = I_0 + 4m_1 R_1^2, \quad (4)$$

kus I_1 - kogu süsteemi inertsimoment, kui kõik lisakehad on teljest kaugusel R_1 .

Risthoorattaga saab kontrollida mehhaanika põhiseaduse kehtivust pöördliikumise korral. Selleks keritakse nõör üks kord ühe, teine kord teise ploki peale, muutes niiviisi pööravat momenti, mõõdetakse langemise ajad t_1 ja t_2 . Lähtudes valemist (1) on võimalik tuletada seos

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_2}{t_1} \sqrt{\frac{1 - \frac{a_2}{g}}{1 - \frac{a_1}{g}}}, \quad (5)$$

kus d_1 ja d_2 on plokkide läbimõõdud, a_1 ja a_2 aga raskuse B langemise kiirendused vastavalt esimesel ja teisel juhul. Kui $a_1 \ll g$ ja $a_2 \ll g$, lihtsustub valem 5:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_2}{t_1}. \quad (6)$$

Võrdus (5) peab kehtima katsevigade piires. Kas aga võrdus (6) ka peab kehtima, seda tuleb iga kord eraldi otsustada

katsevigade ja võrrandi lihtsustamisest tingitud metoodilise vea võrdlemise teel.

4. Töö käik.

Paigutame kehad $A_1 \dots A_n$ teljele kõige lähemale. Kontrollime risthooratta indiferentset tasakaalu, tõstes kõega üles raskuse B. Kui tasakaal on veidi rikutud, parandame seda. Kontrolli teostame alati pärast lisakehade nihutamist.

Risthooratas tuleb tasakaalustada tema kahe asendi korral - kummalgi juhul on üks varvapaaridest horisontaalne, teine vertikaalne. Tasakaalu reguleerimiseks kasutame neid samu kehi A_1, \dots, A_n , pöörates kummalgi juhul üht neist varval 90° võrra ja nihutades veidi. Sealjuures ei ole nihe kehade ühegi asendi korral suurem kui 1 mm, seega kauguste R_1 veaks võtame kõikjal ± 1 mm.

Mõhime nõõri ühele plokkidest (läbimõõt d_1), kuni raskuse B põhjapind on seinale tõmmatud musta joone alumise ääre kõrgusel. Keha B kõrguse täpsaks seadmiseks kasutame nurklauda. Fikseerime hooratta.

Vabastame nüüd hooratta, tõmmates päästiku niidist. Mõõdame keha B langemise aja kuni pörkeni platvormiga C. Kordame katsed 5 korda. Selliseid mõõtmisseeriaid teeme vähemalt 5, kusjuures lisakehasid nihutame igakord teljest kaugemale. 5-ndas seerias olgu kehad varbade otstes.

Mõõdame ploki diameetri nihkkaliibriga. Mõõdame ühe korra soone põhjast, siis kerime nõõri plokile ja mõõdame nõõri pealt vähemalt 5 korda erinevates suundades. Arvutame viimase 5 mõõtarvu keskmise; d väärtuseks võtame selle viimase arvu ja ploki soone põhjast võetud mõõtarvu keskmise.

Kõik mõõdetud ajad kanname tabelisse 1.

Tabel 1.

Seeria nr.	Mõõtmise nr.	t	δ	Δ	Δ^2
1.	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Aritm. keskm. 2.	1				
	2				
	3				
	jne.				

δ on hälve vähima mõõtmise suhtes, Δ on hälve aritmeetilise keskmise suhtes.

Arvutame iga mõõtmisseeria aritmeetilise keskmise ja vajaduse korral ka aritmeetiliste keskmiste ruutvead.

Arvutame valemi (3) järgi hooratta inertsimomendid I_1, \dots, I_5 kehade A_1, \dots, A_4 viiel erineval kaugusel teljest ja inertsimomentide relatiivsed vead $\frac{\Delta I_1}{I_1}, \frac{\Delta I_2}{I_2} \dots$ ning absoluutsed vead $\Delta I_1, \Delta I_2 \dots$. Suuruste h ja m väärtused on antud seadme konstantidena.

Juhul kui esimese kolme vea $\frac{\Delta I_1}{I_1}, \frac{\Delta I_2}{I_2}, \frac{\Delta I_3}{I_3}$ suurused on ligikaudu võrdsed, võib kasutada selle vea suurust ka järgnevate mõõtmiste juures.

Andmed koondame tabelisse 2.

Tabel 2.

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
R_i	10,1 cm	10,1 cm	13,2	20,2	24,1
I_i					
$\frac{\Delta I_i}{I_i}$					
ΔI_i					
$I_i \pm \Delta I_i$					

Valemist (4) on näha, et risthooratta inertsimoment I sõltub kehade A_1, \dots, A_4 kaugusest pöörlemisteljest R ruut-funktsioonina. Teljestikus $I - R^2$ kujutab seda sõltuvust sirge.

Ehitame tabeli 2 andmete alusel graafiku teljestikus $I - R^2$. Sirge algordinaadi järgi leiame tühja hooratta inertsimomendi I_0 , tõusu järgi aga kehade A_1, \dots, A_4 massi m_1 . Määrame nende suuruste piirvead.

Möödame dünaamika põhiseaduse kontrollimiseks vajalikud suurused (valem 5). Kontrollime valemi (6) kehtivust katsevigade piires. Arvutanud juurealuse avaldise väärtuse valemis (5), leiame valemi lihtsustamisest tingitud metoodilise vea suuruse.

5. Lisaküsimusi.

1. Kumma plokiga töötades tuleksid mõõtmisvead sõltuvuse $I = f(R)$ määramisel väiksemad?

2. I_0 on tühja hooratta inertsimoment eeldusel, et kehad A_1, \dots, A_4 on masspunktid. Mida kujutab endast I_0 aga tegelikult?

3. Tuletada valem (5).

6. Kirjandus.

1. А. В. Кортнев и др. Практикум по физике. М., "Высшая школа", 1961, стр. 66-69.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 92-95.
3. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1966, стр. 99-125.

14. INERTSIMOMENDI MÄÄRAMINE TRIFILAARPENDLI ABIL.

1. Tööülesanne.

Määrata trifilaarpendli abil geomeetriliselt korrapäraste kehade inertsimomente ja kontrollida Steineri lause kehtivust.

2. Töövahendid.

Trifilaarpendel, sekundkell, nihik, katsekehad, vertikaalne varb alusel võngete lugemise hõlbustamiseks, tehniline kaal, vihid.

3. Meetodi teooria ja seadme ehitus.

Trifilaarpendel on kolme sümmeetriliselt paikneva niidi abil ülesriputatud ümmargune platvorm (joon. 1). Platvorm võib sooritada pöördvõnkumisi vertikaalse telje ümber, mis on risti tema tasandiga ja läbib tema keskpunkti. Platvormi raskuskese nihkub seejuures piki telge. Võnkeperiood on määratud platvormi inertsimomendi ja raskusjõu suhtega, mis muutub platvormi koormamisel mingi keha-
ga.

Kui platvorm, mille mass on m , pöördub ühes suunas ja tõuseb kõrgusele h , siis tema potentsiaalse energia juurdekasv on

$$E_1 = mgh,$$

kus g on raskuskiirendus. Pöördues teises suunas, on plat-

vormi kineetiline energia tasakaalu-
asendi saavutamisel

$$E_2 = \frac{1}{2} I \omega_0^2,$$

kus I on platvormi inertsimoment ja ω_0 on tema nurkkiirus tasakaalu-
asendi läbimise momendil. Hõõrdumis-
jõudude mitteamestamisel on energia
jäävuse lause põhjal

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

Eeldades, et platvormi võnkumine on
harmooniline, saadakse platvormi
nurkhälbe sõltuvus ajast järgmisel
kujul:

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

kus β on platvormi nurkhälve, α -
nurkhälve amplituud, T - täisvõnke
kestus, t - jooksev aeg. Nurkkiirus
 ω on teatavasti nurkhälbe tuletis
aja järgi:

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

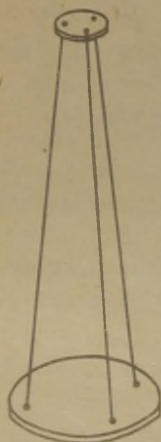
Tasakaaluasendi saavutamisel ($t = 0, \frac{1}{2} T, T, \frac{3}{2} T$ jne.)
on nurkkiiruse absoluutväärtus

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

Avaldistest (1) ja (2) tuleneb:

$$mgh = \frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2. \quad (3)$$

Olgu L kinnitusniidi pikkus, R - niidi kinnituspunkti
kaugus alumise platvormi tsentrist ja r - niidi kinnitus-
punkti kaugus ülemise ketta tsentrist. Joonisel 2 kujutab
lõik AO platvormi lõikejoont joonise tasandiga trifilaar-



Joon. 1.

pendli tasakaaluasendis, BA on kinnitusniit samas asendis. Murga α võrra pöördunud ja kõrguse $h = OO_1 = CC_1$ võrra tõusnud platvormi lõikejoon joonise tasandiga on C_1O_1 , kinnitusniidi asend on siis BA_1 . Jooniselt on näha:

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

Et

$$(BC)^2 = (AB)^2 - (AC)^2 = L^2 - (R-r)^2$$

ja

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

saame

$$h = \frac{2Rr(1 - \cos \alpha)}{BC + BC_1} = \frac{2Rr \cdot 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{BC + BC_1}.$$

Väikeste nurkhälvete korral võib lugeda $\sin \alpha \approx \alpha$. Nimetajas oleva avaldise võib lugeda võrdseks $2L$ -ga. Seda arvestades tuleb

$$h = \frac{Rr \alpha^2}{2L} \quad \text{ja avaldisest (3)}$$

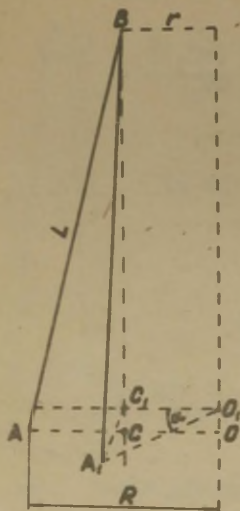
$$mg \frac{Rr \alpha^2}{2L} = \frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi\alpha}{T} \right)^2,$$

kust leitakse

$$I = \frac{mg Rr}{4\pi^2 L} T^2. \quad (4)$$

Valemi (4) järgi võib määrata nii platvormi enda inertsimomendi I_0 kui ka temale asetatud kehade inertsimomendid I_a , I_b jne., sest siin on paremal pool võrdusmärgi kõik otseselt mõõdetavad suurused. Võnkumiste loomiseks vajalik pöördimpulss antakse ülemise ketta keeramise teel, millega välditakse lineaarsete võnkumiste tekkimist. Ülemise ketta pööramiseks on vastav mehhanism.

Täisvõngete kestus registreeritakse sekundkellaga. Nurkamplituud olgu väiksem kui 10° . Võngete arvu lugemiseks asetatakse platvormi kõrvale vertikaalne varb alusel; lugemist alustatakse ja lõpetatakse momendil, kui kettal olev märk möödub varvast, liikudes samas suunas.



Joon. 2.

on antud suuruste L , r ja m väärtused.

2. Praktikumi juhendaja valikul möödame lisakehade komplektist kahe keha (ketas, rõngas, nelinurkne või kolmnurkne plaat) inertsimomendid I_a ja I_b nende raskuskeskpunkte läbiva telje suhtes. Selleks määrame platvormi inertsimomendi koos lisakehaga ülesandes A kirjeldatud viisil ja saadud tulemusest lahutame I_0 . Lisakeha massi M möödame tehnilistel kaaludel. Kehad tuleb asetada platvormile nii, et nende raskuspunkt ja ketta keskpunkt asuksid ühel vertikaalil. Sellist asetamist kergendavad kettale joonestatud kontsentrilised ringjooned. Nüüd määrame mõlema keha summaarse inertsimomendi I_{a+b} nende mõlema raskuspunkti läbiva telje suhtes, asetades mõlemad kehad korruga platvormile. Arvutame tulemuste vead ja kontrollime süs-

4. Töö käik.

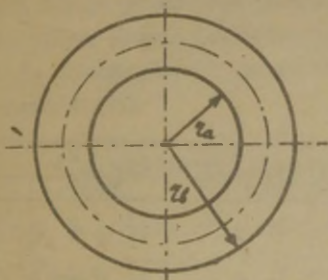
1. Määrame valemi (4) alusel tühja platvormi inertsimomendi I_0 . Niitide kinnituspunktide kaugused R pöörlemisteljest alumisel kettal (ketta tsentrist) möödame nihikuga. Möödame kõik 3 kaugust, võtame aritmeetilise keskmise. Võnkeperioodi T määrame vähemalt 3 korral 20-st täisvõnkest. Möötmisandmed esitame tabelina. Seadme konstantidena

teemi inertsimomendi avaldise kehtivust katsevigade piires:

$$I_a + I_b = I_{a+b}.$$

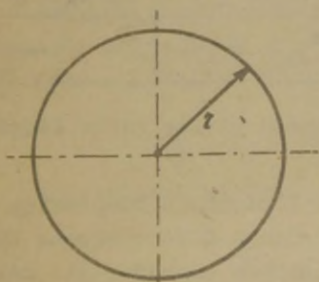
Arvutame kasutatud kehade inertsimomendid teoreetiliselt nende raskuspunkte läbiva ja kujundi tasandiga ristuva telje suhtes alltoodud valemite järgi ja leiame nende summa. Lineaar mõõtmised mõõdame nihikuga.

Rõngas



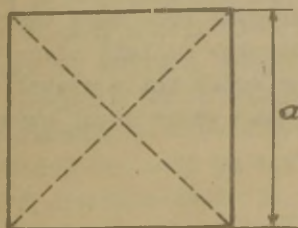
$$I_a^t = \frac{1}{2} M (r_a^2 + r_b^2)$$

Ketas



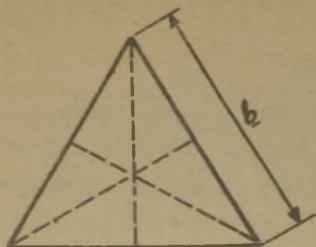
$$I_b^t = \frac{1}{2} Mr^2$$

Ruut



$$I_c^t = \frac{1}{6} Ma^2$$

Võrdkõlgne kolmnurk



$$I_d^t = \frac{1}{12} mb^2$$

Tulemused korraldame tabelisse.

Näidis.

Jrk. nr.	Keha	Mass	Mõõtmised	Inertsimoment (kg.m ²)	
				Eksperim.	Teor.
1.	ruut	...	a =	$I_c^e = (\pm)$	$I_c^t = (\pm)$
2.	ketas	...	r =	$I_b^e = (\pm)$	$I_b^t = (\pm)$
				$I_c^e + I_b^e = (\pm)$	$I_c^t + I_b^t = (\pm)$
3.	ketas+ruut	-	-	$I_{c+b}^e = (\pm)$	

Kui viimased kolm summat vigade piires kokku langevad, on mõõtmised ja arvutused õiged.

3. Steineri lause kontroll. Lisakahade komplektis on kaks väikest ketast võrdsete massidega M ja võrdsete lineaarmõõtmistega. Määrame eelmise ülesande eeskujul ühe sellise ketta inertsimomendi I_1 massikeset läbiva telje suhtes. Kuid sellise väikese ketta inertsimoment massikeset läbiva telje suhtes on väiksem kui platvormi oma. Tema inertsimoment on meie katseseadmega määratav küllalt suure katseveaga (miks?). Üliõpilasel tuleb endal leida meetod selle inertsimomendi määramiseks väiksema veaga samal katseseadmel.

Nüüd asetame mõlemad kettad platvormile sümmeetriliselt selle tsentri suhtes. Olgu ketaste tsentrite kangus platvormi omast d . Ketaste sellist asetamist lihtsustavad jällegi platvormile joonestatud kontsentrilised ringjooned ja diameetrid. Kanguse d leiame kui ketta ääre lähima ja kaugeima punkti kanguste aritmeetilise keskmise. Mõõtmiseks kasutame nihikut. Määrame nüüd sellise süsteemi inertsimomendi, nagu on kirjeldatud ülesannetes A ja B, lahutame sellest tühja platvormi inertsimomendi. Jagades tulemuse kahega, saame ketta inertsimomendi I_d ketta tasapinnaga ristuva ja masskeskmest kangusel d asuva telje suhtes. Vastavalt valemile (4)

$$I_d = \frac{Rrg}{8\pi^2 L} \left[(m + 2M) T_{o+2d}^2 - m T_o^2 \right],$$

kus T_o - pendli võnkeperiood tühjalt,

T_{o+2d} - pendli võnkeperiood kahe kettaga koormatult,

m - platvormi mass,

M - ketta mass.

Steineri lause järgi võime arvutada meie ketta inertsimomendi telje suhtes, mis on risti tema tasandiga ja asub tema masskeskmest kangusel d .

$$I_d^t = I_1 + Md^2.$$

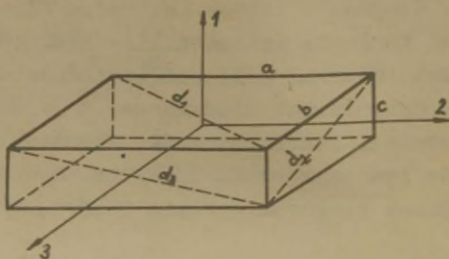
Katsevigade piires peab kehtima seos

$$I_d = I_d^t.$$

4. Risttahuka inertsimomendi määramine. Määrame ülesannete A ja B eeskujul risttahuka inertsimomendid kolme telje suhtes, mis läbivad masskeset ja igauks erineva tahu keskpunkte. Selleks asetame risttahuka platvormile, nii et tahu keskpunkt ühtib ketta tsentriga. Kõik kolm leitud inertsimomenti erinevad üksteisest.

Teoreetiliselt on leitud, et risttahuka, mille mass on M , inertsimoment telje 1 suhtes (joon. 3) avaldub:

$$I_1 = M \frac{a^2 + b^2}{12}.$$



Joon. 3.

Analoogiliselt telgede 2 ja 3 jaoks:

$$I_2 = M \frac{b^2 + c^2}{12},$$

$$I_3 = M \frac{a^2 + c^2}{12}.$$

Geomeetriliste teisenduste abil on lihtne üle minna külgede ruutudelt tahkude diagonaalide ruutudele. Saame suhte:

$$I_1 : I_2 : I_3 = d_1^2 : d_2^2 : d_3^2.$$

Tuletada toodud suhe ja näidata, et katsest leitud inertsimomendid vigade piires rahuldavad seda seost.

Märkusi. 1. Üliõpilane teeb tööülesande 'A' ja juhendaja valikul kas B, C või D.

2. Trifilaarpendlit võib koormata ainult platvormi tsentri suhtes sümmeetriliselt, vastasel korral tekivad lineaarvõnkumised.

5. Lisaküsimusi.

1. Trifilaarpendli platvorm sooritab pöördvõnkumisi. Näidata, millise päritoluga on taastav jõumoment (ilma selleta pole ju pöördvõnkumine mõeldav).

2. Mida tuleks muuta trifilaarpendli konstruktsioonis, et võimalikult vähendada inertsimomentide määramisel tekkinud katsevigu?

6. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 95-98.
2. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 401-414.

15. GÜROSKOABI PRETSESSIOONI UURIMINE.

1. Tööülesanne.

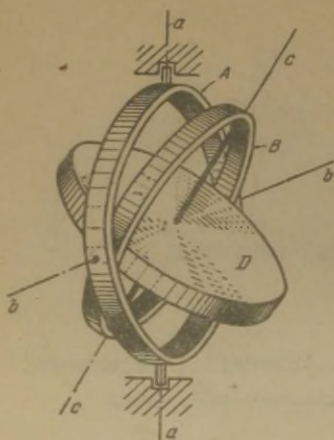
Güroskoobi elementaarteooriaga tutvumine, güroskoobi pretsessiooni kiiruse ja pöörlemiskiiruse määramine.

2. Töövahendid.

Güroskoopiline seade, selle rootor (güroskoop), etalooncilinder, terastraat, ampermeeter, alalispinge allikas, stoppkell, nihik, tehnilised kaalud, vihid.

3. Teoreetiline sissejuhatas.

Güroskoobiks nimetatakse kiiresti pöörlevat jäika keha, mille pöörlemistelje orientatsioon ruumis võib muududa. Güroskoobina võib vaadelda näiteks pöörlevaid taevakehi, kahurimürske, turbiinide rootoreid jt. Kaasaja tehnikas on güroskoop paljude güroskoopiliste seadeldiste olulisemaid elemente. Neid seadeldisi kasutatakse lennukite, laevade, torpeedode, rakettide jt. automaatjuhtimiseks, navigatsioonis kursi määramiseks ja mujal. Selleks, et güroskoop võiks ruumis vabalt pöörduda, on ta pöörlemistelg tavaliselt seotud pöörelde võlva rõngaga, mis omakorda asetseb teise rõnga sisemuses, kusjuures mõlemate rõngaste pöörlemisteljed on teineteise suhtes risti (joon. 1). Selliselt kinnitatud güroskoobil on kolm vabadusastet ning ta võib sooritada mistahes pöörde pöörlemistelgede ristumiskohal asetseva punkti suhtes.



Joon. 1.

Kui güroskoobi masskese ühtib pöörlemistelgede lõikepunktiga, nimetatakse güroskoopi tasakaalustatuks ehk vabaks. Kui güroskoobi pöörlemistelg ühtib tema sümmeetriateljega, on güroskoop sümmeetriline.

Vaatleme vaba sümmeetrilist güroskoopi. Dünaamika põhiseaduse kohaselt pöördliikumise jaoks

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M},$$

kus \vec{L} on güroskoobi pöördimpulss ja \vec{M} välisjõudude moment. Välisjõudude puudumisel

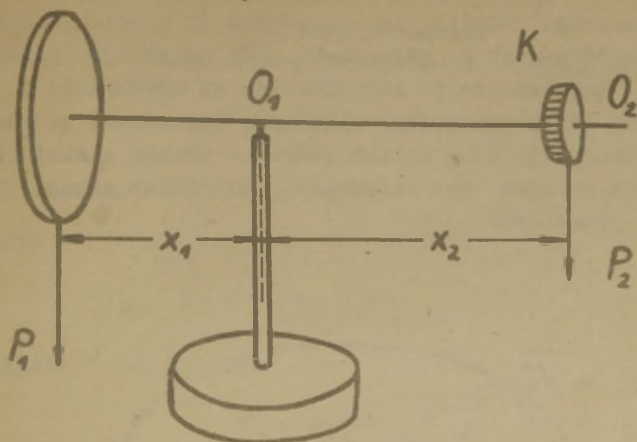
$$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0,$$

millest $\vec{L} = I\vec{\omega} = \text{const.}$, kus I on güroskoobi inertsi-moment ja $\vec{\omega}$ tema pöörlemise nurkkiirus. Sellest järgneb, et jääva inertsimomendiga güroskoobi nurkkiirus ja järelikult ka pöörlemistelje orientatsioon ruumis ei muutu, mistõttu teda võib tööpoolest kasutada kompassina. Oluliselt ei muuda kiiresti pöörleva güroskoobi orientatsiooni ruumis ka lühiajalised tugevad löögid vastu tema telge. Kerge on selles veenduda, tuginedes ülaltoodud liikumisvõrrandile.

Moodustagu güroskoobi telje O_1O_2 ümber pöörlev massiivne ketas ja teda tasakaalustagu koormus K (joon. 2). Güroskoobi telg on punktis O_1 šarniirselt kinnitatud vertikaalsele alusele. Kui tasakaalustav koormus asetseb nii, et punkt O_1 osutub güroskoobi masskeskmeks, s.t.

$$P_1x_1 = P_2x_2,$$

kus P_1 ja P_2 on kettale ja tasakaalustavale koormusele mõjuvad raskusjõud ja x_1 ja x_2 - samade kehade masskeskmete kaugused punktist O_1 , siis on güroskoobile mõjuvate



Joon. 2.

välisete jõudude moment null. Mittepöörleva güroskoobi viib tasakaalustava koormuse nihutamine tasakaalust välja. Teisiti käitub pöörlev güroskoop. Olgu güroskoobi algasend selline, nagu näha joonisel 3, kusjuures tasakaalustav koormus olgu nihutatud eelmise asendi suhtes paremale, nii et süsteemi massikeske osutub asetsevaks punktis O' . Välisjõudude moment

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}],$$

kus \vec{r} on jõu \vec{F} rakenduspunkti O' asukohta güroskoobi toetuspunkti O_1 suhtes määrav raadiusvektor. Güroskoobi telje suuna vertikaali suhtes määrab nurk φ . Antud juhul on

$$F = P_1 + P_2,$$

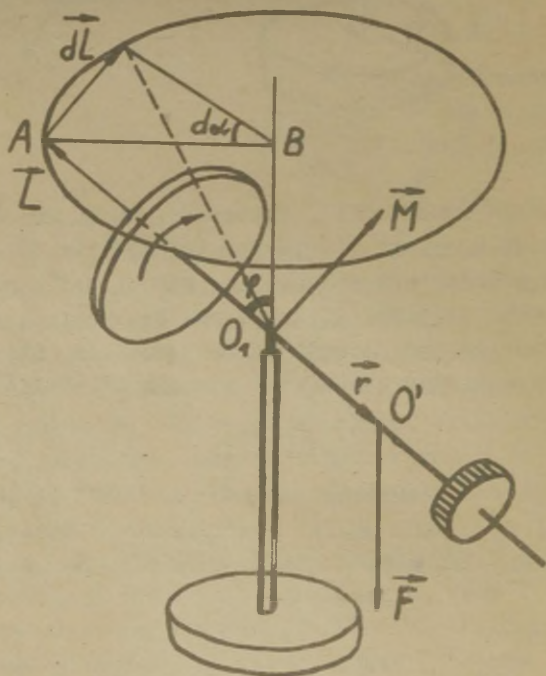
mistõttu

$$M = (P_1 + P_2) r \sin \varphi.$$

Ülaltoodud dünaamika põhivõrrandist järgneb, et pöördimpulsi muutus $d\vec{L}$ aja dt jooksul ühtib oma suunalt välisjõudude momendiga:

$$dL = M dt.$$

Summaarne pöördimpulss on pärast dt möödumist $L + dL$. Järelikult muutub ka güroskoobi pöörlemistelje orientatsioon. Tähistame telje kõrvalekalde dt möödumisel d -ga. Järgmise ajavahemiku jooksul toimub samasugune pöördumine jne. Güroskoobi telg hakkab pöörlema teatud nurkkiirusega, moodustades oma liikumisel koonilise pinna. Sellist güroskoobi



Joon. 3.

liikumist nimetatakse pretsessiooniks. Suurust $\Omega = \frac{d\alpha}{dt}$ nimetatakse pretsessiooni nurkkiiruseks.

Arvutame pretsessiooni nurkkiiruse. Valemitest

$$M = (P_1 + P_2)r \sin \varphi$$

ja

$$dL = M dt$$

järgneb, et

$$dt = \frac{dL}{(P_1 + P_2) r \sin \varphi}.$$

Jooniselt 3 selgub, et

$$dL = AB d\alpha.$$

Kolmnurgast ABO_1 : $AB = L \sin \varphi$, mistõttu

$$dL = L \sin \varphi d\alpha.$$

Seega

$$dt = \frac{L d\alpha}{(P_1 + P_2) r}$$

ja

$$\Omega = \frac{(P_1 + P_2) r}{L}, \text{ või}$$

$$\Omega = \frac{(P_1 + P_2) r}{I \omega}.$$

Tuletatud valemist nähtub, et güroskoobi pöörlemiskiiruse suurenemisel pretsessioonikiirus väheneb. Konstantse nurkkiirusega pöörleva güroskoobi korral on $\frac{(P_1 + P_2)r}{\Omega}$ konstantne suurus.

Käesoleva töö ülesanne seisnebki selle järelduse katsetelises kontrollis ja güroskoobi pöörlemiskiiruse määramises.

4. Riista kirjeldus.

Käesolevas töös kasutatavaks güroskoobiks on alalisvoolu elektrimootori suure inertsimomendiga rootor. Rootori teljega aksiaalselt on staatori külge kinnitatud jaotistega varustatud varb, millel võib liikuda tasakaalustav koormus. Staator on kinnitatud šarniirselt vertikaalsele alusele või ripub vabalt nõõri otsas. Kui güroskoobi telg on horisontaalne ja süsteemi rootor - staator - varb masskeskme kaugus güroskoobi telje ja vertikaaltelje lõikepunktist O on x_1 ning tasakaalustava koormuse raskusjõu rakenduspunkti kaugus samast punktist on x_2 , kusjuures nimetatud süsteemile ja tasakaalustavale koormusele mõjuvad raskusjõud on vastavalt P_1 ja P_2 , siis on tasakaalutingimuseks

$$P_1 x_1 = P_2 x_2.$$

Kui tasakaalustavat koormust nihutada punktist O eemale, nii et rakenduspunkti uueks kauguseks on x_2' , siis tasakaal kaob. Tähistades kogu süsteemi masskeskme kauguse punktist O r -ga, võib kirjutada

$$P_1(x_1 + r) = P_2(x_2' - r),$$

millest

$$r = \frac{P_2 x_2' - P_1 x_1}{P_1 + P_2}.$$

Tuginedes eelmisele tasakaalutingimusele võib kirjutada

$$r = \frac{P_2(x_2' - x_2)}{P_1 + P_2}.$$

Paigutades saadud tulemuse valemisse pretsessiooni nurkkiiruse arvutamiseks, saadakse

$$\Omega = \frac{P_2(x_2' - x_2)}{I\omega} = \frac{P_2 \cdot \Delta x}{I\omega}.$$

Kui güroskoobi pöörlemiskiirus ei muutu, siis tasakaalustava koormuse erinevate asendite puhul

$$\frac{\Delta x_1}{\Omega_1} = \frac{\Delta x_2}{\Omega_2} = \frac{\Delta x_3}{\Omega_3} = \dots = \frac{\Delta x_i}{\Omega_i} = \frac{I\omega}{P_2} = \text{const},$$

kus Δx_1 on tasakaalustava koormuse asukoht oma algasendi suhtes.

5. Töö käik.

Riputame güroskoobi tugeva nõõri otsa või reguleerime vertikaalseks sluse, millega ta on šarniirselt ühendatud. Järgnevalt tasakaalustame kogu süsteemi ning koostame skeemi mootori toiteks, ühendades güroskoobi toiteallikaga läbi ampermeetri. Juhendaja loal pingestame skeemi ning valime toitevoolu tugevuseks 1,5 - 2 A. Toitepinge ei tohi ületada 27 volti. Mõõtmisi ei saa alustada enne 20 min. möödumist. Alles nüüd on güroskoobi pöörlemine stabiliseerunud. Selle üle võib otsustada ka ampermeetri näidu muutumatuks jäämise järgi. Güroskoobi suures pöörlemiskiiruses võib veenduda, koputades kergelt jaotistega varvale. Mis on kriteeriumiks? Kui süsteemi vertikaalne telg on kinnitatud jäigalt, annab sama katse erineva tulemuse. Millise? Andke selgitus! Kui pöörata süsteemi ümber vertikaalse telje, püüab güroskoobi telg orienteeruda vertikaalselt, varva ots liigub üles või alla. Miks?

Pärast kirjeldatud kvalitatiivseid katseid määrame güroskoobi pretsessiooni nurkkiiruse. Esiolgu veendume selles, et tasakaalustatud güroskoop ei pretsesseeri. Lülitamata välja mootorit, nihutame tasakaalustavat koormust varval mõne jaotise võrra, määrame x_1 ja jälgime güroskoobi pretsessiooni. Võib märgata, et aja jooksul güroskoobi telje horisontaalne asend muutub, varva ots laskub allapoole. See on tingitud vertikaalsele teljele mõjuvast hõõrdejõust või, nõõri otsa riputatud güroskoobi korral, nõõri keerumisest. Mõõdame varva laskumise nurkkiiruse ja hindame hõõrde- või elastsusjõudude momendi suurust.

Güroskoobi pretsessiooni nurkkiiruse määramiseks orienteerime jaotistega varva ca 5° nurga all horisondi suhtes.

Pöörelda laseme güroskoopi seni, kuni varva ots ei lange allapeele horisonti ja güroskoobi siht ei moodusta horisondi suhtes jälle samasugust narka. Katset teostame vähemalt viis korda. Takistava momendi suurenemise vältimiseks likvideerime iga uue mõõtmise alguses nõõri keerumise ja hoolitseme selle eest, et lisamomenti ei tekitaks ka mootori toitevoelu juhtmed. Analoogilisi mõõtmisi teostame tasakaalustava koormuse seitsme erineva asendi puhul. Arvutame pretsessiiooni nurkkiiruse ja ülalkirjeldatud suhted.

Güroskoobi nurkkiiruse arvutamiseks määrame tasakaalustava keermuse massi ja güroskoobi inertsimomendi. Inertsimomendi määramiseks kasutame teise, täpselt samasuguse güroskoopilise seadeldise rootorit. Rootori kinnitame metalltraadi otsa nii, et ta saaks sooritada pöördvõnkeid ümber massikeset läbiva vertikaalse telje. Määrame 20 - 30 täisvõnkest süsteemi võnkeperioodi. Nüüd asendame rootori homogeensest materjalist silindriga ning toimime analoogiliselt eelmisega. Nagu teada, arvutatakse niisuguste pöördvõnkumiste perioodid valemitest

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}} \quad \text{ja} \quad T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{D}},$$

kus I - güroskoobi inertsimoment,
 I_1 - silindri inertsimoment,
 D - traadi keerdjäikus.

Et homogeense silindri inertsimoment on kergesti määratav, siis võib arvutada ka

$$I = \frac{T^2}{T_1^2} I_1.$$

Lõpuks arvutame güroskoobi pöörlemiskiiruse ja hindame mõõtmisviga.

6. Täiendavaid küsimusi.

1. Kuidas määratakse jõumomendi suund?
2. Miks võib käesolevas töös lugeda güroskoobi pöördepulsi güroskoobi telje sihiliseks?

7. Kirjandus.

1. А. В. Коргиев и др. Практикум по физике. М., "Высшая школа", 1961, стр. 69-73.
2. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 206-237.
3. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., ФМ, 1968, стр. 439-466.

16. VEDRUPENDLI OMAVÖNKUMISE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine harmooniliste ja sumbuvõnkumistega.

2. Töövahendid.

Kronstein, sentimeeterjaotistega joonlaud, komplekt vedrusid ja raskusi, anum vedelikuga, sekundkell.

3. Sissejuhatus.

Kui ühest otsast jäigalt kinnitatud silindrilise spiraalvedru otsa riputada raskus P , siis venib vedru pikemaks. Hooke'i seaduse alusel võib kirjutada

$$P = k\Delta l_0, \quad (1)$$

kus Δl_0 on vedru alumise otsa nihe raskuse P mõjul (lõik AA_1 joonisel 1) - vedru absoluutne pikenemine. Võrdetegur k näitab sisuliselt jõudu, mille mõjul vedru pikeneb ühikulise pikkuse võrra, ja teda nimetatakse vedru jäikusteguriks.

Kui vedru otsa riputatud koormus viia mingi välise jõu toimele vertikaali mööda tasakaaluasendist välja (punkt A_2 joonisel 1), siis saab temale mõjuva jõu arvutada vedru elastsusjõu ja koormuse enda raskusjõu vahena:

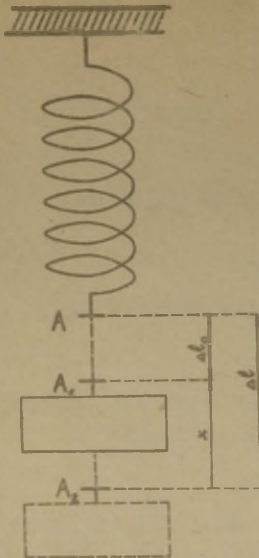
$$F = k\Delta l - P.$$

Siin Δl on vedru alumise otsa nihe asendist, kus ta oli koormamata olekus. Asendades P , saadakse

$$F = k(\Delta l - \Delta l_0). \quad (2)$$

Suurus $(\Delta l - \Delta l_0) = x$ on aga koormuse nihe tema tasakaaluasendist. Seega mõjub vedru otsa riputatud koormusele hõlbega tasakaaluasendist võrdeline jõud. On lihtne näha, et see on alati suunatud tasakaaluasendi poole.

Kui selline vedrupendel asub õhus, võib lugeda keskkonna takistuse tema liikumisele tühihiseks ja süsteem võngub harmooniliselt. Tema võnkumise diferentsiaalvõrrand on



Joon. 1.

$$m\ddot{x} = -kx \quad (3)$$

ja selle lahend

$$x = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4)$$

Siin A_0 on amplitund, φ_0 - algfaas, ω_0 aga omavõnkumise ringsagedus:

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\frac{k}{m}}; \\ T_0 &= \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Kui aga vedrupendel asub mingis tihedamas keskkonnas, näiteks vedelikus, peab arvestama hõõrdejõudu. Esimeses lähenduses on hõõrdejõud võrdeline kiirusega (mitte eriti suurte kiiruste korral):

$$F_h = -r \dot{x}. \quad (6)$$

Võrdetegurit r nimetatakse hõõrdejõudude koefitsiendiks (antud juhul keskkonna takistusteguriks). Võnkumine on siin sumbuv. Diferentsiaalvõrrand näeb välja selline:

$$\ddot{x} = -kx - r\dot{x}; \quad (7)$$

tema lahend on

$$x = A_1 e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1). \quad (8)$$

Siin φ_1 ja ω_1 on sama tähendusega, mis harmoonilisel võnkumiselgi, ainult

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}. \quad (9)$$

δ on sumbuvuse tegur:

$$\delta = \frac{r}{2m}. \quad (10)$$

A_1 on algamplituud, $A_1 e^{-\delta t} = A(t)$ on amplituud ajamomendil t . Sumbuvuse iseloomustamiseks kasutatakse sageli veel sumbuvuse logaritmilist dekrementi Θ , mis defineeritakse kui kahe järjestikuse täisvõnke amplituudide suhte loomulik logaritm:

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (11)$$

Leida seos Θ ja δ vahel, kirjutada valem (8) logaritmilist dekrementi sisaldavana!

Käesolevas töös määratakse katseliselt sõltuvused $T_0 = f(m)$ ja $T_0 = f'(k)$ (valem 5) ja uuritakse vedrupendli sumbuvat võnkumist.

4. Töö käik.

1. Vedrude jäikus tegurite staatiline määramine. Mõõdame vedru piknemise Δl_0 tuntud raskuse P mõjul, iga vedru korral vähemalt 5 erineva koormusega. Joonestame sõltuvused $P = f(\Delta l_0)$. Nende sirgete tõusud määravadki vedrude jäikus-

tegurid.

Joonlauale on sentimeeterjaotised kantud 1 mm täpsusega nullkriipsu suhtes.

2. Vedrupendli omavõnkumise perioodi sõltuvus koormuse massist. Mõõdame vedrupendli võnkeperioodi vähemalt 5 erineva koormuse korral (sama vedru). Vedru ülemine ots tuleb kinnitada tugevasti kronsteini külge. Perioodi määramisel tuleb mõõtmisvea vähendamiseks määrata mitme täisvõnke sooritamiseks kuluv aeg. Minimaalse nõutava täisvõngete arvu n määramisel tuleb lähtuda nõudest, et T määramise viga ei tohi ületada 1%. Elektrisekundkellaga aja mõõtmisel tähendab see seda, et kella näidu põhivea ja vaatleja reaktsiooni hilinemisest põhjustatud vea (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 1) summa peab olema vähemalt suurusjärgu võrra väiksem võrgusageduse lubatud veast (1%). Võnkeamplituud ei tohi ületada antud raskuse korral tekkivat pikenemist Δl_0 (miks?). Võimalike eksimiste vältimiseks mõõdame perioodi vähemalt 3 korda.

Ehitame T ja m vahelise sõltuvuse graafiku teljestikus m ja T^2 (miks mitte T ?). Määrame graafikult k , võrdleme staatilisel meetodil saaduga.

3. Vedrupendli omavõnkumise perioodi sõltuvus vedru jäikustegurist. Määrame vedrupendli võnkeperioodi vähemalt 4 erineva vedru ja sama koormuse korral. Arvutame vedrude jäikustegurid valemi (5) järgi, võrdleme staatilisel meetodil leitutega. Koormuste mass on antud 0,5% täpsusega. Ehitame T ja k vahelise sõltuvuse teljestikus k ja $\frac{1}{T^2}$ (miks?). Määrame graafikult m , võrdleme koormusele kirjutatud massiga.

4. Vedrupendli sumbuvuse logaritmilise dekrementi ning keskonna takistustegurid määramine. Riputame vedru otsa koormuse ning paigutame selle vedeli-

kuga (veega) täidetud anumasse. Anname pendlile mingi algamplituudi A_1 ja mõõdame võnkeperioodi T ning aja t' , mille jooksul amplituud väheneb mingi väärtuseni ($A(t')$). Siin tuleb neid mõlemaid suurusi mõõta vähemalt 5 korda. Tuletame valemi A_1 ja $A(t')$ kaudu Θ arvutamiseks:

$$\Theta = \frac{T}{t'} \ln \frac{A_1}{A(t')},$$

leiame Θ väärtuse vähemalt 3 erineva algamplituudi korral.

Valemit (10) ja Θ ning δ seost kasutades arvutame keskkonna takistusteguri r .

5. Lisaülesandeid ja -küsimusi.

1. Lahendada diferentsiaalvõrrandid (3) ja (7).
2. Milline on koefitsiendi r füüsikaline sisu? tema dimensioon?

6. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 156-158.
2. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965. стр. 401-418.

17. FÜÜSILINE PENDEL.

1. Tööülesanne.

Pika varva inertsimomendi määramine. Raskuskiirenduse määramine (kahel meetodil).

2. Töövahendid.

Füüsiline pendel - pikk metallvarb koos kahe temale kinnitatava prismaga, statiiv, sekundkell, mõõtjoonlaud, tehnilised kaalud, vihid.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

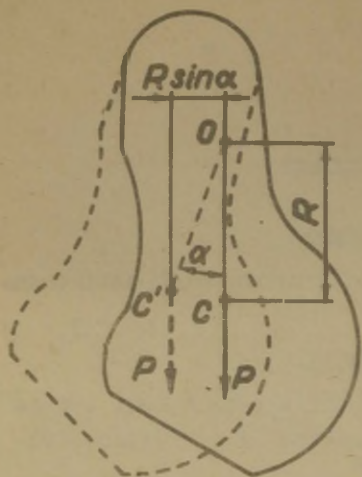
Füüsiliseks pendliks on iga keha, mis võib pöörduda horisontaalse telje ümber ja mille raskuspunkt ei asetse pöörlemisteljel. Selline keha on stabiilses tasakaalus, kui tema raskuspunkt paikneb pöörlemistelge läbival vertikaalil teljest madalamal.

Tähistagu punkt O keha (füüsilise pendli) pöörlemistelge, C raskuspunkti; nendevaheline kaugus olgu R (joon. 1). Kui viia keha tasakaaluasendist välja, nii et raskuspunkt on punktis C' ja sirge OC' moodustab vertikaaliga nurga α , mõjub kehale raskusjõu P moment

$$M = PR \sin \alpha = mg R \sin \alpha . \quad (1)$$

See moment sunnib keha pöörduma tasakaaluasendi poole.

Keha hakkab võnkuma, kusjuures tema asendi mistahes ajamomendil määrab täielikult nurk α . Füüsilise pendli võnkumise iseloomustamiseks tuleb leida liikumisvõrrand, s.t. valem, mis väljendab α sõltuvust ajast.



Joön. 1.

Füüsilise pendli võnkumine pole harmooniline, kuna mõjuv moment nurkhälbest võrdeliselt ei sõltu (valem 1). Väikes-te hälvete jaoks võib aga ligikaudu võtta

$$\sin \alpha \approx \alpha \quad \text{ja} \\ M = mg R \alpha, \quad (2)$$

ning lugeda võnkumisi kvaasiharmoonilisteks.

Liikumise võrrandi leidmiseks lähtutakse Newtoni II seadusest pöördliikumise jaoks:

$$I \varepsilon = M, \quad (3)$$

kus I on keha inertsi-moment pöörlemistelje suhtes;

$$\varepsilon = \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \quad - \text{nurkkiirendus.}$$

Valemitest (2) ja (3) saadakse:

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mg R \alpha, \\ \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mg R}{I} \alpha = 0. \quad (4)$$

Viimati kirjutatu on füüsilise pendli liikumise difereentsiaalvõrrand. Selle lahendiks on funktsioon

$$\alpha = A \sin (\omega t + \varphi), \quad (5)$$

mis ongi liikumise võrrand, mis näitab, et antud juhul on

võnkumised harmoonilised (tegelikult kvaasiharmoonilised).
 Valemis (5) tähistab ω nurk- ehk ringsagedust:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgR}{I}}, \quad (6)$$

A - võnkeamplituudi ja φ - alfaasi (kas see on nurga ω väärtus vaatluse algmomendil, siis kui $t=0$?).

Sõltuvus (6) määrab pendli võnkeperioodi. Nagu teada, on periood T ja ringsagedus ω seotud valemiga

$$T = \frac{2\pi}{\omega},$$

millest

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgR}}. \quad (7)$$

Matemaatilise pendli võnkeperiood avaldub valemiga

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad (8)$$

kus ℓ on pendli pikkus.

Füüsilise pendli perioodi valemile võib anda analoogilise kuju

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (9)$$

milles $L = \frac{I}{mR}$ nimetatakse pendli redutseeritud pikkuseks. Ta on võrdne sellise matemaatilise pendli pikkusega, mille võnkeperiood on T .

Punkti, mis asub pöörlemistelge ja raskuskeset läbi- val sirgel kaugusel L teljest, nimetatakse v õ n k e - t s e n t r i k s. Võnketsentri asukoha leidmiseks lähtu- takse Steineri lausest

$$I = I_0 + mR^2,$$

kus I_0 on pendli inertsimoment tema raskuskeset läbiva ja endisega paralleelse telje suhtes.

Siit

$$L = \frac{I}{mR} = \frac{I_0}{mR} + R. \quad (10)$$

On näha, et $L > R$, s.t. vönketsenter on alati raskuskeskest madalamal.

Kui kinnitada keha vönketsentris, nii et ta võib pöörelda endisega paralleelse telje ümber, siis pendli redutseeritud pikkus (valemist 10)

$$L' = \frac{I_0}{m(L-R)} + (L-R) = \frac{I_0}{mR} + R = L.$$

On näha, et redutseeritud pikkus ei muutu, järelikult jääb samaks ka vönkeperiood. See võimaldab katseliselt määrata füüsilise pendli redutseeritud pikkust.

4. Töö käik.

A. P i k a v a r v a i n e r t s i m o m e n d i m ä ä r a m i n e. Geomeetriliselt keeruka kujuga kehade inertsimomentide arvutamine on väga raske matemaatiline ülesanne. Sageli on hoopis lihtsam inertsimomenti määrata katseliselt. Füüsilise pendli inertsimomendi leidmiseks katselisel teel tuleb määrata tema vönkeperiood. Inertsimoment arvutatakse siis valemist (7)

$$I = \frac{mgRT^2}{4\pi^2}. \quad (11)$$

Kui pöörlemistelg läbib raskuskeset ($R = 0$), siis vönkeperiood T saab lõpmata suureks (pendel on ükskõikses tasakaalus) ning valemit (11) inertsimomendi I_0 määramiseks otseselt kasutada ei saa. I_0 leidmiseks kasutatakse Steineri valemit.

$$I_0 = I - mR^2. \quad (12)$$

Kui varva jämedus on väike, võrreldes tema pikkusega, siis võib tema inertsimomendi I_0 varva keskohta läbiva ja temaga ristuva telje suhtes arvutada valemist:

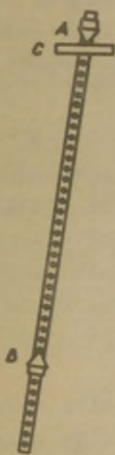
$$I_0 = \frac{1}{12} ml^2, \quad (13)$$

kus l on varva pikkus ja m - tema mass.

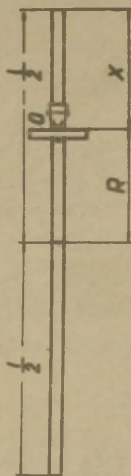
Töö teostamiseks paigutame toetusprisma varva ühte otsa ning kinnitame kruvi abil vastavatesse õõnsustesse (joon. 2) (teine prisma on varvalt eemaldatud).

Asetanud toetusprisma statiivi külge kinnitatud plaadile, paneme varva võnkuma ning mõõdame 30 võnke kestuse vähemalt kolmel korral. Varva alumise otsa maksimaalse lubatud amplituudi määrame tingimusest, et ligikaudne võrdus $\sin \alpha \approx \alpha$ kehtiks 0,2% täpsusega. Viime prisma 5 cm kaupa lähemale varva keskpaigale, mõõtes igal korral 30 võnke aja vähemalt 3 korda. Seda teeme, kuni jõuame varva keskpaika.

Arvutame võnkeperioodi T prisma iga asendi jaoks ja joonestame graafiku teljestikus T ning R ; R - kaugus prisma serva ja varva raskuskeskme vahel. R määratakse valemist



Joon. 2.



Joon. 3.

$$R = \frac{1}{2} \ell - x,$$

(14)

kus x - prisma serva kaugus varva otsast (joon. 3).

Kauguse x võib mõõta igal korral joonlauaga, võib aga mõõta selle ka ühes asendis ja arvestada, et kõik augud on puuritud varva otsa suhtes 0,5 mm täpsusega.

Valemi (11) abil leiame prisma iga asendi jaoks varva inertsimomendi I prisma toetusserva suhtes. Joonestame graafiku $I = f(R)$ ja määrame sealt I_0 . I_0 väärtuse leiame ka valemist (13). Arvutame tulemuste piirvead.

Mõõtmistulemused on kohane esitada tabelis.

Nr.	x	$R = \frac{1}{2} \ell - x$	t	$t_{\text{keskm.}}$	$T = \frac{t_{\text{keskm.}}}{30}$	I
1.					
2.					
3.					
jne.					

B. Raskuskiirenduse määramine reversioonpendli abil. Kui füüsilise pendli redutseeritud pikkust saaks määrata katseliselt, võiks raskuskiirenduse g arvutada valemist (9). L määramiseks tuleb leida kaks punkti, milledes keha toetades võnkeperioodid mõlemal juhul oleksid võrdsed; nende punktide vaheline kaugus ongi meie füüsilise pendli redutseeritud pikkus L .

Käesolevas töös on füüsiliseks pendliks metallvarb, mille kaks toetusprismat (joon. 2) A ja B on kinni kruvitavad varva õõnsustesse. Seda süsteemi nimetatakse pööratavaks e. reversioonpendliks.

Töö algul on prismad varva otstes. Prisma A serv toe-

tub alusplaadile C. Kerge tõukega viime pendli võnkuma (lubatud võnkeamplituudi kohta vt. punkt A). Mõõdame 30 täisvõnke kestuse. Seejärel pöörame pendli prismaga B üles ja määrame jälle 30 võnke aja. Need kaks aega on omavahel võrdsed.

Kogu mõõtmiste ajal jätame ühe prismadest esialgsesse asendisse; seda prisma nimetatakse liikumatuks (A) ja asendit, kus pendel toetub alusele prismaga A, otseseks. Teine prisma nihkub katse kestel; see on liikuv prisma (B); kui liikuv prisma on ülal, on pendel pööratud asendis.

Viime nüüd liikuva prisma 5 cm kaupa lähemale liikumatuks, mõõtes iga kord 30 võnke aja otse- ja pööratud asendis. Võngete aeg pööratud asendis osutub lühemaks. Jätkates prisma nihutamist, jõuame olukorrani, kus pööratud asendi puhul võngete aeg on pikem. Toetusprismade servade vaheline kaugus annab nüüd pendli redutseeritud pikkuse 5 cm täpsusega.

Edasi nihutame liikuvat prisma 1 cm kaupa tagasi (lähemale varva otsale) ja mõõdame 30 võnke aja otse- ja pööratud asendis, kuni aeg viimasel juhul saab lühemaks otseste võngete ajast. Redutseeritud pikkuse saame nüüd täpsusega kuni 1 cm.

Mõõtmise tulemused korraldame tabelisse.

Liikumatu prisma asend

Jrk. nr.	Liikuva prisma asend	30 võnke aeg	
		pendli otseasend	pendli pööratud asend
1.			
2.			
jne.			

Redutseeritud pikkus on nüüd määratud piirveaga $\Delta l = 1$ cm, relatiivne viga tuleb $\sim 1,5\%$. Umbes niisama suur tuleb 30 võnkeperioodi aja relatiivne viga elektrikella kasutamisel ilma hertsmeetrita. Hertsmeetrit kasutades on võimalik saavutada g määramisel minimaalne viga 2,5...3%.

g täpsemaks määramiseks tuleb võtta suurema arvu võngete aeg ja L leida interpolatsioonil teel.

Määrame nüüd liikuva prisma viimati leitud asendis 200 täisvõnke aja. Hertsmetri abil arvutame sagedusest tingitud parandi. Juhuslike vigade hindamiseks teeme pendli pööratud asendis 3 ja otseasendis 2 mõõtmist. Nihutame liikuvat prisma 1 cm võrra keskpunktile lähemale, kordame seal täpselt samu mõõtmisi. Prisma mõlema asendi korral mõõdame mm-jaotistega mõõtjoonlauaga prismade toetuservade vahelise kauguse (vastavalt l_1 ja l_2). Mõõtarvud kanname tabelisse.

Liikuva prisma asend	Kaugus prismade servade vahel	Pendli pööratud asend		Pendli otseasend	
		200 võnke aeg	200 võnke kesk. aeg	200 võnke aeg	200 võnke kesk. aeg
	$l_1 =$	.....	$t_1 =$	.....	$t =$
	$l_2 =$	.....	$t_2 =$	.....

Toodud tabelis on keskmine kõigist neljast 200 võnke ajast liikuva prisma kahes viimasel asendis pendli otseseks puhul tähistatud tähega t ; keskmine kolmest 200 võnke ajast pendli pööratud asendis prismade kaugusel l_1 tähega t_1 ja lõpuks, keskmine kolmest 200 võnke ajast pendli pööratud asendis prismade kaugusel l_2 tähega t_2 (täidetud peab olema tingimus: $l_1 > l_2$ ja $t_1 < t < t_2$). t_1 , t ja t_2 piirviga määratakse juhuslike vigade ülemmäära, kella lubatud põhivea ja vaatleja reaktsioonist tingitud piirvea (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 1) summana. Redutseeritud pikkus on l_1 ja l_2 vahel ($l_1 > L > l_2$). See tähendab, et liikuva prisma nihutamisel suuruse $l_1 - L$ võrra lähemale varva keakpaigale asendist, kus prismad on kaugusel l_1 , saab võngete aeg otse- ja pööratud asendites samaks ja võrdub

ajavahemikuga t .

Tegelikult prismat ei nihutata, vaid leitakse redutseeritud pikkus lineaarse interpolatsiooni teel, s.t. loetakse prismade servade vahekauguse väikene vähenemine proportsionaalseks perioodi suurenemisega. Saame võrduse

$$\frac{t_2 - t_1}{l_1 - l_2} = \frac{t - t_1}{l_1 - L}. \quad (15)$$

Siit on kerge leida, et

$$L = l_1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} (l_1 - l_2). \quad (16)$$

Raskuskiirenduse arvutame valemist (9), võttes arvesse, et periood saadakse valemist $T = \frac{t}{n}$, kus antud juhul n on 200 ja t on keskmine neljast viimasest 200 võnke kestusest pendli otseasendis. ∞ jaoks tuleb võtta väärtus, kus relatiivne viga oleks vähemalt suurusjärgu väiksem T^2 ja L relatiivsest veast. (L viga leitakse valemi (16) alusel.) Kas arvutamisel piisab lükati täpsusest?

C. Raskuskiirenduse määramine kõvera abil, mis seob füüsilise pendli võnkeperioodi pendli toetuspunkti asukohaga. Olgu füüsiliseks pendliks homogeenne silindriline varb, mille pikkus on l ja toetuspunkt punktis O (joon. 3).

Avaldame pendli redutseeritud pikkuse L varva pikkuse l ja kauguse x (toetuspunkti kaugus pendli otsast) kaudu ning uurime pikkuse L sõltuvust toetuspunkti asendist.

Steineri lause ja valemi (13) põhjal avaldub varva inertsimoment telje suhtes, mis läbib toetuspunkti O , valemiga

$$I = \frac{m l^2}{12} + m R^2 = \frac{m l^2}{12} + m \left(\frac{l}{2} - x \right)^2$$

ehk

$$I = \frac{m}{3} (l^2 - 3lx + 3x^2).$$

(See valem kehtib eeldusel, et varb on peenike ja varva

raadius a ei tule arvesse, võrreldes varva pikkusega. Kui aga varva ei saa pidada "lõpmatult peenikeseks", siis varva ristlõiget arvestava inertsimomendi valem on $I = \frac{m}{12} / 3a^2 + 4(l^2 - 3lx + 3x^2)/.$

Asetame saadud avaldise redutseeritud pikkuse valemisse ja arvestades, et $R = \frac{l}{2} - x$, saame

$$L = \frac{2}{3} \cdot \frac{l^2 - 3lx + 3x^2}{l - 2x}. \quad (17)$$

Redutseeritud pikkus L muutub $x = \frac{l}{2}$ puhul lõpmatult suureks, sest siis ühtib varva raskuskese toetuspunktiga ning pendel on ükskõikses tasakaalus. Suuruse L minimumi määrab võrrandi

$$6x^2 - 6lx + l^2 = 0 \text{ lahend.}$$

Selle võrrandi lahendid annavad x_{\min} väärtusteks

$$x_{1\min} = 0,21l,$$

$$x_{2\min} = 0,79l.$$

Valemist (9) on näha, et kui $L = L_{\min}$, siis $T = T_{\min}$.

Joonisel 4 on kujutatud kõverad, mis seovad pendli perioodi toetuspunkti asukohaga. Ühtlase varva puhul on kõvera mõlemad harud varva keskkoha suhtes sümmeetrilised.

Töö teostamiseks määrame varva võnkeperioodi esiteks toetusprisma asendi korral varva otsas, siis aga auk-augult varva keskauga suunas liikudes prisma kõikide teiste asendite jaoks. Perioodi määrame 30 täisvõnkest. Pikkuse x arvutame aukudevahelise kauguse järgi.

Samasuguseid mõõtmisi teeme ka varva teise otsa jaoks. T ja x jaoks saadud andmetest joonestame graafiku võnkeperioodi ja kauguse x vahelise sõltuvuse kujutamiseks (joon. 4). Minimaalsest suurematele perioodidele vastavad toetuspunkti neli võimalikku asendit. Need punktid moodustavad paarid AC ja BD .

Nimetatud punktide projektsioonide vahelised kaugused ($A'C'$ või $B'D'$) abstsisssteljel võrduvad pendli redutseeri-

tud pikkusega L antud perioodi T jaoks, punktid ise aga (A' ja C' või B' ja D') on vastavalt toetuspunktiks ja võnketsentriks (toetuspunkti ja võnketsentri kaugus ongi pendli redutseeritud pikkus).

Teades T ja L , saadakse valemist (9) raskuskiirendus:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}.$$

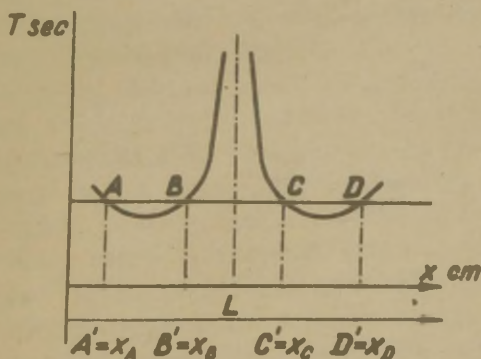
Arvutusi teeme mitme T ja L väärtuse puhul. Kui mõõtmisi sooritati ainult varva ühe otsa jaoks, siis redutseeritud pikkus L saadakse valemist

$$L = \ell - (x_A + x_B),$$

mis nähtub graafiku (joon. 4) vaatlemisest.

Kasutades saadud x väärtusi, arvutame L ka valemist (17) ning vastavate T väärtuste kaudu leiame raskuskiirenduse g valemist (9).

Võrdleme mõlemal meetodil saadud g väärtusi ning piirvigu.



Joon. 4.

5. Idseküsimusi.

1. Tuletada valem (13).
2. Tuletada lineaarse interpolatsioonivalem (16), lähtudes joonisest 4. Miks erinevad 200 võnke ajad pendli otseasendis liikuva prisma 2 asendi korral vähem kui vastavad ajad pendli pööratud asendis?
3. Kumba suuruse mõõtmise täpsust tuleks tõsta, kas T või L oma ülesandes B? (Otsustada selle järgi, kumb põhjustab suurema relatiivse vea g arvutamisel.) Kuidas seda teha?

6. Kirjandus.

1. Г. Е. Пустовалов. Учебное пособие по физическому практикуму студентов заочного и вечернего отделений естественных факультетов Московского госуниверситета. М., 1959, стр. 29-31.
2. С. П. Стелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 401-414.
3. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1966, стр. 186-189.

18. SUNDVÕNKUMISTE UURIMINE POHLI PÖÖRDPENDLIGA.

1. Tööülesanne.

Mehhaanilise süsteemi sundvõnkumise resonantsikõverate määramine mitmesuguse sumbuva korral.

2. Töövahendid.

Pohli pöördpendel, sekundkell, stabilisaator, transformaator, autotransformaator, ampermeeter, reostaat, alaldi.

3. Teoreetilised alused.

Igal võnkumisvõimelisel kehal on üks või mitu omavõnkesagedust, millega ta hakkab võnkuma ühekordse tõuke järel. Tegelikult saab aga iga niisugust keha võnkuma panna mistahes sagedusega. Sel juhul kõneldakse sunnitud võnkumistest e. sundvõnkumistest.

Käesolevas töös uuritakse pöördpendli sundvõnkumisi, mida põhjustab ajas harmooniliselt muutuv väline jõud. Väliste jõu moment $M_1 = M_0 \sin \omega_1 t$, kus M_0 on väliste jõumomentide amplituud ja ω_1 selle jõu ringsagedus. Tasakaaluasendist väljaviidud pöördpendlile mõjub ka tasakaaluasendi poole pöörav, vedru elastsusest tingitud jõumoment $M_2 = -D\alpha$, kus α on pöördenurk ja D võrdetegur. Suurust D nimetatakse keerdjäikuseks ja ta on võrdne momendiga, mis mõjub pöördenurga puhul 1 radiaan. Pöördpendlile mõjub ka hõõrdumisest tingitud takistav jõud. Takistav jõud on võrdeline nurkkiirusega. Seega takistav pöördemoment $M_3 = -h \dot{\alpha}$, kus h on hõõrdetegur.

Neist andmeist lähtudes võime kirjutada ketta liikumise diferentsiaalvõrrandi

$$I\ddot{\alpha} = -D\alpha - h\dot{\alpha} + M_0 \sin \omega_1 t, \quad (1)$$

kus I on ketta inertsimoment.

Selle võrrandi täielik lahend on järgmine:

$$\alpha = A e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + B \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (2)$$

kus $\delta = h/2I$, ω_0 - omavõnkumiste sagedus, A ja φ_0 - omavõnkumiste amplituud ja algfaas, B - sundvõnkumiste amplituud, φ - sundvõnkumiste ja välise jõumomendi faaside vahe.

Teatud aja möödudes võnkumiste algusest omavõnkumised lakkavad, jäävad sinult sundvõnkumised:

$$\alpha = B \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (3)$$

kus

$$B = \frac{M_0}{I \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega_1^2}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2 \omega_1 \delta}{\omega_0^2 - \omega_1^2}, \quad (5)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I}}.$$

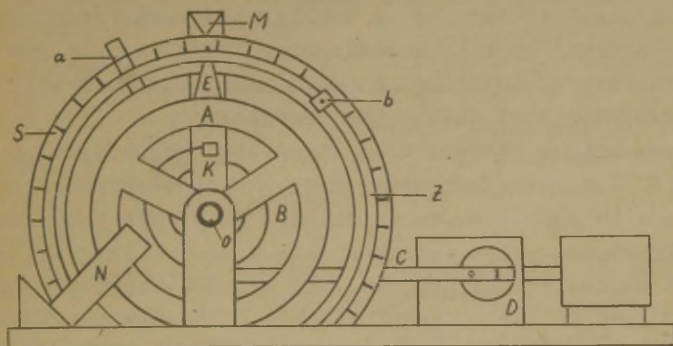
Võrrandist (4) on näha, et sundvõnkumiste amplituud B omandab maksimaalse väärtuse, kui on rahuldatud tingimus $\omega_1^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2$. Sellist olukorda nimetatakse resonantsiks.

Võrrandist (5) on näha: 1) kui $\omega_1 \ll \omega_0$, siis

$\varphi \approx 0$, s.t. sundvõnkumiste faas langeb peaaegu kokku välise jõu faasiga; 2) kui $\omega_1 \approx \omega_0$, siis $\varphi \approx -\frac{\pi}{2}$, s.t. resonantsi korral sundvõnkumiste faas jääb maha veerand perioodi võrra välise jõu faasist; 3) kui $\omega_1 \gg \omega_0$, siis $\varphi \approx -\pi$, s.t. sundvõnkumiste faas jääb maha poole

perioodi võrra välise jõu faasist.

4. Riista kirjeldus.



Joon. 1.

Käesolevas töös kasutatakse võnkumiste uurimiseks Pohli riista (joon. 1), mille võnkuva osa moodustab horisontaaltelje O ümber pöörduv metallketas A. Ketta külge on kinnitatud spiraalvedru B, mille teine ots on ühendatud kangiga K. Kangi K abil antakse kettale pöörde-moment. Kangi teine ots on ühendatud varvaga C, mis oma-korda on ühenduses ekstsentriluga D. Ekstsentril D on kinnitatud elektrimootori reduktori ketta külge ja paneb mootori töötamisel kangi K otsa edasi-tagasi liikuma. Muutes ekstsentriliku ja reduktori ketta telje vahelist kaugust, muutub kangi võnkeamplituud, see põhjustab oma-korda pöördpendli võnkeamplituudi muutust. Võnkeampli-tuudi mõõtmiseks on kettale kinnitatud osuti E ja selle taha skaala S. Välise jõu sagedust saab muuta, muutes mootori pöörete arvu (kas reostaadi või autotransformaa-toriga).

Ketta võnkumiste sumbuvalt saab muuta elektromagne-

ti N abil, mille pooluste vahel liigub ketas. Magnetväljas liikumisel tekivad kettas pöörisvoolud, mis pidurdavad ketta liikumist seda rohkem, mida tugevam on magnetväli. Magnetvälja tugevust saab muuta voolutugevuse muutmisega magneti mähistes.

Faasinihke mõõtmiseks on Pohli riist varustatud kahe liikuva kontakti ja kahe neonlambiga. Skaalal S on üks liikuv kontakt a. Kui kangi K külge kinnitatud osuti M puudutab kontakti a, süttib üks neonlamp.

Teine liikuv kontakt b on kinnitatud spetsiaalsele rõngale Z. Kui ketta küljes olev osuti puudutab vedrukontakti b, siis süttib teine neonlamp. Et tagada ketta häireteta liikumist, võib vedrukontakti b asemel kasutada ka optilist kontakti. Optiline kontakt koosneb valgusallikast ja fototakistist. Valguakiir on juhitud fototakistile, Retkel, mil osuti B satub valguskiire teele, suureneb järsult fototakisti takistus, sellest põhjustatud pinge muutus käivitab rele, mis lüübib sisse neonlambi.

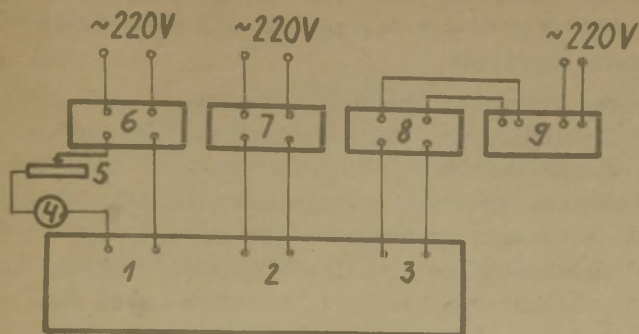
5. Töö käik.

Koostame skeemi vastavalt joonisele 2 .

①. Amplituudkõverate saamine. Kõverat, mis kirjeldab sundvõnkumiste amplituudi sõltuvust välise jõumomendi sagedusest, nimetatakse amplituudkõveraks (ka amplituudresonantsikõveraks). Töös tuleb leida amplituudkõverad kolmel erineval sumbuvasel. Kõigepealt määrame väljalülitatud elektromagnetil korral pöördpendli omavõnkesageduse ω_0 . Seejärel lülime elektromagnetil sisse (jälvida, et reostadi takistus oleks maksimaalne!) ja reguleerime voolutugevuse umbes 0,3 A-le. Määrame sumbuvasteguri valemi

$$\ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \delta T$$

järgi. Selleks mõõdame rea omavõnkumise järjestikuseid amplituude, arvutame δ mitmest määratud väärtusest keskmise. Enne katse algust tuleb kontrollida, kas pendli tasa-



Joon. 2.

1 - elektromagneti lüliti, 2 - neonlampide lüliti, 3 - mootori lüliti, 4 - ampermeeter, 5 - reostaat, 6 - alaldi, 7 - transformaator, 8 - autotransformaator, 9 - stabilisaator.

kaaluasendi korral tema osuti on skaalal nulljaotisel või mitte. Vajaduse korral arvestame nulli parandi või loeme mõlemapoolsed amplituudid ja nende summa jagame kahega.

Nüüd lülitame sisse elektrimootori. Muutes mootori pöörete arvu^x, leiame sundvõnkumiste suurima amplituudi (vajaduse korral muudame sundiva jõumomendi amplituudi). Määrame ka vastava sundiva momendi sageduse ja kontrollime valemit $\omega_1^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2$.

Sel kombel mõeldame veel kuus väärtuste paari: väli- se jõumomendi sagedus - sundvõnkumiste amplituud. Kolm väärtuste paari leiame sagedustel, mis on väiksemad oma võnkesagedusest ja kolm suurematel sagedustel.

Suurendame sumbuvusust ja mõeldame vajalikud suurused veel kahe amplituudkõvera konstrueerimiseks. Saadud eks-

^x Pärast pöörete arvu muutmist oodata võnkumiste stabiliseerumist.

perimentaalsed andmed tuleb esitada graafikuna. Abstsiss-
teljele kantakse suurus ω_1/ω_0 ja ordinaatteljele - sund-
võnkumiste amplituud.

(2) Faasikõverate saamine. Graafikut, mis näitab faa-
sinihke φ sõltuvust välise jõumomendi sagedusest, nime-
tatakse faasikõveraks.

Faasinihke mõõtmiseks paigutame kontakti a selliselt
et osuti M puudutaks kontakti hetkel, mil kang K on saa-
vutanud amplituudasendi (välise jõumomendi väärtus on mak-
simaalne). Liigutades kontakti b. võime leida tema jaoks
sellise asendi, et neonlambikesed süttivad samaaegselt.
Faasinihke φ leiame sellisel juhul valemist

$$\varphi = \arccos \frac{x}{x_0}, \quad (6)$$

kus x on kontakti b asend ja x_0 osuti E näit ampli-
tuudasendis.

Enne mõõtmiste alustamist tuleb kontrollida, et osuti
E oleks tasakaalu korral skaala S nulli kohal ja osuti
M annaks liikumisel nullist mõlemale poole võrdseid häl-
beid. Kui esimene nõue ei ole täidetud, tuleb spiraalvedru
reguleerida nii, et osuti E oleks nulli kohal. Teine nõue
saab olla mitte täidetud juhul, kui osuti M on kõverdu-
nud. Vea kõrvaldamiseks tuleb osutit ettevaatlikult painu-
tada.

Faasikõverad leiame samal viisil sumbuvalt kui amplituud-
kõverad. Mõõtmine toimub järgmiselt. Lülitame tööle elekt-
romagneti, elektrimootori ja neonlambid. Muutes mootori
pöörete arvu, leiame sundvõnkumiste suurima amplituudi ja
vastava sundiva momendi sageduse.

Liigutades kontakti b leitakse olukord, mil lambi-
kesed süttivad samaaegselt ja valemist (6) arvutatakse faa-
sinihke φ . Analoogiliselt mõõdetakse veel kuus väärtuste
paari: sundiva momendi sagedus - faasinihke. Kolm paari tu-
leb leida väiksematel sagedustel kui omavõnkesagedus ja
kolm suurematel.

Saadud tulemused esitame graafikuna. Abstsisssteljele

6. Lisaküsimusi.

1. Miks tuleb enne amplituudi määramist antud sündival sagedusel oodata võngete stabiliseerumist?
2. Näidata, et sündvõnkumiste amplituud on maksimaalne, kui $\omega_1^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2$?
3. Tuletada valem (6).

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 158-162.
2. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 418-427.
3. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., изд. Ф-М., 1963, стр. 619-632.
4. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1966, стр. 203-208.

19. PINGUTATUD TRAADI OMAVÖNKUMISE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Seisvate lainete saamine, valemi (4) katseline kontrollimine ning laine kuju uurimine.

2. Töövahendid.

Vibraator seisval statiivil, kaaluvihid, tükk uuritavat traati, helisagedusgeneraator, trafo 220/127 V, pikk mõõtjoonlaud, analüütilised kaalud.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Mõlemast otsast kinnitatud ning pingutatud traadis (keeles) võivad pärast selle tasakaaluasendist väljavii- mist tekkida seisvad lained. Keele otstes on alati sõlmed. Keele pikkus l sisaldab ikka täisarv $\frac{\lambda}{2}$ seisvaid lai- neid. Sama amplituudiga võnkuvate keele naaberpunktide vahekaugus on võrdne kulgeva laine poollaine pikkusega. Seepärast on

$$\frac{\lambda}{2} \cdot n = l, \quad (1)$$

kus $n =$ täisarv (1, 2, 3 jne.).

Lainepikkus on seotud deformatsiooni impulsi levimis- kiirusega v piki keelt ning keele võnkesagedusega f :

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

Seepärast:

$$f = \frac{n}{2l} \cdot v. \quad (2)$$

Valem (2) määrab keele omavõnkumiste e. normaalvõnkumiste sagedused. Praktiliselt saab keelt võnkuma panna ainult ühe sagedusega, nii et keelel kujuneb seisv laine, algtingimuste sobiva valikuga. Tõmmates seisvat keelt keskpunktist risti keele sihiga, tekitatakse keele võnkumine põhisagedusega, mille puhul $n = 1$. Tõmmates $\frac{1}{4}l$ kauguselt keele otsast ühes suunas risti keelega, $\frac{3}{4}l$ kauguselt samast otsast vastassuunas, tekitatakse esimene ülemsagedus, $n = 2$. Keelele mahub siin 2 seisva laine paisu. Tavaliselt võngub keel aga hoopis keerulisemalt, keelel pole nii selgesti märgatavat seisva laine pilti. Sel juhul kujutab keele võnkumine põhisageduse ja paljude ülemsageduste liitumisel tekkinud liitvõnkumist. Et n võib olla ükskõik milline positiivne täisarv, siis on selge, et keelel on lõpmata arv omavõnkumise ülemsagedusi. Ülemsageduse numbri n suurenedes kahaneb aga keele võnkeamplituud kiiresti.

Katse näitab, et deformatsiooni impulsi levimise kiirus piki keelt sõltub keele pingest T^* ja keele materjali lineaartihedusest g :

$$v = \varphi(T, g). \quad (3)$$

Kasutades dimensioonide meetodit, võib sellele seosele anda määratud kuju.

Tõepoolest, olgu

$$v = \varphi(T, g) = T^m g^n.$$

$$\text{Et } [T] = MLT^{-2}, \quad [g] = ML^{-1}, \quad [v] = LT^{-1}, \text{ siis}$$

$$(LT^{-1}) = (MLT^{-2})^m \cdot (ML^{-1})^n.$$

Võrdsustades võrrandi mõlema poole vastavad astmenäitajad, saame

* Pinge T all mõeldakse siin traadi ristlõikes mõjuvat jõudu (mitte jõudu pinnaühiku kohta). Seda mõistet rakendatakse alati, kui võib jätta arvestamata traadi ristlõike diameetri, s.t. lugeda teda lõpmata peenikeseks.

$$\begin{aligned} 1 &= m - n \\ 1 &= 2m \\ 0 &= m + n. \end{aligned}$$

Siit

$$m = \frac{1}{2}$$

ja

$$n = -\frac{1}{2}.$$

Seega

$$v = \varphi(T, \varrho) = T^m \varrho^n = \sqrt{\frac{T}{\varrho}}.$$

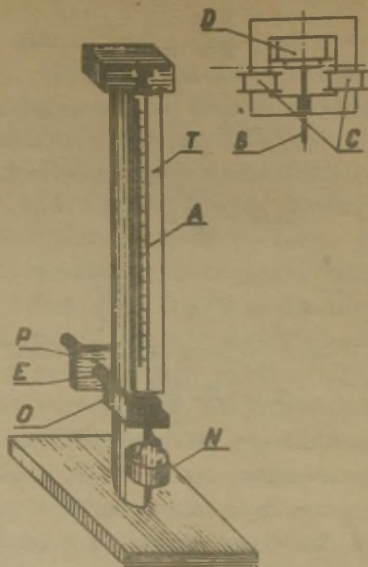
Lõplik valem keele omavõnkesageduste jaoks on järelikult

$$f = \frac{n}{2\ell} \sqrt{\frac{T}{\varrho}}. \quad (4)$$

Keeles omasagedustega võnkumiste tekitamiseks kasutatakse antud töös resonantsi meetodit. Pingestatud keelt ergutatakse ühest otsast ajas sinusoidaalse, keelega risti suunatud jõuga. Tekkinud laine peegeldub keele teisest otsast, tekib seisev laine. Kui ergutava jõu sagedus ühtib ühega omavõnkumiste sagedustest, mahub keelele täpselt täisarv kulgeva laine poollainepikkusi ja keelel tekib suure amplituudiga seisev laine. Keel resoneerib sundiva jõu sagedusega.

4. Katseseadme ehitus.

Traat A (joon. 1) on kinnitatud vertikaalselt skaala T ees. Väline perioodiliselt mõjuv jõud rakendatakse traadile selle ülemises otsas, kus traat on kinnitatud õhupiluga elektromagneti magnetahela osaks oleva raudkeelekesse B külge. Õhupilus tekitatakse vahelduv magnetväli poolide C abil, mida toidetakse vahelduvvooluga helisagedusgeneraatorist. Võnkeamplituudi suurendamiseks rakendatakse magnetahelas eelmagneetimist. Seda tehakse pooli D abil, mida toidetakse alalispingega. Alalispinge saadakse 127 V vahelduvpinge alaldamisel germaaniumdiodiga ja silumisel elektrolüüt-kondensaatoriga.



Joon. 1.

Traadi A alumine ots on kinnitatud kangi E külge. Kang pöörduv ümber telje punktis O. Kangi sama otsa külge on kinnitatud anumake N vihtide jaoks, teises otsas on reguleerimiskruvid kangi tasakaalustamiseks enne vihtide asetamist anumasse.

Keele võnkumise pildi paremaks jälgimiseks valgustatakse teda tagant lumineestsentslambiga, mida toidetakse 220 V vahelduvpingega. Silmade kaitseks tuleb kasutada kaitseprille!

Kogu seadeldis on monteeritud statiivile, mis seatakse vertikaalseks ümmarguse vesiloodi järgi.

5. Töö käik.

Seadnud statiivi vertikaalseks, tasakaalustame kangi E ja lülime seadmed sisse. Anumasse asetame vihte (25 kuni 150 g piirides). Maksimaalse sõlmede arvuna võib saada 11.

Mõõdame keele pikkuse. Kas mõõta tuleb vibraatori keelest või võnkuva traadi ülemise otsa kinnituskohast, tuleb üliõpilasel endal kindlaks teha. Vaatlustel kasutatavate sageduste arvu määrab töö juhendaja.

Teades T , ℓ , n ja f , määrame valemist (4) lineaartiheduse.

Lisatraadi abil määrame keele lineaartiheduse lihtsa mõõtmise ja kaalumise teel.

Keele põhisageduse ($n = 1$) ja esimese ning kolmanda ülemsageduse ($n = 2, 4$) korral kontrollime, kas laine kuju on sinusoid. Selleks mõõdame skaala T abil keele punktide võnkeamplituudid vähemalt kümnes seisva laine punktis ja ehitame graafiku, mis väljendab selle amplituudi sõltuvust keele punkti koordinaadist. Samas teljestikus joonestame sinusoidi, mille amplituud võrdub eksperimentaalse kõvera amplituudiga. Võrdleme kõveraid.

6. Täiendavaid küsimusi.

1. Tutvunud kirjanduse (4) abil dimensioonide meetodiga, selgitada, miks antud juhul funktsioon $v = (T, \varphi)$ peab avalduma just argumentide astmefunktsioonina $v = T^m \varphi^n$. On ju võimalikud ka teistsugused funktsioonid (näit. trigonomeetrilised, eksponent-, logaritmi- jne.).

2. Miks tuleb kang E tasakaalustada enne töö algust?

3. Kas vibraatori magnetahela eelmagnetimisel on ainult võnkeamplituudi suurendamise otstarve?

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 171-176.
2. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., изд. Ф-М, 1963, стр. 674-689.

3. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 432-439.
4. Б. Ю. Коган. Размерность физической величины. М., "Наука", 1968.

20. HÄÄLELAININE PIKKUSE JA HÄÄLE KIIRUSE MÄÄRAMINE GAASIS.
 SUHTE c_p/c_v MÄÄRAMINE.

Teoreetiline sissejuhatus.

Heli kujutab endast perioodiliselt muutuvate elastsete deformatsioonide (surve ja venitus, tihendus ja hõrendus) levimist aines. Seega on heli lainetusprotsess, teda iseloomustavad lainepikkus, sagedus, laine levimise kiirus jt. lainetusprotsessidele omased suurused.

Laine levimiskiiruse arvutamiseks võib vaadelda üksiku elastse impulsi levimist aines. Elastsest ainest varva ühele otsale mõjuva väga lühiajalise varva telje sihilise jõu mõjul nihkuvad varva otsmised kihid, seal asuvad aineosakesed saavad teatud kiiruse; varva otsas tekib kitsas kokkusurutud (või väljavenitatud, olenevalt jõu mõjumise suunast) kiht. Tekkivate elastsusjõudude toimel peatuvad äärmised kihid ja hakkavad liikuma järgnevad - osakeste nihete, kiiruste ja deformatsiooni impulss levib edasi piki varba.

Vaatleme konkreetset surve impulssi.

Olgu deformeeritud kihi paksus Δx , varva ristlõike pindala S (joon. 1). Varva aine tihedus deformeerimata osas olgu ρ , deformeeritud osas aga ρ' . Liikuva tihenduse mass

$$\Delta m = \Delta \rho S \Delta x,$$

kus $\Delta \rho = \rho' - \rho$ - "tihenduse tihedus".



Joon. 1.

Liikumise hulk, mida impulss kannab:

$$\Delta(mv) = v \cdot \Delta m = Sv \Delta \rho \Delta x,$$

kus v - impulsi levimise kiirus. Mitte väga suurte deformatsioonide korral tiheduse muutus $\Delta \rho$ ("tihenduse tihedus") on võrdeline suhtelise pikenemisega - deformatsiooniga

$$\varepsilon = \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x} :$$

$$\Delta \rho = \varepsilon \rho$$

Siit
$$\Delta(mv) = Sv \varepsilon \rho \Delta x.$$

Liikumise hulga muutumise kiirus on teatavasti võrdne mõjuva jõuga, seega

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \quad (1)$$

$$= Sv \varepsilon \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} = S \varepsilon \rho v^2.$$

Hooke'i seadusest

$$F = \varepsilon ES.$$

$$\varepsilon ES = S \varepsilon \rho v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

Seega elastse impulsi levimise kiirus tahkes aines on määratud aine elastsusmoduli ja tihedusega, ei olene deformatsiooni suuruselt (mitte eriti suurte deformatsioonide korral, kui kehtib veel Hooke'i seadus ja eeldus $\Delta \rho = \varepsilon \rho$).

Tihenduse impulsi levimisel gaasis ilmneb aga impulsi levimiskiiruse otsene sõltuvus gaasi tihedusest impulsis. Ainult nõrkade impulsside (mitte eriti tugevate helide) korral, kus tiheduse muutuse impulsis võib arvestamata jätta, on heli levimise kiirus igale gaasile omane suurus ja oleneb gaasi temperatuurist.

Tehes läbi eelnevaga analoogilise tuletuskäigu, saame:

$$v^2 = \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \quad (3)$$

(kuna $F = S \Delta p$, kus Δp - rõhu muutus impulsis, $\frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = S \Delta \rho v^2$). $\frac{\Delta p}{\Delta \rho} \approx \frac{dp}{d\rho}$ arvutamiseks tuleb lähtuda sellest, et kiires impulsis toimuv kokkusurumine on adiabaatiline ja allub võrrandile

$$pV^\alpha = \text{const},$$

kus $\alpha = \frac{c_p}{c_v}$ - gaasi isobaarilise ja isokoorilise erisoojuse suhe.

Et $V \sim \frac{1}{\rho}$, siis

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho^\alpha} &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha}, \\ p &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha} \rho^\alpha, \\ \frac{dp}{d\rho} &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha} \cdot \alpha \cdot \rho^{\alpha-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Siin p_0 ja ρ_0 on gaasi rõhk ja tihedus häirimata osas, p ja ρ aga tihenduses. Siit ongi näha, et impulsi levimise kiirus sõltub gaasi tihedusest tihenduses ρ . Ainult kui $\rho \approx \rho_0$ (väga väikesed deformatsioonid):

$$\frac{dp}{d\rho} = \alpha \frac{p_0}{\rho_0}. \quad (5)$$

ρ_0 võib arvutada gaasi oleku võrrandist

$$\begin{aligned} p_0 V &= \frac{m}{\mu} RT; \\ \rho_0 &= \frac{m}{V} = \frac{p_0 \mu}{RT}. \end{aligned}$$

$$v = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \quad (6)$$

Käesoleva töö eesmärgiks on heli levimiskiiruse eksperimentaalne määramine gaasis kahel meetodil ja valemist (6) erisoojuste suhte leidmine.

A. Seisvate lainete meetod.

1. Tööülesanne.

Häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramine gaasis seisvate lainete meetodil. Gaasi erisoojuste suhte γ arvutamine.

2. Töövahendid.

Mikrofoni ja telefoniga varustatud muudetava pikkusega resonantsitoru, helisagedusgeneraator, ostsilloskoop, termomeeter (toatemperatuuri piirkonnas mõõtmiseks).

3. Meetodi teooria.

Heli levimiskiiruse eksperimentaalseks määramiseks aines võib kasutada seisvate lainete meetodit. Kui varva, mille pikkus on ℓ , üht otsa perioodiliselt deformeerida (kokku suruda ja venitada) sinusoidaalselt muutuva jõuga, siis levib varvas sinusoidaalne tasapinnaline elastne laine, mis peegeldub varva teiselt otsalt; need kaks lainet interfereerudes moodustavad seisva laine. (Seisev laine võib üldiselt tekkida kahe mistahes sama sageduse ja võrdsete amplituudidega vastassuunalise tasalaine interfereerumisel.) Kui varva teine ots on kinnitatud (peegeldumine toimub tihedamalt keskkonnalt), siis muutub peegeldumisel osakeste nihete ja kiiruste laine faas π võrra. Levi-va ja peegeldunud laine võrrandid on vastavalt

$$y_1 = Y_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

$$y_2 = -Y_0 \sin \omega \left(t - \frac{2\ell - x}{v} \right).$$

Seisva laine võrrand

$$y = 2 Y_0 \sin \omega \frac{\ell - x}{v} \cos \omega \left(t - \frac{\ell}{v} \right). \quad (7)$$

Siin y (y_1, y_2) on võnkuvate ainepunktide nihe tasakaaluasendist ajamomendil t ; x on selle ainepunkti kaugus varva otsast, kuhu on rakendatud sinusoidaalne jõud; Y_0 - leviva laine amplituud, v - laine levimise kiirus, ω - mõjuva jõu (ka laine) ringsagedus.

Seisvas laines võnkuvate ainepunktide amplituud ($Y = 2 Y_0 \sin \omega \frac{\ell - x}{v}$) muutub ruumis sinusoidaalselt. Esinevad punktid, mis üldse ei võngu (sõlmed), ja punktid, mis võnguvad maksimaalse amplituudiga (paisud). Sõlmpunktide koordinaadid saab arvutada tingimusest

$$\sin \omega \frac{\ell - x}{v} = 0;$$

$$\omega \frac{\ell - x}{v} = k\pi,$$

$$x = \ell - \frac{k\pi v}{\omega} = \ell - k \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Siin λ on häälelaine pikkus. Samuti võib arvutada paisupunktide koordinaadid. On näha, et nii paisud kui sõlmed korduvad varvas iga poole laine pikkuse tagant:

$$x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda}{2}.$$

Kas seisva laine amplituud oleneb ka varva pikkusest ja kuidas käituvad varva otsad?

On näha, et kinnitatud otsas ($x = \ell$) on sõlmpunkt. Teise otsa võnkeamplituud on määratud aga mõjuva (sundiiva) jõuga. Kui varva pikkus on selline, et sellesse otsa peaks tulema näiteks seisva laine pais ($\ell = k \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$), siis aineosakeste maksimaalne võnkeamplituud varvas ongi määratud võnkeamplituudiga selles otsas. Mida lähemal asub aga varva see ots sõlmpunktile ($\ell \approx k \frac{\lambda}{2}$), seda suurem on võnkeamplituud paisudes. Kui $\ell = k \frac{\lambda}{2}$ ja varva mõlemas otsas on sõlmpunkt, siis on paisukohtades antud sundiva jõu jaoks maksimaalne võnkeamplituud (see kasvaks lõpmatult, kui oleks ideaalne keskkond, kus võnkumised ei

sumbu). Amplituudi suurenemise põhjuseks on ka asjaolu, et korduvalt peegeldunud lained on kõik samas faasis ja tugevdavad üksteist - sellise pikkusega varb resonanceerib antud sagedusele.

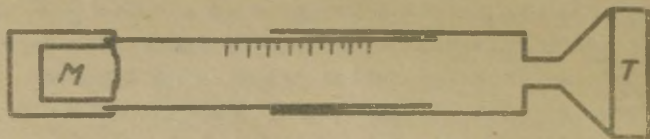
Eelnevast selgub lihtne meetod häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramiseks gaasides. Tõepoolest, tekitades mõlemast otsast suletud, muudetava pikkusega gaasisambas kindla sagedusega häälelained (sulgedes metalltoru ühe otsa näit. telefoni membraaniga), võib leida mitu samba pikkust, mille juures gaasisambas resonanceerib antud sagedusega. Kahe sellise, teineteisest kõige vähem erineva samba pikkuse vahe on $\frac{\lambda}{2}$. Hääle kiiruse saab leida valemist

$$v = \lambda f. \quad (9)$$

Valemist (6) saab leida ka gaasi erisoojuste suhte α , määranud eelnevalt temperatuuri.

4. Katseseadme kirjeldus.

Häälelaine pikkuse mõõtmiseks antud katses kasutame spetsiaalset muudetava pikkusega resonantsitoru (joon. 2). Toru ühest otsast juhitakse väikese torukese kaudu sisse heli telefoni T membraanilt, teine ots on suletud mikrofooni M membraaniga. Resonantsitoru ise koosneb kahest pisut erinevate diameetritega torust; peenem toru käib jämedama sisse. Kahe stutseri kaudu saab juhtida torust läbi uuritava gaasi voolu; õhu korral stutsereid ei kasutata.



Joon. 2.

Peenemale torule on peale kantud millimeeterskaala, mis võimaldab mõõta otseselt samba kahe resoneeriva pikkuse erinevust, mõõtmata samba enda pikkust. Skaala on valmistatud metallmõõtjoonlaudadele esitatavatele nõuete kohaselt.

Heli tekitatakse telefoniga, mida ergutatakse helisagedusgeneraatoriga. Resonantsi kindlakstegemiseks kasutatakse mikrofoni, mis muudab keskkonna (gaasi) elastsed võnkumised elektrilisteks võnkumisteks (vahelduvpingeks). Resonantsi olukorras tekib maksimaalse amplituudiga vahelduvpinge. Mikrofonis tekkinud vahelduvpinget mõõdetakse ostsilloskoobi abil.

Helisagedusgeneraatori ja ostsilloskoobiga tutvumiseks tuleb kasutada riistade tehnilisi juhendeid.

5. Töö käik.

1. Ühendame telefoni helisagedusgeneraatoriga. Mikrofon ühendame ostsilloskoobi Y-telje sisendklappidega. Lülime mõlemad aparaadid võrku, laseme soojeneda 5 - 10 minutit. Reguleerime telefonile antava pinge küllalt suureks, nii et heli on üle toa selgesti kuulda. Seejärel reguleerime ostsilloskoobi laotusgeneraatori sageduse ja sünkronisatsiooni amplituudi parajaks, nii et ekraanil tekiks 5 - 10 sinusoidi täisperioodi. Vähendame helitugevust miinimumini (et mitte segada teisi ruumisviibijaid), nii et sinusoid ekraanil oleks siiski vähemalt ca 5 cm amplituudiga.

2. Lainepikkuse määramiseks tuleb leida gaasisamba pikkuste vahe kahe resonantsiolukorra puhul. Resonantsiolukorra määrame, hinnates vahelduvpinge amplituudi maksimumi ostsilloskoobi ekraanil silma järgi. Et see maksimum ei ole toru pikkuse muutmisel mitte eriti teravalt väljenduv, tekib skaalal helitugevuse maksimumile vastava näidu määramisel juhuslikku laadi viga. Selle hindamiseks peame määrama lainepikkuse vähemalt 5 korral. Selleks on aga jälle mitu võimalust - võib määrata skaala näidud antud sagedusega heli korral kõikvõimalikes resonantsiolukordades, võib aga korraldada katset ka 2 resonantsiolukorra puhul mitu korda. Sobi-

vaima meetodi valikul tuleb lähtuda mõõtmistulemuse piirvea miinimumi nõudest.

3. Määratud lainepikkuse vähemalt 5 erineva sageduse korral ja gaasi temperatuuri t , arvutame hääle kiiruse v_t sellel temperatuuril. Arvutame hääle kiiruse 0°C juures valemist

$$v_0 = \frac{v_t}{1 + 0,004 t} .$$

Arvutame erisoojuste suhte α .

B. Interferentsimeetod.

1. Tööülesanne.

Häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramine gaasis interferentsimeetodil. Gaasi erisoojuste suhte α määramine. *kapa*

2. Töövahendid.

Mikrofoni ja telefoniga varustatud Quincke toru, helisagedusgeneraator, ostsilloskoop, termomeeter.

3. Meetodi teooria ja katseseadme kirjeldus.

Kahe või mitme ühesuguse sagedusega lainetuse liitumist keskkonnas nimetatakse interferentsiks. Liitugu punktidest A ja B väljunud lainetused punktis C (joon. 3). Kui osakeste võnkumised mõlemas laines on samasihilised ja lainellikad koherentsed, siis punkti C võnkeoleku saame liidetavate võnkumiste algebralisel liitmisel.

$$y = y_1 + y_2,$$

kus

$$y_1 = a_1 \sin \omega \left(t - \frac{x_1}{v} \right),$$

$$y_2 = a_2 \sin \omega \left(t - \frac{x_2}{v} \right).$$

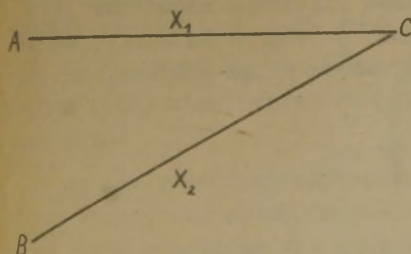
Lilivõnkumiste amplituudi jaoks saame avaldise

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos 2\pi \frac{x_1 - x_2}{\lambda}}$$

Võnkumine toimub minimaalse amplituudiga, kui

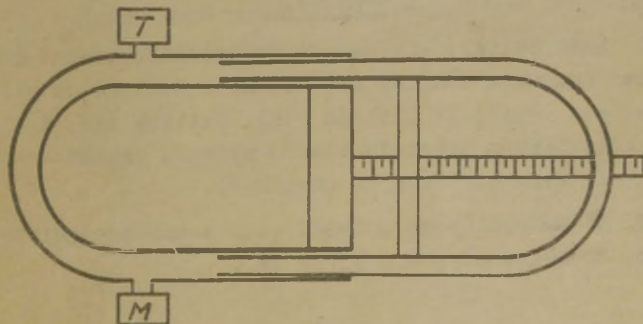
$$x_1 - x_2 = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

See valem ongi aluseks laine-pikkuse määramisel.



Joon. 3.

Koherentsete lainete tekitamiseks, milles osakeste võnkumised oleksid samasihilised, võib kasutada Quincke toru (joon. 4). Ühe painutatud metalltoru otsad käivad vabalt teise toru otste sisse; torud koos moodustavad suletud ringkanali. Väiksema diameetriga toru saab teise seest rohkem või vähem välja tõmmata (tromboonisarnane süsteem), nihke suurus asendist, kus see toru on kõige sügavamal, on millimeeterskaala abil mõõdetav.



Joon. 4.

Telefonist T tulev helivoog jaguneb kaheks koherentseks laineaks, mis, läbinud ringkanali erinevad harud, interfereeruvad, andes mikrofoni M kohal interferentsi maksimumi, minimumi või mingi osakeste vahepealse amplituudiga võnkeoleku. Olgu süsteem ehitatud nii, et väljatõmmatava toru kõige sügavamal asendis, mis vastab skaala nullnäidu-

le, on ringkanali mõlema haru pikkused võrdsed. Siis on lainete käiguvahe selles asendis 0 ja mikrofoni kohal on interferentsi maksimum. Esimese miinimumi saamiseks peab siis kanali üht haru pikendama $\frac{\lambda}{2}$ võrra. On selge, et kui selleks tuleb toru pikkuse A_1 võrra välja tõmmata, kehtib seos:

$$2 A_1 = \frac{\lambda}{2},$$

millest

$$v = 4 A_1 f,$$

kus $f = \frac{v}{\lambda}$ on heli sagedus. Üldiselt, n -nda miinimumi saamiseks vajalik nihe A_n on seotud lainepikkusega:

$$A_n = (2n-1) \frac{\lambda}{4} \quad (11)$$

ja kiirusega

$$v = \frac{4}{2n-1} A_n f. \quad (12)$$

4. Töö käik.

1. Kontrollime, kas skaala nullseisule vastab interferentsi maksimum (kuidas seda teha?). Kui see on nii, võime kasutada valemeid (11) ja (12). Kui see aga ei ole nii, tuleb lainepikkus arvutada skaala näitude vahet kahe maksimumi või miinimumi korral (kuidas?).

2. Mõõtmised teeme juhendi osas A toodud juhiste kohaselt. Arvutame λ , v_t , v_0 ja se .

C. Idsaküsimusi ja -ülesandeid.

1. Selgitada elastse impulsi peegeldumist tihedamalt ja hõredamalt keskkonnalt (vastavalt varva, õhusamba jne. kinnitatud ja lahtiselt otsalt). Faasimuutused nihete, kiiruste ja deformatsioonide impulsis.

2. Näidata, et vordus $\Delta q = \epsilon q$ kehtib väikeste deformatsioonide korral. Selleks arvutada $\Delta q = q' - q$ tihenduse pikkuse Δx ja $\Delta(\Delta x)$ kaudu.

3. Tuletada seisva laine võrrand lahtise otsaga varva jaoks, leida tingimus varva pikkuse jaoks, millal saabub resonants.

4. Kas mikrofoni membraani tuleb vaadelda kui liikumatut tükki, mis suleb õhusamba otsa, või on ta oma vetruvuse tõttu vaadeldav õhu suhtes hõredama keskkonnana, s.o. kas siis, kui mikrofoni tekib maksimaalne pinge, on membraani kehal sõlm või pais? Teha see kindlaks eksperimentaalselt.

5. Madalatel sagedustel osutub pingakõvera kuju ostsilloskoobil moonutatuks. Kas on see helisagedusgeneraatori, ostsilloskoobi, telefoni või mikrofoni viga?

D. Kirjandus.

1. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., изд. I-M, 1963, стр. 490-500, 592-601, 693-705, 727-731, 741-747.

21. POISSONI KOEFITSIENDI MÄÄRAMINE ELASTSUSMOODULI JA NIHKEMOODULI KAUDU.

1. Tööülesanne.

Poissoni koefitsiendi määramine nihkemooduli ja elast-
susmooduli kaudu.

2. Töö põhimõtte ja teooria.

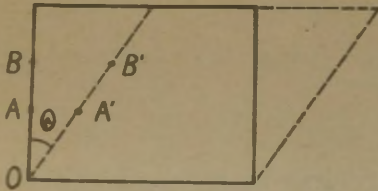
Kõiki reaalseid kehi on võimalik deformeerida, kus-
juures deformatsiooni all mõistetakse keha osakeste nihku-
mist üksteise suhtes või nendevahelise keskmise kauguse
muutumist. Lihtsaimad deformatsioonid on tõmbedeformatsi-
oon (ka survedeformatsioon) ja nihkedeformatsioon. Kõik
keerulisemad deformatsioonid on taandatavad neile kahele
lihtseimale juhule.

Tõmbe- (surve-) deformatsiooni võib iseloomustada ke-
ha suhtelise pikenemisega (lühenemisega). Kui keha algpik-
kus on l ja pikkuse muutus deformeerimisel Δl , siis
suhteline pikenemine ϵ avaldub

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Nihkedeformatsiooni iseloomustab suhteline nihe. Kui
märkida kehal mingid punktid, mis asuvad ühel sirgel (vt.
joon. 1), siis absoluutne nihe AA' , BB' jne. on erinevate
punktide jaoks erinev. Absoluutse nihke suhe kaugusesse
punktist O jääb aga samaks, seega

$$\gamma = \frac{AA'}{OA} = \frac{BB'}{OB} = \tan \theta \quad (2)$$



Joon. 1.

Väikeste nihkedeformatsioonide korral muutub keha kuju, ruumala aga jääb muutumatuks.

Tõmbe- (surve-) deformatsiooniga kaasneb ka keha ristlõike pindala vähenemine (suurenemine). Seda võib kontrollida lihtsa katsega.

Vertikaalsele kummitorule asetatakse tihedalt peale metallrõngas. Kui kummitoru venitada, väheneb toru diameeter ja rõngas libiseb alla.

Ristlõike mõõtmete muutust tõmbe- (surve-)deformatsioonil võib iseloomustada suhtelise ristsuunalise kokkusurumisega (venitusega) ϵ_q .

$$\epsilon_q = \frac{\Delta d}{d}, \quad (3)$$

kus d on keha mõõde suunas, mis on risti deformeeriva jõu suunaga (eespool teatud näite korral toru diameeter) ja Δd selle mõõtme muutus deformeerimisel.

Suhet $\nu = -\epsilon_q/\epsilon$ nimetatakse Poissoni koefitsiendiks. Poissoni koefitsient ei sõltu keha mõõtmetest ja on kõikide kehade korral, mis on valmistatud samast materjalist, ühesugune. Poissoni koefitsient iseloomustab ainete elastseid omadusi.

Ainete elastseid omadusi iseloomustavad ka elastsusmoodul E (Youngi moodul) ja nihkemoodul G . Need kolm konstanti on omavahel seotud järgmise seosega:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1. \quad (4)$$

Käesoleva töö ülesandeks ongi materjali Poissoni koefitsiendi arvutamine elastsusmooduli ja nihkemooduli eelnevalt määratud väärtuste kaudu. Järgnevalt kirjeldatakse nende kahe suuruse määramise meetodeid. Muidugi tuleb jälgida, et nii elastsus- kui nihkemooduli määramisel

kasutatavad kehad oleksid sama marki materjalist.

A. ELASTSUSMOODULI MÄÄRAMINE PAINDEST.

1. Tööülesanne.

Kahest otsast toetava varva elastsusmooduli määramine paindest.

2. Töövahendid.

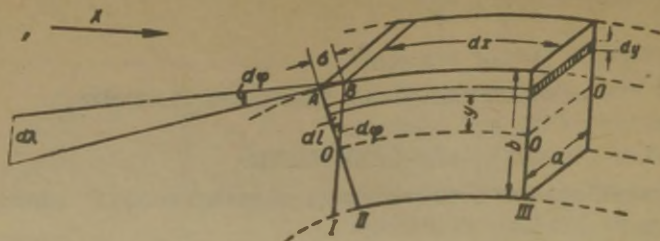
Uuritavast ainekst varvad, stend elastsusmooduli määramiseks, vahend paindenoole mõõtmiseks (mõõtemikroskoop või katetomeeter), vihid, millimeeterjaotistega joonlaud, nihk.

3. Töö põhimõte ja teooria.

Kui kinnitada elastse varva üks ots liikumatult seinakülge, varva teise otsa aga riputada koormus, tekib paindedeformatsioon. On kergesti mõistetav, et sellise deformatsiooni korral venituvad varva ülemised kihid välja, alumised aga surutakse kokku. Mõlema kihivahel paikneb neutraalne kiht, mille pikkus ei muutu; see kiht ainult kõverdub.

Varva vaba otsa nihkumise suurust λ nimetatakse paindenooleks. Paindenool on seda suurem, mida raskem on koormus. Samuti sõltub see varva kujust, mõõtmetest ning varva materjali elastsusmoodulist. Paindenoole arvutamiseks võib vaadelda ristkülikukujulise ristlõikega varva pikkusega L . Ristküliku kõrgus olgu b , laius a .

Asetsegu vaadeldav ristlõige varva vabast otsast kaugusel x . Joonisel 2 on toodud nimetatud ristlõikele toetuv varva element pikkusega dx . I tähistagu selle ristlõike sihti enne painet, II aga sama ristlõike sihti naaberistlõike III suhtes varva deformatsiooni tingimustes. Paindeprotsessis läheb lõige I asendisse II pöördumise tagajärjel ümber neutraalset kihti läbiva horisontaaltelje.



Joon. 2.

Joonisel kujutatud varvaelemendi painet iseloomustab ristlõike sihtide I ja II vaheline nurk $d\varphi$. Pole raske näha, et

$$d\varphi = \frac{\sigma}{r} = \frac{2\sigma}{b}.$$

Leiame varva vaba otsa nihke, s.t. paindenoole $d\lambda$ eeldusel, et ainult see joonisel 2 kujutatud element on deformeeritud, muu osa varvast on sirge. Selleks ehitame punktidest A ja B lõigete I ja II perpendikulaarid ning pikendame neid kuni varva vaba otsani. Nende ristlõikude pikkus on x . On selge, et perpendikulaaridevaheline nurk on samuti $d\varphi$. Saame:

$$d\lambda = x d\varphi = \frac{2\sigma x}{b}. \quad (5)$$

Kogu ulatuses paindunud varva paindenoole saamiseks tuleb avaldist (5) integreerida. Selleks tuleb aga avaldada veel σ . Leiame mistahes kohas valitud ning neutraalsest kihist kaugusel y asetseva paksusega dy kihi pikenemise $d\ell$. Joon. 2 nähtub, et

$$\frac{d\ell}{\delta} = \frac{y}{\frac{b}{2}}, \text{ millest } d\ell = \frac{2\delta y}{b}.$$

Sellise pikenemise peab esile kutsuma jõud dF , mis Hooke'i seaduse kohaselt

$$dF = \frac{E ds d\ell}{dx}.$$

Viimases valemis tähistab E varva materjali elastsusmoodulit, ds venitatava kihi ristlõike pindala. Paigutades sellesse valemisse $d\ell$ väärtuse ning asendades $ds = ady$ (vt. joon. 2), saame

$$dF = \frac{2 E a \delta y}{dx} dy.$$

Kogu varva ristlõikele mõjuva pöördemomendi arvutamiseks tuleb arvutada kõikidele elementaarriistlõigetele mõjuvate jõudude dF momendid ning hiljem need summeerida.

Elementaarne pöördemoment

$$dM = ydF = \frac{2 E a \delta}{dx} y^2 dy.$$

Summaarne elastsusjõudude poolt tekitatud pöördemoment

$$M = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{2 E a \delta}{dx} y^2 dy = \frac{E a \delta b^2}{6 dx}.$$

Et tasakaalu korral on elastsusjõudude poolt tekitatud pöördemoment võrdne välisjõudude pöördemomendiga, siis

$$M = \frac{E a \delta b^2}{6 dx} = Px, \quad (6)$$

kus P on varva vabale otsale mõjuv koormus, x aga P rakenduspunkti kaugus vaadeldavast ristlõikest.

Asendades δ valemist (6) valemisse (5), saame:

$$d\lambda = \frac{2\delta x}{b} = \frac{12 Px^2}{E ab^3} dx.$$

Kogu paindenoole pikkus

$$\lambda = \int_0^L \frac{12P}{E ab^3} x^2 dx = \frac{4 PL^3}{E ab^3}. \quad (7)$$

Niisugune on paindenoole pikkus varval, mis on kinnitatud jäigalt ühest otsast ning mille teises otsas ripub koormus. Kui varva mõlemad otsad toetuvad jäikadele tugedele ja koormuse P rakenduspunkt on varva keskel, siis paindenoole pikkus arvutatakse samuti valemi (7) põhjal. P asemele tuleb sellesse paigutada aga $\frac{P}{2}$ ning integreerimist teostada radades 0 kuni $\frac{L}{2}$. Tõepoolest, niisugusel juhul avaldavad mõlemad toetuspunktid varvale vastumõju $\frac{P}{2}$, kuna aga keskmine osa jääb horisontaalseks. Varb, mille toetuspunktid asuvad mõlemas otsas, käitub nii, nagu oleks ta kinnitatud keskelt, otstele, kaugusel $\frac{L}{2}$ varva poolitajast mõjuvad aga üles suunatud jõud $\frac{P}{2}$. Järelikult on niisugusel juhul paindenoole pikkus

$$\lambda = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{12 \frac{P}{2} x^2}{Eab^3} dx = \frac{PL^3}{4Eab^3},$$

millest

$$E = \frac{PL^3}{4ab^3\lambda}. \quad (8)$$

4. Töö käik.

R i i s t a k i r j e l d u s. Elastsusmooduli määramise stendi põhiosadeks on kaks terasprismat - nendele asetatakse uuritav varb. Varva koormamiseks kasutatavad vihid asetatakse spetsiaalsele hoidjale, mis oma prisma terava servaga toetub varva keskele asetatud terasplaadi soonde. Paindenoole mõõtmiseks kasutatakse vertikaalsele staativile kinnitatud mõõtemikroskoopi või katetomeetrit. Viiseriiks on vihtide hoidja küljes olev teravik.

M õ õ t m i s e d. 1. Nihiku või kruvikuga mõõdamise vähemalt viies kohas varva kõrguse ja laiuse. Asetame varva prismadele (vt. jaotisi prismadeli), olles sellele eelnevalt asetanud vihtide hoidja. Koormuse toetusprisma olgu varva mõlemast toetusprismast võrdsel kaugusel. Pikkuse L mõõdamise mõõtjoonlanaga.

2. Teravustamise mõõtemikroskoobi (katetomeetri) vihti-

de hoidja teravikule. Mõõtemikroskoobi kasutamisel on soovitatav reguleerida teraviku kujutis okulaarskaala algusse. Asetame hoidjale vihte, mõõdame vastavad paindenooled algul koormust suurendades, seejärel vähendades. Mõõtemikroskoobi või katetomeetri kasutamise kohta loe nendele riistadele tehase poolt antud juhendist või käesoleva kogumiku juhenditest nr. 4 ja 5.

3. Mõõtmiste tulemused kanname graafikule teljestikus λ ja P . Sel viisil saadud punktid peavad katsevigade piires asetsema samal sirgel. Graafikult määrame kahe sirgel asuva ja teineteisest võimalikult kaugel oleva punkti kaugda sirge tõusu ning paigutame selle valemisse (8) suhte $\frac{P}{\lambda}$ asemele, saades E arvutamiseks valemi

$$E = \frac{L^3}{4 ab^3} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\lambda_2 - \lambda_1} .$$

Ülalnimetatud 2 punkti ei pea sugugi olema eksperimentidist leitud punktid, kuid nad peavad asuma sirgel $P = P(\lambda)$ katsest saadud punktidega määratud piirkonnas (miks?).

4. Tulemuse piirvea arvutamisel võib vihtide lubatud põhiveaks lugeda ühe vihi massi maksimaalset erinevust nominaalväärtusest (200 g). Kuidas seda määrata?

Mitme varva elastsusmoodul tuleb määrata, see on juhendaja otsustada.

B. NIHKEMOODULI MÄÄRAMINE PÖÖRDVÕNKUMISTEST.

1. Tööülesanne.

Traadi materjali nihkemooduli määramine pöördpendli võnkumise uurimise kaudu.

2. Töövahendid.

Pöördpendel (uuritav traat tema otsa riputatud ristvarva ja lisakoormustega), mõõtlint, kruvik, nihik, sekundkell, tehnilised kaalud, vihid.

3. Meetodi teooria ja katseseadme kirjeldus.

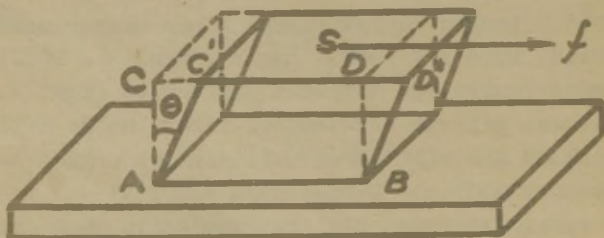
Nihkedeformatsioon tekib rakenduspinna paralleelse jõu toimel. Tahke keha mistahes osakesi ühendavad sirglõigud, mis pole paralleelsed jõu sihiga, muudavad oma sihti. Joonis 3 kujutab nihkedeformatsiooni risttahuka korral - see muutub rööptahukaks. Hooke'i seaduse kehtivuse piirkonnas võib kirjutada:

$$\Delta x = k f, \quad (10)$$

kus $\Delta x = CC'$ on absoluutne nihe, k on võrdetegur.

Et väikeste deformatsioonide korral suhteline deformatsioon avaldub

$$\frac{\Delta x}{x} = \tan \theta \approx \theta$$



Joon. 3.

ja $\tau = \frac{f}{S}$ on nihkepinge (S - jõu f rakenduspinna pindala, $x = AC$), siis võib (10) kirjutada selliselt:

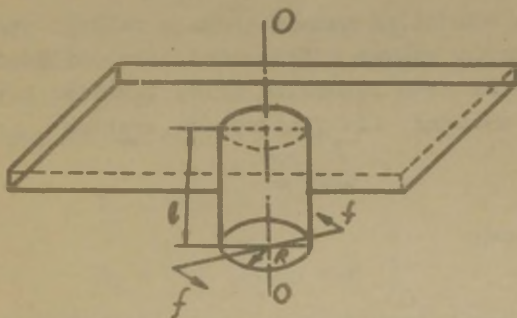
$$\theta = \frac{k S}{x} \tau.$$

Tähistades $\frac{k S}{x} = \frac{1}{G}$, saadakse Hooke'i seaduse avaldis, nihkedeformatsiooni jaoks:

$$\tau = G \theta. \quad (11)$$

Võrdetegurit G nimetatakse nihkemooduliks, ta tähendab sisuliselt nihkepinget, mis tekitaks ühikulise suhtelise nihke.

Ka väändedeformatsioon taandub sisuliselt nihkedeformatsioonile, ta võib aga tekkida sinult jõupaari toimel. Olgu traadi (joon. 4) ülemine ots kinnitatud jäigalt. Teist otsa pöörab ümber pikitelje jõupaar ff , tekitades momendi M . Traadi pikkus olgu L , ristlõike raadius R .



Joon. 4.

Traadi erinevad ristlõiked pöörduvad naaberristlõikete suhtes erinevate nurkade võrra. Alumine ristlõige pöördub ülemise suhtes nurga φ võrra, mida nimetatakse pöördenurgaks. Hooke'i seaduse kohaselt on mõjuva jõu moment M võrdeline pöördenurgaga:

$$M = D \varphi, \quad (12)$$

kus D on keerdjäikus. Keerdjäikus on võrdne momendiga, mis pöörab traadi otsa ühe radiaani võrra. Keerdjäikus on seotud aine nihkemooduliga järgmiselt:

$$D = G \frac{\pi R^4}{2L}. \quad (13)$$

Kui riputada traadi otsa mingi keha ja pöörata seda keha ümber traadi pikitelje väikese nurga φ võrra, siis pärast keha vabastamist hakkab ta võnkuma ümber oma tasakaaluasendi. Selliseid võnkumisi nimetatakse pöördvõnku-

misteks ja keha - pöörpendliks. Newtoni II seaduse ja Hooke'i seaduse alusel võib kirjutada:

$$D \varphi = -I \frac{d^2 \varphi}{dt^2}, \quad (14)$$

kus I on pendli inertsimoment pöörlemistelje suhtes. Pöörpendli nurkkiirendus avaldub:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{D}{I} \varphi,$$

s.t. ta on võrdeline nurkhälbega ja sellega vastassuunaline. Järelikult võngub pöörpendel harmooniliselt. Diferentsiaalvõrrandi (14) lahendiks tuleb tavaline harmoonilise võnkumise võrrand, kus ringsagedus avaldub:

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{I}}. \quad (15)$$

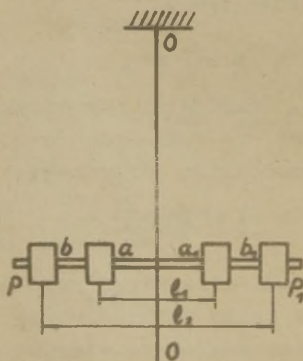
Võnkeperiood:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (16)$$

Valemitest (16) ja (13) saab avaldada nihkemooduli:

$$G = \frac{2 LD}{\pi R^4} = \frac{8\pi LI}{R^4 T^2}. \quad (17)$$

Siin jääb määramatuks veel pendli inertsimoment I . Selle elimineerimiseks kasutatakse spetsiaalse konstruktsiooniga pöörpendlit (joon. 5). Kronsteini külge on kinnitatud



Joon. 5.

uuritavast materjalist traat OO, mille alumises otsas on kinnitatud horisontaalne varb PP, võrdse massiga m vihtidega. Vihte võib mõõda varba nihutada; et varb jääks horisontaalseks, peavad mõlemad vihid alati asuma võrdsel kaugusel pöörlemisteljest. Olgu I_1 ja I_2 pöördpendli inertsimomendid telje OO suhtes vastavalt vihtide asendis aa_1 ja bb_1 , I_0 aga juhul, kui mõlemad vihid asuksid oma massikeskmetega pöörlemisteljel OO. Siis

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{2} m l_1^2 + I_0, \\ I_2 &= \frac{1}{2} m l_2^2 + I_0. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Vastavad võnkeperioodid olgu T_1 ja T_2 ,

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{D}}, \\ T_2 &= 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{D}}. \end{aligned} \right\}$$

Siit tuleb seos võnkeperioodide ja inertsimomentide vahel -

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{I_1}{I_2},$$

kust

$$I_2 = \frac{T_2^2}{T_1^2} I_1. \quad (19)$$

Süsteemist (18) saadakse

$$I_2 - I_1 = \frac{1}{2} m (l_2^2 - l_1^2);$$

siit (19) arvestades

$$I_1 = \frac{m (l_2^2 - l_1^2) T_1^2}{2 (T_2^2 - T_1^2)}. \quad (20)$$

Valemitest (17) ja (20) saadakse:

$$G = \frac{8\pi L m (l_2^2 - l_1^2) T_1^2}{R^4 T_1^2 2 (T_2^2 - T_1^2)} =$$

$$= \frac{4\pi L m (\ell_2^2 - \ell_1^2)}{R^4 (T_2^2 - T_1^2)} \quad (21)$$

Valemis (21) on kõik suurused eksperimentaalselt mõõdetavad.

4. Töö käik.

1. Valemi (21) analüüsimisel selgitame, millised tegurid annavad suurema vea G arvutamisel. Nendeks on ilmselt R^4 , $(T_2^2 - T_1^2)$ ja $(\ell_2^2 - \ell_1^2)$. Valime vastavate suuruste mõõtmiseks loetletud töövahendite seast sellised, mis antud juhul võimaldavad suurimat mõõtmistäpsust. Samuti tuleb õigesti valida vihtide asendid aa_1 ja bb_1 , lähtudes G piirvea miinimumi nõudest. Traadi läbimõõdu määramisel tuleb võimalike ebaühtluste arvestamiseks mõõta mitmest kohast ja arvutada keskväertus. Määranud orienteerivalt võnkeperioodid T_1 ja T_2 , leiame minimaalse täisvõngete arvu, mille sooritamise aeg on tarvis määrata T_1 ja T_2 leidmisel, et teguri $(T_2^2 - T_1^2)$ relatiivne viga ei ületaks teguri R^4 relatiivset viga. Sealjuures eeldame, et elektrikella kasutamise korral on arvestatud sageduse parand ja aja näidu viga koosneb sekundkella lubatud põhivea ja vaatleja reaktsioonist tingitud vea summast (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 1).

2. Mõõdame m ja L sellise täpsusega, et nende relatiivne viga oleks vähemalt suurusjärgu võrra väiksem teiste tegurite veast valemis (21).

3. Arvutame nihkemooduli G koos piirveaga.

NB! Pöördimpulss antakse pendlile vastava mehhanismi abil (nööriist tõmmates), kusjuures võnkeamplituud ei tohi ületada 10° (miks?).

C. LISAKÜSIMUSI.

1. Tuletada seos (4) Poissoni koefitsiendi, elastsus- ja nihkemooduli vahel.

2. Miks peab elastsusmooduli leidmisel koormus olema täpselt varva keskel?

3. Kas L on kaugus toetusprismade vahel või uuritava varva pikkus?

4. Tuletada seos (13) keerdjäikuse ja nihkemooduli vahel.

5. Kas pöördpendli võnkumise ringsagedus ω (valem 15) ühtib tema pöördliikumise nurkkiirusega?

D. KIRJANDUS.

1. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., изд. Ф-М., 1963, стр. 467-482.
2. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр. 266-293.

22. TÕMBEDEFORMATSIOONI UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Materjali tõmbediagrammi koostamine ja elastsusmooduli ning kriitiliste pingete määramine.

2. Töövahendid.

Uuritav traat, tõmbestend, komplekt vihte, riidega kaetud taburet ning padjake, mõõtlint, indikaatoriga kruvik, sügavusnihik, pintsetid, nitrovärv, lõiketangid.

3. Sissejuhatus.

Lihtsaim moodus tõmbedeformatsiooni uurimiseks on kirjeldatud juhendis /3/. Nimetatud meetodiga on aga raske üles võtta tõmbediagrammi, kuna aine voolavuse piirkonnas pole võimalik saavutada tasakaalu. Tõmbediagrammi langeva osa uurimine aga on hoopiski võimatu (miks?).

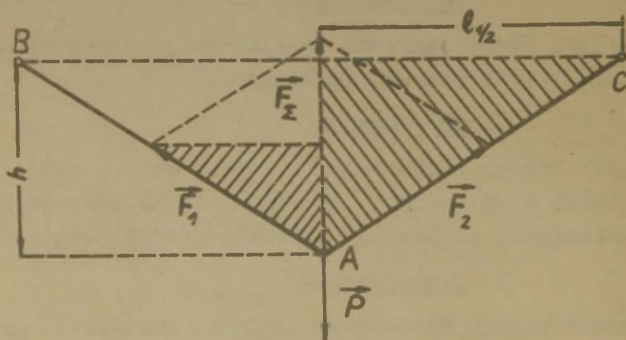
Tõmbediagrammi määramiseks ettenähtud seadmetes talitatakse vastupidiselt eelnimetatud meetodiga: argumendina antakse ette deformatsioon ja registreeritakse tekkiv pinge /4/. Niisugune moodus on põhimõtteliselt parim, kuid ta nõuab rahuldava mõõtmistäpsuse saamiseks keerulisi seadmeid.

Allpool kirjeldatav meetod sarnaneb rohkem esimese moodusega, võimaldab aga saavutada tasakaalu voolavuse piirkonnas ja isegi tõmbediagrammi aeglaselt langevas osas. Meetodi eelisteks on veel seadmete lihtsus ja katse õpetlikkus staatika seaduste demonstreerimiseks.

4. Meetodi teooria.

Uuritava traadi asend on horisontaalne. Traat on mõlemast otsast jäigalt kinnitatud ja tema keskpunkti riputatakse koormus massiga m . See võimaldab:

- 1) tekitada jõust $P = mg$ märksa suuremat pingutusjõudu,
- 2) saavutada tasakaalu voolavuse piirkonnas, sest traadi venimise korral pingutusjõud väheneb, ilma et seejuures koormust muudetakse.



Joon. 1.

Joonisel 1 on B ja C traadi kinnituspunktid. Punktis A on rakendatud kolm üksteist tasakaalustavat jõudu: raskusjõud $\vec{P} = mg$ ja kaks traadi pingutusjõudu \vec{F}_1 ja \vec{F}_2 . Sümmetria tõttu $F_1 = F_2 = F$. Pingutusjõudude resultandi \vec{F}_z moodul $F_z = P$. Viirutatud kolmnurkade sarnasuse tõttu kehtib võrre

$$\frac{F_z}{F} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}}, \quad (1)$$

kus h on traadi läbivajumine ja $l/2$ on pool tema algpikkusest. Siit

$$F = \frac{mg \sqrt{h^2 + l^2}}{2h} \quad (2)$$

ja traadi tinglik normaalpinge^{*} $\sigma = F/S_0$, kus S_0 on traadi algristlõikepindala. Lõppvalem on järgmine:

$$\sigma = \frac{mg \sqrt{1 + \left(\frac{l_{1/2}}{h}\right)^2}}{2S_0} \quad (3)$$

On vaja arvutada veel suhteline pikenemine $\varepsilon = \Delta l/l_0$. Traadi pikkus deformeeritud olekus on

$$l = 2\sqrt{h^2 + l_{1/2}^2} \quad (4)$$

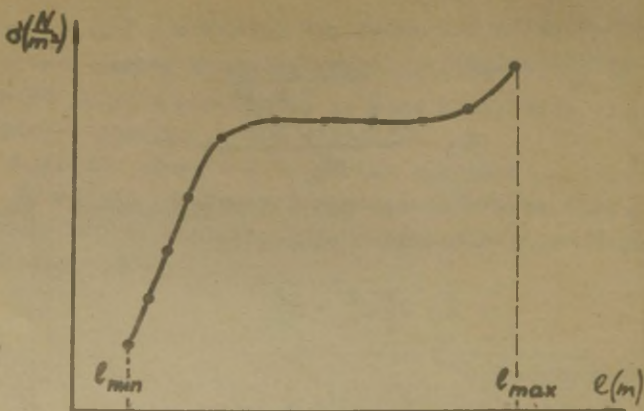
Pikenemise avaldise

$$\Delta l = 2\sqrt{h^2 + l_{1/2}^2} - l_0, \quad (5)$$

kus l_0 on algpikkus, võib küll välja kirjutada, aga praktiliseks kasutamiseks ta ei kõlba (miks?). Seetõttu kasutatakse siin tõmbediagrammi koostamisel veidi kunstlikuna näivat võtet. Kanname koordinaattelgedele suuruste σ ja l väärtuste skaala (vt. joon. 2). σ -teljel võtame koordinaatteljestiku algpunkti nullpunktiks. l -telje jagame nii, et kõige väiksem ja kõige suurem katses esinenud l väärtus l_{\min} ja l_{\max} asuksid nii, nagu joonisel 2 näidatud. l -skaala kanname abstsissitelje kohale, jättes ruumi telje all vabaks. Nüüd kanname koordinaattasandile kõik katsepunktid ja joonistame läbi nende kõvera. Hooke'i seaduse järgi peab selle kõvera algosa olema sirge, mis võimaldab kõverat joonlaua abil jätkata l -teljeni (joonisel punktiir). Niiviisi saame teada seni tundmatuks jäänud täpse l_0 väärtuse.

Nüüd võib juba välja arvutada Δl ja ε väärtused ja koostada tõmbediagrammi tavalisel kujul (teljed ε ja σ). Viimast tööd saab aga ratsionaliseerida. Et ε sõl-

* Tegelikku normaalpinge leidmiseks tuleks F jagada tegeliku ristlõikepindalaga S , mis on koormatud olekus traadi ahenemise tõttu algristlõikepindalast veidi väiksem. Tugevusõpetuses ei kasutata aga peaaegu kunagi tegelikku normaalpinget, vaid alati tinglikku.



Joon. 2.

tub pikkusest l lineaarselt, siis on vaja ainult kanda abstsisssteljele l väärtustele vastavad ε väärtused. Selleks jätsimegi varem telje alla ruumi. Arvutame kõigepealt $\varepsilon(l_{max})$ ja valime ε -telje jaotise sobiva väärtuse (nii et kogu abstsissstelg jaguneks umbes kümneks). Nüüd arvutame l väärtused, mis vastavad ε -telje jaotistele. Et $\varepsilon = (l - l_0)/l_0$, siis

$$l = (1 + \varepsilon)l_0. \quad (6)$$

Niiviisi abstsissstelje alumisele küljele kantud ε jaotised ei lange kokku paberi ruutvõrgu jaotistega. Seepärast tõmbame iga ε jaotise märgi kohale värvilise vertikaalsirge. Sirge $\varepsilon = 0$ tõmbame aga samasuguse joonega kui koordinaatteljed: see sirge on tõmbediagrammi õige ordinaattelg.

Tõmbediagrammilt leiame võrdelisuse piiri, voolavuse piiri, tugevuse piiri ja elastsusmooduli. Elastsusmoodul on tõmbediagrammi sirge osa tõus:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}. \quad (7)$$

Lisaprobleem väga hea hinde taotlejaile: kontrollida, kas kirjeldatud katse metoodika on õige ka siis, kui traat on algolekus eelpingestatud.

oleb, kui palju

5. Katse käik.

Asetame tõmbestendi kahe laua vahele nii, et laudadele toetuvad ainult stendi otsad.

Riistaga tutvumiseks sooritame kõigepealt provisoorse eelkatse.

Enne põhikatset mõõdame veel riista konstandi h_{Δ} . h_{Δ} on sügavusnihiku näit täiesti sirgeks pingutatud traadi korral^{III}. h_{Δ} mõõtmiseks kinnitame tüki traati ühest otsast klambri vahele ja tõmbame teisest otsast tugevalt sirgeks. Edaspidi tähistame sügavusnihiku näidu h_{Σ} ja alles katseandmete töötlemisel arvutame

$$h = h_{\Sigma} - h_{\Delta} \quad (8)$$

26^{1/2} mõõdame mõõtlindiga.

Põhikatseks lõikame paraja pikkusega tüki traati. Traadi läbimõõdu mõõdame kümnest kohast indikaatoriga kruviku abil. Indikaator võimaldab kõik kümme mõõtmist teha mõõtkruvi ühe ja sama asendi juures, mis hõlbustab tööd.

Mõõtmisprotokolli registreerime mõõtkruvi näidu ja kümme indikaatori näitu. Mõõtkruvi näidule liidame indikaatori näitude keskmise.

Traadi kinnitamisel ei tohi klambreid tugevalt pingutada, muidu katkeb traat klambri juurest liiga vara. Minimaalse libisemist vältiva klambrite pingutamise tugevuse selgitame välja eelkatse juures. Traadi võimaliku libisemise kontrollimiseks teeme traadile klambrite juurde nitrovärviga märgid.

Järgnevalt riputame täpselt traadi keskele konksu ja

* Ei tohi unustada, et h sõltub traadi läbimõõdust. Et aga traatide läbimõõdud on alati teada, võib h väärtust teiste traatide jaoks leida hõlpsalt arvutamise teel.

asetame selle alla riidega kaetud tabureti langevate vihtide löögi summutamiseks mõeldud padjakesega. Koormuste rida on soovitatav valida järgmise süsteemi kohaselt:

- a) üks viht,
 - b) sama viht + neli korda kergem viht,
 - c) sama viht + kaks korda kergem viht,
 - d) kaks korda raskem viht,
- jne.

Vajaduse korral võib koormust muuta väiksemate astmete kaupa.

Vihtide massid on ligikaudu järgmised: 12,5 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 400 g, 800 g, 1,6 kg, 3,2 kg. Täpsemad väärtused on näidatud vihtide komplekti tunnistusel.

Mõõtmistulemused ja osa arvutustulemusi kanname tabelisse, kus esimeses reas on m väärtused, teises h_z väärtused, edasi h , l , ϵ ja σ väärtused (kokku kuus rida).

Tabeli joonistamisel jätame lahtrid küllalt pikad, et mõõtarvu järele mahuks ka piirvea väärtus.

Arvutamisel võib osutada kasulikuks (kui $x \ll a$) järgmine reaksarendus:

$$\sqrt{a^2 + x^2} = a \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{x}{a} \right)^4 + \frac{1}{16} \left(\frac{x}{a} \right)^6 - \frac{5}{128} \left(\frac{x}{a} \right)^8 + \dots \right]. \quad (9)$$

Mõõtmistulemuste piirvigade määramisel tuleb hinnata stendi kokkusurutavust ja nõtkedeformatsiooni võimalust.

6. Kirjandus.

1. С. П. Стрелков. Механика. М., "Наука", 1965, стр.266-279.
2. F. Sokolov, P. Ussov. Tehniline mehaanika. Tallinn, "Valgus", 1966, lk. 274-281, lk. 321-324.
3. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. Tallinn, ERK, 1960, lk. 117-120 (§ 51. Traadi elastsusmooduli määramine venitusest).
4. K. Ollik, O. Roots. Tugevusõpetus. Tallinn, ERK, 1965, lk. 388-397, lk. 514-526.

23. VEDELIKU SISEHÖRDETEGURI TEMPERatuurIST SÖLTUVUSE MÄÄRAMINE STOKES'I MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Vedeliku (õli) sisehõrdeteguri määramine mitmesugustel temperatuuridel Stokes'i meetodil. Sisehõrdeteguri ja temperatuuri vahelise sõltuvuse empiirilise valemi leidmine.

2. Töövahendid.

Termostaat koos uuritavat vedelikku sisaldava klaasnõuga, metallkuulikesed, kruvik või mikroskoop koos okulaarkruviku ja mikroskaalaga, 2 sekundkella, mõõtjoonlaud, kontakt- ja laboratoorne termomeeter.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Reaalse vedeliku (gaasi) kihtide suhtelist liikumist takistab sisehõrdejõud. Liikuvast vedelikust (gaasist) kiiruse sihiga paralleelsele kihile pindalaga S üleväänud vedeliku poolt mõjuv sisehõrdejõud F arvutatakse Newtoni valemist

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

kus $\frac{dv}{d\ell}$ on vedeliku (gaasi) osakeste liikumise kiiruse gradient (s.o. kiiruse absoluutväärtuse muutus pikkusühiku kohta kiirusvektoriga ristuvast sihis) vaadeldava kihi juures;

η on võrdetegur, mida nimetatakse sisehõrdeteguriks e. dünaamiliseks viskoossuseks.

Kui vedelikus või gaasis liigub mingi tahke keha, mida antud vedelik (gaas) täielikult märgab (s.o. mille pinnale kleepunud vedeliku (gaasi) osakesed selle pinna suhtes ei liigu), siis tegelikult liiguvad selle keha pinnale kleepunud osakesed ülejäänud vedeliku (gaasi) suhtes ja kehale mõjuv keskkonna takistusjõud on täielikult põhjustatud sisehõõrdamisest, mitte keskkonna ja temas liikuva keha osakeste vastastikusel mõjust. Kehale mõjuva takistusjõu arvutamine on väga keeruline ja komplitseeritud ülesanne, analüütiliselt on see lahendatud ainult mõnel lihtsamal erijuhul. Igas suunas lõpmatu ulatusega mittekokkusurutavas vedelikus (gaasis) väikese kiirusega liikuva tahkest ainest kerale mõjuva takistusjõu F jaoks sai Stokes valem:

$$F = 6\pi\eta rv, \quad (2)$$

kus r on kera raadius,

v - kera kiirus keskkonna seisvate (lõpmata kaugel asuvate) osakeste suhtes.

Rangelt kehtib Stokes'i valem ainult kera liikumisel lõpmata väikese kiirusega, kui võib jätta arvestamata keskkonna liikumapanemiseks kuluva töö, võrreldes sisehõõrdejõudude tööga kera liikumisel. (Stokes'i valemi tuletamisel on diferentsiaalvõrrandis keskkonna kaasliikumist kirjeldavad inertsijõud ära jäetud.) Viga, mis tehakse takistusjõu arvutamisel Stokes'i valemi järgi, on üheselt määratud Reynoldsi arvuga R . Dimensioonitu suurus R väljendab sisuliselt inertsijõudude ja sisehõõrdejõudude töö suhet pideva keskkonna liikumisel. Kera liikumisel lõpmatu ulatusega vedelikus (gaasis) avaldub R :

$$R = \frac{2r\rho_1v}{\eta}, \quad (3)$$

kus ρ_1 on keskkonna tihedus.

Järgnevas tabelis on antud Stokes'i valemist arvutatud takistusjõu erinevus tegelikust (eksperimentaalselt mõõdetavast) jõust protsentides sõltuvalt R väärtusest.

See erinevus δ määrab meetoodilise vea ka Stokes'i meetodil leitavatele sisehõrdeteguri väärtustele. Tabel on koostatud paljudelt uurijatelt pärinevate eksperimentaalandmete järgi, andmete hajuvusest tingituna on δ väärtused väga ligikaudsed ($\Delta\delta = 0,1 \dots 0,2\%$).

$R \cdot 10^2$	1,2	1,6	2,0	4,0	6,0	8,0	10
δ (%)	0,1	0,25	0,4	0,8	1,1	1,4	1,6

Kui kerake on asetatud vedelikku, siis talle mõjuvad 3 jõudu: raskusjõud, üleslükkejõud Archimedesese seaduse järgi ja takistusjõud. Kui kera aine tihedus ρ on suurem kui vedeliku tihedus ρ_1 , siis hakkab kera langema kiirendatult Maa poole. Kiiruse suurenedes kasvab aga ka takistusjõud ja ükskord saabub moment, mil kerale mõjuvad jõud on tasakaalus ja kera langeb edasi ühtlaselt kiirusega v_s . Teoreetiliselt läheneb kera liikumise kiirus küll asümptootiliselt väärtusele v_s , kuid antud katses kasutatavate vedelike ja kerakeste korral muutub kiiruse erinevus v_s -st kaduvväikeseks juba mõne sekundi vältel.

Jõudude tasakaalu tingimus kerakese ühtlasel liikumisel:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - 6\pi\eta r v_s = 0,$$

millest

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{(\rho - \rho_1) g r^2}{v_s}. \quad (4)$$

Valem (4) kehtib eelnevas tabelis esitatud täpsusega ainult lõpmatu ulatusega vedeliku korral. Reaalses katses on aga vedelik lõplike mõõtmetega anumad, keraga mittetaka-saliikuvad (anuma suhtes paigalseisvad) kihid pole lõpma-ta kaugel. Seetõttu suureneb kiiruse gradient keraga ka-saliikuvast vedelikust ja suureneb ka takistusjõud. Kui kuu-like langeb silindrilises anumad raadiusega R_1 selle telge mööda, siis kehtib valem:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{(g_k - g_l) g r^2}{v_s (1 + 2,4 \frac{T}{R_1})} \quad (5)$$

Valemites (4) ja (5) esinevad suurused on kõik eksperimentaalselt mõõdetavad. Seepärast võib väikeste kerakes-te vedelikus langemist jälgides määrata vedelike sisehõõr-detegureid (Stokes'i meetod), kui eespool märgitud kitsen-davad eeldused on täidetud.

Vedelike ja gaaside sisehõõrdetegurid sõltuvad tuge-vasti temperatuurist. Vedelike puhul väheneb η T suure-neses. Frenkel on tuletanud valemi

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{\Delta W}{RT}}, \quad (6)$$

kus η_0 - sisehõõrdetegur normaaltingimustel,

k - Boltzmanni konstant,

ΔW - energia, mis tuleb vedeliku molekulile anda te-ma üleminekuks ühest ajutisest tasakaaluasen-dist teise.

Tavaliselt kasutatakse aga empiirilist valemit ast-mefunktsiooni kujul:

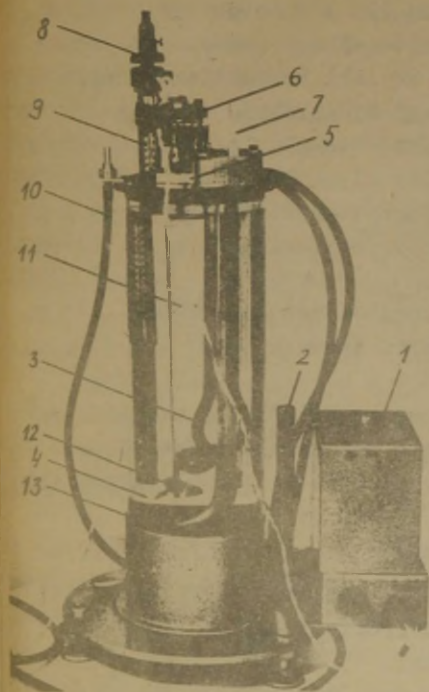
$$\eta = a T^b, \quad (7)$$

mis konstantide a ja b sobiva valiku korral lähendab sõl-tuvust küllalt hästi.

Käesoleva töö eesmärgiks ongi määrata konstandid va-lemis (7) kastoorõli jaoks. Selleks määratakse Stokes'i meetodil õli sisehõõrdetegur mitmel temperatuuril.

4. Katseseadme kirjeldus.

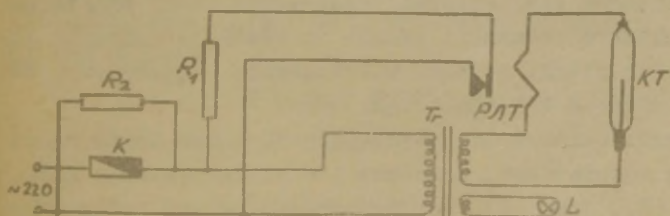
Katse teostamiseks tuleb küllalt suure õlinõu ula-tuses hoida küllalt pikka aega konstantset temperatuuri. Selleks kasutatakse antud töös vesitermostaati. Termos-taadi töö põhimõtte kohta loe käesoleva kogumiku juhen-dist nr. 29.



Joon. 1.

Aspiraatorit (2) antud töös ei kasutata.

Termostaadi (joon. 1) anum (4) on tehtud orgaanilisest klaasist (miks?). Soojusvahetajaks on elektiriküttekeha (3), termoregulaator koosneb kontakttermomeetrist (9) ja vutlaris (1) asuvast elektromagnetilisest releest. Segajaks on elektrimootoriga (6) ringiaetav tiivik (12). Temperatuuri täpsaks määramiseks kasutatakse laboratoorseid termomeetreid (7). Lisaküttekeha (13) saab tööle rakendada vutlari (1) küljes oleva lüliti abil. Nõu (11) uuritava vedelikuga kinnitatakse termostaadi anuma kaanele klambri (5) abil. Kummivoolikut (10) kasutatakse anuma tühjendamiseks. Aspi-



Joon. 2.

Termostaadi elektriline skeem on esitatud joonisel 2. Soojusvahetaja R_1 on lülitatud 220 V vahelduvvoolu võrku relee PTT kontaktide kaudu, relee mähist toidetakse vahelduvpingega transformaatorist Tr läbi kontakttermomeetri KT. Viimane on ühendatud vooluringi kahe juhtme abil, neist üks on joodetud sisse elavhõbedareservuaari, teine aga termomeetri ülalt lahtisesse kapillaari. Selle teise juhtme alumise otsa asendit saab pööratava magneti (8, joon. 1) abil reguleerida, nii et relee mähise vooluring sulguks vajaliku temperatuuri korral.

Vesitermostaadi tööpiirkond on tavaliselt $0^{\circ} - 100^{\circ}\text{C}$. Antud töös saab aga töötada vaid vahemikus $20^{\circ} - 70^{\circ}\text{C}$ (miks?).

Kasutatavad kuulikesed suunatakse õlinõu teljele koonilise avaga korgi abil. Õlinõu saab seada (enam-vähem) vertikaalseks termostaadi alusel olevate jalakruvide abil.

5. Töö käik.

1. Määrame kõigi kuulikeste läbimõõdud kruvikuga või okulaarkruvikuga varustatud mikroskoobi abil. Kruvikuga tohib mõõta vaid teraskuulikesi.

2. Täidame termostaadi veega, reguleerime kontakttermomeetri kontakttraadi vajalikule temperatuurile. Soovitav on alustada tööd minimaalsel temperatuuril, mille juures meie termostaat juba töötab. Milline tingimus määrab selle minimaalse temperatuuri? Sealjuures tuleb pidada meele, et kontakttermomeetri skaala on ebatäpne (lubatud põhiviga võrdub skaala jaotise väärtusega), temperatuuri mõõdame laboratoorse termomeetriga.

Lülitame termostaadi vooluvõrku. Kui vee temperatuur on madalam soovitavast, kasutame töö kiirendamiseks lisaküttekeha (R_2 , joon. 2). Kui termostaat hakkab tööle (signaallamp kustub), lülitame R_2 välja, määrame termostateerimise täpsuse (vt. juhend nr. 29). Termostateerimise täpsuse ja termomeetri lubatud põhivea summa määrab temperatuuri väärtuste piirvea. Temperatuuri väärtuseks võtame

termostaadi vähemalt kolme perioodi keskmise temperatuuri (määrame graafikult). Et termostateerimise täpsus sõltub temperatuurist, kordame tema määramist ka maksimaalsel kasutataval temperatuuril.

3. Kontrollime, kas kuulikese liikumine on ülemise märgi kohal muutunud juba ühtlaseks. Selleks mõõdame 2 sekundkella kasutades tema langemise ajad ülemisest märgist keskmiseni ja keskmisest alumiseni, arvutame langemiskiirused. Nüüd teeme katse vähemalt 3 kuulikesega. Milliste õlinoõle tehtud märkide vahemaa läbimiseks kulunud aega mõõta, seda tuleb otsustada kontrollkatse tulemuse ja katsetulemuse vea miinimumi nõude alusel.

Katse teeme vähemalt 5 - 6 erineva temperatuuri juures. Iga kord tuleb teha ka kontrollkatse (miks?). Kokku on seega tarvis vähemalt 20 - 24 kuulikest (kui neid vahet peal välja ei võeta).

4. Arvutame η valemist (5) iga temperatuuri korral kolme katse keskmisena. Kui kuulikeste raadiused olid mõõtmisvigade piires võrdsed, võib keskmistada v_g väärtused. Ehitame graafiku $\eta = \eta(T)$. Edasi valime sobiva empiirilise (aproksimeeriva) valemi, mis lähendaks võimalikult hästi leitud sõltuvust /3/.

Lähtudes kõvera kujust, võib teha oletuse, et parimaks aproksimeerivaks valemiks on astmefunktsioon

$$\eta = a T^b.$$

Kontrollime valemi sobivust, valides η -st ja T -st sõltuvad suurused

$$X = \log T \text{ ja } Y = \log \eta,$$

mis omavahel on seotud lineaarselt

$$Y = \log a + bX.$$

Arvutame rea η ja T väärtustele vastavaid X ja Y väärtusi ja kanname need graafikule. Arvutame graafikule kantud punktidele vigade ristkülikud. Kui $Y = Y(X)$ osutub vigade piires sirgeks, on meie valem valitud õigesti. Nüüd

tuleb määrata konstandid a ja b. Vähimruutude meetod on antud ülesande jaoks liiga töömahukas, seepärast kasutame keskmiste meetodit.

5. Arvutame Reynoldsi arvu ja metoodilise vea, mis tehakse Stokes'i valemi kasutamisel. Arvutame ka vea, mille oleksime teinud valemi (5) asemel valemit (4) kasutades.

6. Lisaküsimusi.

1. Selgitada sisehõõrdumise mehhanismi vedelikes ja gaasides. Kuidas η sõltub temperatuurist ühel ja teisel juhul?

2. Milline on η dimensioon ja ühik SI süsteemis?

3. Milline võiks olla kuulikese ($\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$) maksimaalne raadius, mille abil õhu sisehõõrdetegurit ($\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$) mõõtes metoodiline viga ei ületaks 1%.

7. Kirjandus.

1. Г. А. Зисман, О. М. Тодес. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1967, стр. 240-243.
2. С. З. Фриш, А. В. Тиморева. Курс общей физики. Т. 1. М., Физматгиз, 1962, стр. 143-156. (§ 42. Движение вязкой жидкости.)
3. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М., 1956, стр. 578-584.

24. VEDELIKU SUHTELISE VISKOSSUSE MÄÄRAMINE KETTA SUMBUVATEST PÖÖRDVÕNKUMISTEST.

1. Tööülesanne.

Uuritava vedeliku ja etaloonvedeliku sisehõordetegurite suhte (uuritava vedeliku suhtelise viskoossuse) määramine.

2. Töövahendid.

Statiiv traadi külge riputatud metallkettaga, väikese kõrguse ja suure läbimõõduga silindriline vann, ringskaala, sekundkell, termomeeter, uuritav vedelik ja destilleeritud vesi (etaloonvedelik).

3. Meetodi teooria.

Raske metallketas ripub traadi otsas nii, et traadi telg (pöörlemistelg) läbib ketta masskeset (joon. 1). Ketas on varustatud osuti ja ringskaalaga pöördvõnkumise nurkamplituudide määramiseks. Kui paigutada ketas vedeliku ja viia ta pöördvõnkumisse, siis vedeliku sisehõordetegurite toimele võnkumised sumbuvad. Sumbuva pöördvõnkumise diferentsiaalvõrrand on selline:

$$I \ddot{\varphi} = -D\varphi - r^2 \dot{\varphi}$$

või

$$\ddot{\varphi} + 2 \frac{r^2}{2I} \dot{\varphi} + \frac{D}{I} \varphi = 0. \quad (1)$$



Joon. 1.

Siin φ , $\dot{\varphi}$ ja $\ddot{\varphi}$ on vastavalt nurkhälve, -kiirus ja -kiirendus,

I on vedelikus võnkuva ketta inertsimoment,

D on traadi keerdjäikus,

r' on hõõrdejõudude momendi tegur, teda mõõdetakse ühikulise nurkkiirusega pöörlevale kettale mõjuva hõõrdejõudude momendiga.

Võrrandi (1) lahend avaldub kujul:

$$\varphi = \phi_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi) \quad (2)$$

Siin ϕ_0 on süsteemi algnurkamplituud,

$\omega = \sqrt{\frac{D}{I} - \frac{r'^2}{4I^2}}$ on võnkumise ringsagedus,

ψ - algfaas ja

$\delta = \frac{r'}{2I}$ on sumbuuse tegur,

$\phi(t) = \phi_0 e^{-\delta t}$ on amplituud ajamomendil t .

Kui vedelik märgab ketast täielikult, siis on ketta igale pinnaelemendile mõjuv hõõrdejõud määratud ainult vedeliku sisehõõrdumisega ja Newtoni valemi

$$F = \eta S \frac{dv}{dl}$$

põhjal on kogu kettale mõjuv hõõrdejõudude moment võrdeline sisehõõrdeteguriga η . Järelikult

$$r' = C \eta, \quad (3)$$

kuv C on konstant antud mehhanilise süsteemi jaoks.

Sumbuvate võnkumiste eksperimentaalsel uurimisel kasutatakse alati sumbuuse logaritmilise dekremendi mõistet, sest see suurus on eksperimentist lihtsalt määratav. Arvutame valemist (2) sumbuuse logaritmilise dekremendi 2 juhu jaoks: 1) kui ketas võngub uuritavas vedelikus (kõigil suurustel indeks 1) ja 2) kui ketas võngub etaloonvedelikus (indeks 0).

$$\begin{aligned} \theta_1 = \ln k_1 &= \ln \frac{[\phi(t)]_1}{[\phi(t+T_1)]_1} = \frac{C \eta_1 T_1}{2I} \\ \theta_0 = \ln k_0 &= \ln \frac{[\phi(t)]_0}{[\phi(t+T_0)]_0} = \frac{C \eta_0 T_0}{2I} \end{aligned}$$

Viimastest võrranditest saab valemi uuritava vedeliku suhtelise viskoossuse määramiseks:

$$Z = \frac{\eta_1}{\eta_0} = \frac{\theta_1 T_0}{\theta_0 T_1}. \quad (4)$$

Uuritava vedeliku sisehõõrdetegur avaldub:

$$\eta_1 = Z \eta_0 = \eta_0 \frac{\theta_1 T_0}{\theta_0 T_1}. \quad (5)$$

4. Sumbuvuse logaritmilise dekremendi määramisest.

Sumbuvuse logaritmilise dekremendi määramisel kahe järjestikuse samapoolse amplituudi suhte loomuliku logaritmina tekib täiendav viga süsteemi tasakaaluasendä määramisel (võnkumiste tekitamiseks vajalik algimpulss võib muuta tasakaaluasendit). Seepärast on kasulik tuletada va-

lem dekremendi arvutamiseks järjestikuste võnkeamplituudide summade, s.t. süsteemi järjestikuste amplituudasendite vaheliste nurkade kaudu. Tähistagu ϕ_1, ϕ_3, ϕ_5 jne. vasakpoolseid võnkeamplituude, ϕ_2, ϕ_4, ϕ_6 jne. aga parempoolseid. Järjestikuste amplituudasendite vaheliste nurkade suhe avaldub:

$$\vartheta = \frac{\phi_1 + \phi_2}{\phi_2 + \phi_3} = \frac{\frac{\phi_1}{\phi_2} + 1}{1 + \frac{\phi_2}{\phi_3}} .$$

Valemit (2) kasutades on võimalik näidata, et

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\phi_2}{\phi_3} = \sqrt{\frac{\phi_1}{\phi_3}} = \sqrt{k} . \quad (6)$$

Seega

$$\vartheta = \frac{\sqrt{k} + 1}{1 + \frac{1}{\sqrt{k}}} = \sqrt{k} ,$$

$$\ln \vartheta = \frac{1}{2} \ln k = \frac{1}{2} \theta , \quad (7)$$

$$\theta = 2 \ln \vartheta .$$

On selge, et ϑ võib arvutada ka amplituudasendite vaheliste kaarepikkuste kaudu ringskaalal. Tähistame nurgale $\phi_1 + \phi_2$ vastava kaare a_1 , nurgale $\phi_2 + \phi_3$ vastava kaare a_2 -ga jne. Siis

$$\vartheta = \frac{a_1}{a_2} = \frac{a_2}{a_3} = \frac{a_3}{a_4} = \dots \quad (8)$$

On lihtne näha, et

$$a_1 = a_2 \vartheta = a_3 \vartheta^2 = a_4 \vartheta^3 = \dots ,$$

$$a_2 = a_3 \vartheta = a_4 \vartheta^2 = \dots ,$$

$$a_3 = a_4 \vartheta = a_5 \vartheta^2 = \dots .$$

Üldiselt

$$a_n = a_1 \vartheta^{n-1} ,$$

$$a_p = a_q \vartheta^{q-p} ,$$

ja

$$\vartheta = \frac{n-1}{q-p} \sqrt{\frac{a_1}{a_n}} = \sqrt{\frac{q-p}{n-1} \frac{a_p}{a_q}} . \quad (9)$$

Suuruse ϑ (seega ka sumbuuse logaritmilise dekrementi) määramise viga oleneb n (või vahe $q - p$) valikust. Tõepoolest:

$$\delta\vartheta = \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta} = \frac{1}{n-1} \left(\frac{\Delta a_1}{a_1} + \frac{\Delta a_n}{a_n} \right).$$

Kõikide kaarepikkuste a_n määramise absoluutsed vead on võrdsed - $\Delta a_1 = \Delta a_n = \Delta a$. Saadakse:

$$\delta\vartheta = \frac{\Delta a}{n-1} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_n} \right).$$

On selge, et mida suurem valida n , seda väiksem tuleb esimene tegur. Kuid samal ajal väheneb a_n ja suureneb sulgavaldise teine liige. Seega peab teatud n korral viga olema minimaalne. Intuitiivselt on taibatav, et mida suurem on sumbuus, seda väiksema n korral peab see miinimum olema. Asendades $a_n = \frac{a_1}{\vartheta^{n-1}}$, saadakse

$$\delta\vartheta = \frac{\Delta a}{a_1} \left(\frac{1 + \vartheta^{n-1}}{n-1} \right).$$

Müüd tuleb lahendada ekstreemumülesanne. Võrrutades esimese tuletise nulliga, saadakse transtsendentne võrrand

$$\vartheta^{n-2} (n-1-\vartheta) = 1$$

või

$$\vartheta^{n-2} = \frac{1}{n-1-\vartheta}.$$

See võrrand pole analüütiliselt lahenduv. Tema graafiliseks lahendamiseks ehitatakse samas teljestikus funktsioonide

$$f_1(n) = \vartheta^{n-2}$$

ja

$$f_2(n) = \frac{1}{n-1-\vartheta}$$

graafikud (selleks peab ϑ väärtus eelnevalt ligikaudu teada olema). Graafikute lõikepunkti abstsissile lähim täisarv annabki n väärtuse n_m , mille puhul ϑ määramise viga on minimaalne.

Juhuslike vigade vähendamiseks ja eksimuste vältimi-

seks arvutatakse \mathcal{D} -le rida väärtusi valemitest

$$\mathcal{D} = \frac{n_m - 1}{\sqrt{\frac{a_1}{a_{n_m}}}} = \frac{n_m - 1}{\sqrt{\frac{a_2}{a_{n_m} + 1}}} = \frac{n_m - 1}{\sqrt{\frac{a_3}{a_{n_m} + 1}}} = \dots, \quad (10)$$

arvutatakse keskmine.

5. Töö käik.

1. Puhastame traadi otsas rippuva ketta hoolikalt rasvajäätmetest atsetooni, piirituse või bensiini abil (mil-leks?). Täidame anuma etaloonvedelikuga (destilleeritud vesi), laseme ketta vedelikku. Tekitame pöördvõnkumised, määrame võnkeperioodi T_0 (vähemalt 20 täisvõnke aja mõõtmise teel).

2. Määrame ligikaudu suhte \mathcal{D}_0 , arvutame n_m eespool kirjeldatud viisil.

3. Pannud ketta võnkuma (algamplituudiga mitte üle 180°), registreerime rea järjestikustele amplituudidele $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ vastavaid osuti asendeid skaalal, arvutame kaarepikkused a_1, a_2, a_3, \dots . Amplituudasendeid tuleb registreerida nii palju, et valemitest (10) saaks arvutada vähemalt 10 \mathcal{D}_0 väärtust. On selge, et kui $n_m = 10$, siis on tarvis 21 amplituudasendit, kui aga $n_m > 10$, siis tuleb neid registreerida rohkem. Arvutame \mathcal{D}_0 keskvaertuse. Hindame juhusliku vea suurust.

4. Kordame kõiki eespool kirjeldatud mõõtmisi uuritava vedeliku korral, arvutame T_1 ja \mathcal{D}_1 . Kui \mathcal{D}_1 ei erine \mathcal{D}_0 -st mitte eriti palju, võib siin n_m väärtuse võtta sama mis etaloonvedeliku korral.

Tuleb silmas pidada, et mõlema vedeliku korral peavad vedelikukihi paksus anumal ja ketta sukeldumise sügavus samad olema (miks?).

Määrame vedeliku temperatuuri.

5. Leidnud tabelist destilleeritud vee sisehõrdeteguri η_0 katse temperatuuril, arvutame valemitest (5) ja (7) uuritava vedeliku sisehõrdeteguri η_1 . Leiame tulemuse piir-vea.

6. Isaküsimusi.

1. Tuletada valemid (1) ja (6).

2. Kas on oluline, mitmenda täisvõnke amplituudi (võnkumise algusest lugedes) loeme Φ_1 -ks?

7. Kirjandus.

1. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс общей физики. Т. 1. М., Физматгиз, 1962, стр. 148-156, 395-399.

25. VEDELIKU SISEHÖRDETEGURI MÄÄRAMINE KAPILLAARVISKOSI-MEETRIGA.

1. Tööülesanne.

Soolade vesilahuste dünaamilise sisehõrde teguri määramine kapillaarviskosimeetriga võrdlusmeetodil.

2. Töövahendid.

Kapillaarviskosimeeter statiivil, suur keeduklaas veega, ripplood, sekundkell, termomeeter, püknomeeter, analüütilised kaalud, vihid, pipett, tükike filterpaberit, uuritavad vedelikud, etaloonvedelik (destilleeritud vesi).

3. Töö teoreetilised alused.

Viskoosse vedeliku voolamisel torus kulub osa vedeliku rõhu potentsiaalsest energiast sisehõrde jõudude ületamiseks ja staatiline rõhk torus langeb voolu suunas. Voolaku viskoosne mittekokkusurutav vedelik laminaarselt silindrilises torus raadiusega R , mille seinu vedelik määrgab. Sel juhul tekib torus vedelikuosakeste voolu kiiruse parabolne jaotus - vedelikuosakeste kiirus kaugusel r toru teljest avaldub:

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (1)$$

Siin Δp on staatilise rõhu muutus toru pikkuse l ulatuses, η on vedeliku dünaamiline sisehõrde tegur. Ajavahemiku Δt jooksul voolab sellisest torust läbi vedeliku hulk ruumalaga Q :

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p \Delta t}{8 l \eta} \quad (2)$$

Valemit (2) nimetatakse Poiseuille'i valemiks. Et suurused Q , r , Δp ja l on kõik eksperimentaalselt mõõdetavad, saab seda valemit kasutada η määramiseks. Tavaliselt lastakse η määramisel vedelikku voolata läbi hästi peene toru (kapillaari). See kindlustab laminaarse voolurežiimi (miks?) ja kapillaari otstel tekib ka suur rõhkude vahe Δp , mida on hea mõõta. Selliseid seadmeid nimetatakse kapillaarviskosimeetriteks.

Kapillaarviskosimeetrit on mugavam kasutada suhtelise sisehõõrdeteguri määramiseks. Kui võtta kaks vedelikku (vastavad suurused ühe jaoks olgu märgitud indeksiga 0 ja teise jaoks indeksiga 1) ja mõõta ajad t_0 ja t_1 , mis kuluvad nende vedelike ühesuguste ruumalade Q voolamiseks läbi ühe ja sellesama kapillaari (ühesugused r ja l), siis saadakse vastavalt valemile (2)

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p_0 t_0}{8 l \eta_0}$$

ja

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p_1 t_1}{8 l \eta_1}$$

Jagades teise võrrandi esimesega, saadakse

$$1 = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_0} \cdot \frac{t_1}{t_0} \cdot \frac{\eta_0}{\eta_1}$$

ehk

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{t_1}{t_0} \cdot \frac{\Delta p_1}{\Delta p_0} \quad (3)$$

Kui vedelik voolab välja raskusjõu mõjul, siis

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_0} = \frac{d_1}{d_0},$$

kus d_0 ja d_1 - vedelike tihedused, ja valemi (4) võib kirjutada kujul

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{t_1}{t_0} \cdot \frac{d_1}{d_0} \quad (4)$$

Teades võetud vedelike voolamise aegu t_1 ja t_0 ja vedelike tihedusi d_1 ning d_0 , võib määrata suhtelise sisehõõrdumisteguri $\frac{\eta_1}{\eta_0}$. Leides tabelist η_0 väärtuse, võib välja arvutada η_1 .

4. Katseriista kirjeldus.

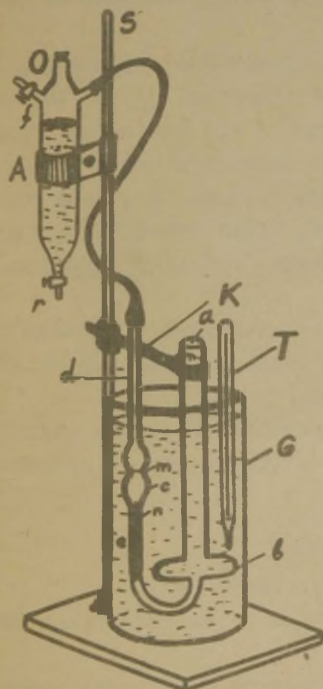
Katseriist (joon. 1) kujutab endast klaasist U-toru abecd, mille lai osa lõpeb all paisuga b; teine osa koosneb kapillaarist e, mis lõpeb üleval keraga c. Kera läheb üle palju jämedamaks toruks d. Torule üles- ja allapoole kera on kantud kaks märki m ja n, mis määravad vedeliku ruumala, mille voolamise aega katse ajal mõõdetakse.

Katseriist kinnitatakse klambriga K statiivile S ja lastakse veega täidetud katseklaasi G nii, et vee tase keeduklaasis oleks kõrgem ülemisest märgist m. Katseriist peab olema paigaldatud vertikaalselt. Keeduklaasi G paigutatakse ka termomeeter T.

Aspiraatorit A kasutatakse hõrenduse tekitamiseks torus d.

5. Töö käik.

1. Peseme viskosimeetri piiritusega, loputame hoolikalt destilleeritud veega. Seame viskosimeetri ripploodi abil vertikaalseks, laseme pipeti abil laia ossa ab teatud ruumala (6 ml, kõikide



Joon. 1.

katsete juures sama) destilleeritud vett. Avanud aspiraa-
tori kraani r, tekitame torus d hõrenduse ja imeme vee lä-
bi kapillaari, kuni vee pind on märgist m kõrgemal.

2. Likvideerime hõrenduse torus d (kuidas seda teha?),
Vee pind (menisk) hakkab laskuma. Mõõdame aja, mis kulub
meniski laskumiseks märgist m märgini n. Katset kordame vä-
hemalt 5 korda. Arvutame keskmise aja t.

3. Kallame vee katseriistast välja, loputame ta väike-
se koguse uuritava vedelikuga (milleks?) ja täidame seejä-
rel uuritava vedelikuga. Kordame eelkirjeldatud katset viis
korda.

Mõlemal juhul registreerime keeduklaasis oleva vee
temperatuuri. Et temperatuur katsete käigus ei muutuks, peaks
keeduklaasis olema toasoe vesi.

4. Määrame uuritava vedeliku tiheduse d_1 püknomeetri
abil. Määramise meetodika on antud raamatus /3/. Et tihedus
on tarvis määrata samal temperatuuril mis voolamise aegki,
siis tuleb püknomeetrit vedelikuga täidetult umbes 10 minu-
tit hoida enne kaalumist samas keeduklaasis, kus asub vis-
kosimeeter. Vahetult enne kaalumist viime vedeliku taseme
püknomeetris täpselt märgini (pipetiga vedeliku lisamise või
filterpaberiga äravõtmise teel).

5. Leidnud tabelist vee sisehõrde teguri η_0 katse tem-
peratuuril, arvutame valemist (4) uuritava vedeliku sisehõr-
de teguri η_1 . Arvutame tema piirvea.

Juhendaja valikul tuleb määrata ühe või mitme vedeliku
sisehõrde tegur või määrata η sõltuvus lahuse kontsent-
ratsioonist.

6. Idsaküsimusi.

1. Tuletada valemid (1) ja (2) (vaata /2/).

2. Milleks on antud katseriistal vajalikud laienevad
osad c ja b?

3. Kapillaarviskosimeetreid tehakse kapillaari mitme-
suguse läbimõõduga. Millest tuleb lähtuda viskosimeetri va-
likul konkreetse vedeliku korral?

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 230 - 232.
2. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс общей физики. Т. 1. М., Физматгиз, 1962, стр. 148-156 (§ 42. Движение вязкой жидкости.)
3. J. Lang jt. Füüsika praktikum. 1. osa. Tallinn, ERK, 1953, lk. 94-96.

26. ÕHU SISEHÕRDETEGURI MÄÄRAMINE KAPILLAARVISKOSI- MEETRIGA.

1. Tööülesanne.

Määrata õhu sisehõrde tegur.

2. Töövahendid.

Kapillaar ja vedelikmanomeeter alusel, gaasiholder, sekundkell, mõõtemikroskoop, mõõtjoonlaud, statiiv kapillaari kinnitamiseks, pump või kompressor gaasiholderi täitmiseks.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Sisehõrde jõudude olemus vedelikes ja gaasides on erinev, kuid nende jõudude toime välistele kehadele on mõlemal juhul sama iseloomuga. Seepärast võib gaaside sisehõrde tegurite määramisel kasutada samu meetodeid mis vedelike puhulgi.

Viskoosse mittekokkusurutava vedeliku voolamisel siindrilises torus raadiusega R kehtib Poiseuille'i valem (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 25):

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p \Delta t}{8 l \eta}, \quad (1)$$

kus Q on vedeliku hulk, mis voolab läbi toru mistahes ristlõike aja Δt jooksul,

Δp on rõhu langus toru osal pikkusega l ,

η on vedeliku dünaamiline sisehõrde tegur.

Gaasi voolamisele saab seda valemit rakendada vaid

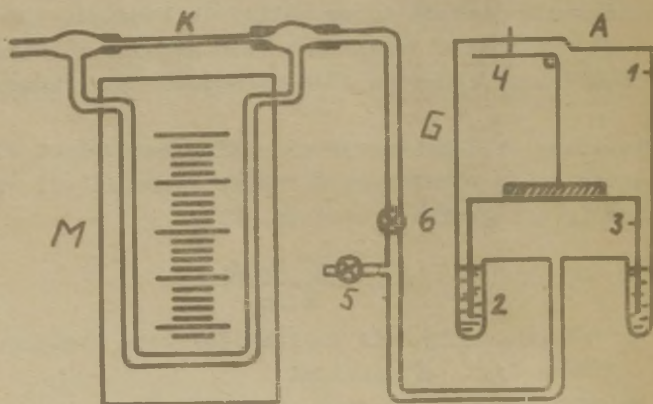
erijuhtudel, kui rõhu langus kogu voolu ulatuses on tühine ja gaasi võib teatud täpsusega lugeda mittekokkusurutavaks. Selline eeldus peab küllalt suure täpsusega paika gaasi voolamisel väikese kiirusega läbi lühikese kapillaari, kui rõhu langus kapillaaril moodustab mõnikümmend millimeetrit veesammast. Sellist kapillaari kasutataksegi gaaside sisehõõrdetegurite määramisel. Valemist (1) saadakse:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 l \phi} \quad (2)$$

kus $\phi = \frac{Q}{\Delta t}$ on gaasi voolu ruumkiirus, s.t. ajaühikus väljavoolanud gaasi ruumala antud rõhul.

4. Katseseadme kirjeldus.

Katseseadme (joon. 1) põhiosadeks on kapillaar K, vedelikmanomeeter M voolava gaasi rõhu languse mõõtmiseks kapillaaril ja uuritava gaasi allikas. Gaasi voolu teel enne ja pärast kapillaari manomeetri ühenduskohtades on suure ristlõikega osad (miks?).



Joon. 1.

Põhiliseks raskuseks katse juures on konstantse ruumkiirusega gaasivoolu saamine. Selleks on vaja garanteerida konstantne ülerõhk süsteemis kapillaari ees. Seda võimaldab antud juhul spetsiaalne seade - gaasiholder G (joon. 1). Gaasiholderi silindrilise korpuse (1) sisse on keevitatud teine, lühem ja väiksema läbimõõduga silinder (2). Nende silindrite õliga täidetud vahesse on asetatud kummuli kolmas, põhjaga silinder (3). Moodustub vedeliklukk, mis täielikult garanteerib lekkimise puudumise holderi töötavast ruumalast.

Kraani (5) kaudu pumbatakse gaasiholder õhku (või mõnda muud uuritavat gaasi) täis. Kui avada kraan (6), hakkab gaas läbi kapillaari välja voolama ülerõhu mõjul, mille tekitab silindri (3) raskusjõud. Et see jõud silindri laskudes oluliselt ei mautu, püsib ülerõhk ja järelikult ka ruumkiirus kogu katse ajal konstantsena. Läbi kapillaari voolanud gaasi ruumala mõõdetakse lihtrites gradueeritud skaalalt (4). Skaala labatud põhiviija ja skaala parandid saadakse kohapeal kasutada antavalt kaliibrimiskõveralt.

5. Töö käik.

1. Mõõdame kapillaari sisediameetri mõõtemikroskoobi-ga (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 4) ja pikkuse mõõtjoonlauaga (kui need suurused pole ette antud seadme konstantidena). Selleks kinnitame kapillaari statiivi külge horisontaalasendisse otsaga mikroskoobi objektiivi ette.

2. Veendunud, et kapillaar on seest kuiv ja temasse pole sattunud prügi, asetame ta seadmesse. Pumpame gaasiholderi õhku täis. Võimaliku leki kindlakstegemiseks kraanide ja kapillaari kinnituskohdade juures suleme kummikorgiga kindlalt seadme väljavoolutoru otsa, avame kraani (6). Vähemalt 5 minuti jooksul peab gaasiholderi skaala näit muutumatuks jääma. Suleme kraani (6), eemaldame korgi. Kui esines lekk, tuleb see juhendaja või laborandi kaasabil kõrvaldada.

3. Avsme vähehaaval kraani 6. Järsk rõhutõuge võib paisata osa vedelikku manomeetrist välja, kapillaari sattunud vedelik võib jääda seintele väikeste tilkadena ja muuta niiviisi kapillaari läbimõõtu. Manomeeter peab näitama püsivat rõhuvahet. Nüüd mõõdetakse ruumkiirus gaasiholderi skaala ja sekundkella abil. Sealjuures tuleb läbi kapillaari lasta selline õhu hulk, et ruumkiiruse määramise piirviga ei ületaks teiste valemis (2) esinevate suuruste määramise piirviga. Rõhkude vahe Δp arvutamiseks vajalik manomeetri vedeliku tihedus antakse ette seadme konstandina.

4. Kordame katsed vähemalt viis korda. Määrame õhu temperatuuri (toatemperatuuri). Arvutame η koos piirveega.

6. Lisaküsimusi.

1. Selgitada sisehõõrdumise olemust vedelikes ja gaasides. Kuidas sõltub gaaside sisehõõrdetegur temperatuurist?

2. Miks on juhendis öeldud, et gaasiholderi rõhumisjõud gaasile silindri laskudes oluliselt ei muutu? Kas ta mõningal määral muutub? Miks?

3. Vedeliku (gaasi) voolamisel silindrilises torus avaldub Reynoldsi arv

$$R = \frac{\rho v R}{\eta},$$

kus ρ on vedeliku (gaasi) tihedus, η tema sisehõõrdetegur, R - toru raadius ja v keskmine voolukiirus, mis arvutatakse ruumkiiruse järgi: $v = \frac{Q}{S}$ (S - toru ristlõike pindala). Reynoldsi arvu kriitiline väärtus on sel juhul 1200. Kui $R > R_{kr}$, võib voolamine üle minna turbulentseks; sel juhul Poiseuille'i valem ei kehti.

Kontrollida, kas antud katses võib esineda turbulentsi.

7. Kirjandus.

- И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. Т.1. М., Физматгиз, 1963, стр. 184-192.
- С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. Курс общей физики. Т.1. М., Физматгиз, 1962, стр. 148-156.

27. PINDPINEVUSTEGURI MÄÄRAMINE VEDELIKU TÕUSU JÄRGI KAPILLAARTORUDES.

1. Tööülesanne.

Vedeliku pindpinevusteguri määramine.

2. Töövahendid.

Katetomeeter, mõõtemikroskoop, erineva läbimõõduga kapillaartorud koos statiivi ja anumaga, ripplood, puhastuslahused.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Kui lõigata vedeliku pinda vabalt valitud mõttelise joonega, siis kummalgi pool joont asuvate molekulide vastastikusest mõjust põhjustatud tõmbejõud pinna mõlema osa vahel on seda suurem, mida suurem on joone pikkus l ; teiste sõnadega - pindpinevusjõud f on võrdeline eraldusjoone pikkusega l

$$f = \alpha l \quad (1)$$

Võrdetegurit α , mis on arvuliselt võrdne pinna ühikulise pikkusega piirjoonele mõjuva pindpinevusjõuga, nimetatakse pindpinevusteguriks.

Kui vedeliku pind, kokku puutudes mingi kõva kehaga, saab teatud kõveruse, siis võrreldes vedeliku vaba pinnaga on tal pindpinevusjõudude tõttu erinevad omadused. Pindpinevusjõud põhjustavad nii kumerate kui nõgusate vedeliku-pindade puhul lisarõhu, mis on alati suunatud pinna kõveruskeskendi suunas. Kui vedeliku pind on sfääriline, arvutatakse

se lisarõhk Δp valemist (tuletada see!)

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}, \quad (2)$$

kus R on pinna kõverusraadius.

Kirjeldatud lisarõhk, mis on vedeliku meniski kõveruse tagajärjeks, põhjustab vedeliku tõusu või languse peenikeses torudes, nn. kapillaartorudes. Vedelik tõuseb (langeb) seni, kuni vedelikusamba poolt avaldatav hüdrostaatliline rõhk tasakaalustab pinna kumerusest tingitud lisarõhu.

Kui eeldada, et vedelik märgab toru pinda täielikult, siis kõverusraadius R ühtib toru siseraadiusega r , nii et

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{r} = \rho gh, \quad (3)$$

kus ρ on vedeliku tihedus,

h - vedeliku tõusu kõrgus,

g - raskuskiirendus.

Järelikult, teades kapillaari raadiust, vedeliku tihedust ja vedeliku tõusu kõrgust, võib valemi (3) abil määrata pindpinevusteguri α .

4. Töö käik.

Eelkõige puhastame kapillaartorud hoolikalt kaaliumdikromaadi väävelhappelahusega ($K_2Cr_2O_7$ küllastatud lahus kontsentreeritud väävelhappes), seejärel destilleeritud vee ja piiritusega. Paigutame kapillaarid torudehoidja vastavatesse õõnsustesse, pingutame ettevaatlikult kruvid ning pöörame kapillaarid statiivil horisontaalseks. Kasutades mõõtemikroskoopi, määrame kõigi kolme kapillaari sisedia-meetrid (vt. käesoleva kogumiku juhend nr. 4). Diameetreid mõõdame iga toru puhul kummaski toru otsas kahes ristsihis. Viime kapillaartorud vertikaalasendisse, mida kontrollime ripploodi abil. Anuma täidame kolmveerandini destilleeritud veega ning juhime sinna kapillaarid. Kapillaarid ulatugu peaaegu anuma põhjani. Sellises asendis laseme kapillaartorusid mõni minut seista. Kui kanalid on täielikult märgu-

nud, tõstame torud kõrgemale ning mõõdame katetomeetri abil meniskite harikõrgused (igale lugemile tuleb lisada pikkus, mis on võrdne $\frac{1}{3}$ kanali raadiusest - meniski parandus). Korranud mõõtmisi analoogiliselt vähemalt kolm korda, arvutame pindpinevusteguri.

A r v u t u s e d. Kui torud on täiesti puhtad, siis vedeliku kõrgused torudes peavad iga kord olama võrdsed. Tähistame need kõrgused tähtedega h_1 , h_2 ja h_3 , torude raadiused aga vastavalt tähtedega r_1 , r_2 ja r_3 . Eelneva põhjal

$$\alpha = \frac{r_1 h_1}{2} \rho g = \frac{r_2 h_2}{2} \rho g = \frac{r_3 h_3}{2} \rho g,$$

millest

$$h_1 - h_2 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1} - \frac{2\alpha}{\rho g r_2} \quad \text{ja}$$

$$h_1 - h_3 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1} - \frac{2\alpha}{\rho g r_3};$$

järelikult

$$\alpha = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} (h_1 - h_2) \rho g = \frac{r_1 r_3}{2(r_3 - r_1)} (h_1 - h_3) \rho g.$$

Asetades võrduse paremasse poolde katseandmed $h_1 - h_2$, $h_1 - h_3$, r_1 , r_2 ja r_3 ning võtnud tabelist ρ vaatlustemperatuuril, leiame α .

6. Lisaküsimusi.

1. Milleks on vajalik kapillaaride väga hoolikas puhastamine?
2. Põhjendada meniski paranduse valikut, miks just $\frac{1}{3}$ kapillaari siseraadiusest?
3. Millal vedelikusammal kapillaaris tõuseb? Millal langeb?

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. М., "Наука", 1967, стр. 240-244.

2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1966, стр. 376-389.
3. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963, стр. 336-360.

28. PINDPINEVUSTEGURI SÕLTUVUS TEMPERAatuurIST JA LAHUSE KONTSESTRATSIOONIST.

1. Tööülesanne.

Lahuse pindpinevusteguri muutumise kontsentratsioonilise ja temperatuurilise käigu määramine.

2. Töövahendid.

Katseseade puualusel, elektripliit või gaasipõleti, keeduklaas, nõu aspiraatorist väljavoolava vee kogumiseks, nuritavad lahused, peene avaga klaastoru, termomeeter.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Kui lõigata vedeliku pinda vabalt valitud mõttelise joonega, siis kummalgi pool joont asuvate molekulide vastastikusest mõjust põhjustatud tõmbejõud pinna mõlema osa vahel on seda suurem, mida suurem on joone pikkus l ; teiste sõnadega - pindpinevusjõud α on võrdeline eraldusjoone pikkusega l

$$f = \alpha l \quad (1)$$

Võrdetegurit α , mis on arvuliselt võrdne pinna ühikulise pikkusega piirjoonele mõjuva pindpinevusjõuga, nimetatakse pindpinevusteguriks.

Kui vedeliku pind, kokku puutudes mingi kõva kehaga, saab teatud kõveruse, siis võrreldes vedeliku vaba pinna-ga on tal pindpinevusjõudude tõttu erinevad omadused. Pind-pinevusjõududel on sel juhul pinna kõverustsentri poole suu-

natud komponent, mis põhjustab samasuunalise lisarõhu nii kumerate kui ka nõgusate vedelikupindade korral. Kui vedeliku pind on sfääriline, arvutatakse lisarõhk Δp valemist (tuletada see!)

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}, \quad (2)$$

kus R on pinna kõverusraadius.

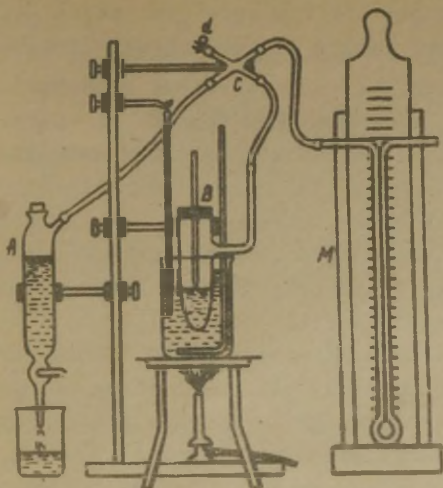
Valem (2) määrab lisarõhu ka vedelikus asuva gaasimullikeses sees. Seega on mulli sees rõhk alati kõrgem kui ümbritsevas atmosfääris ja ka vees samas sügavuses.

4. Katseriista kirjeldus ja mõõtmismeetodi teooria.

Katseriist (joon. 1) koosneb veega täidetud aspiraatorist A, mis kummivoolikute ja neljajarulise toru C abil on ühendatud piiritusmanomeetriga M ja hermeetiliselt suletava nõu B ülemise osaga. Nõu B alumisse ossa valatakse uuritav vedelik. Läbi korgis oleva avause viiakse B-sse peene otsaga klaastoru, mille ots seatakse nii, et ta parajasti puudutaks uuritava vedeliku pinda. Temperatuuri säilitamiseks (ja vajaduse korral muutmiseks) asetatakse nõu B veega täidetud keeduklaasi, mida saab soojendada gaasipõletil. Aspiraator suletakse hermeetilise korgiga. Näpits võimaldab ühendada kogu süsteemi atmosfääriga.

Kui sulgeda aspiraatori kork ning ettevaatlikult avada kraan (ainult osaliselt), siis hakkab vesi temast aeglaselt välja voolama ja aspiraatori ülemises osas, seega aga ka nõu B ülemises osas ning manomeetri vasakus harus tekib hõrendus. Teatud kindlal hõrendusel surub välisõhu rõhk läbi peene toruotsa nõusse B õhumullikeses. See toimub siis, kui välisõhu ning nõus B oleva õhu rõhkude vahe, mida mõõdetakse vedelikusammaste kõrguste vahega manomeetri B harudes, saab võrdseks uuritava vedeliku pindpinevusest tingitud rõhuga, mis püüab tekkivat mullikest kokku suruda.

Olgu nimetatud rõhkude vahe tähistatud tähega H ning uuritava vedeliku pindpinevuskoeffitsient tähega α . Siis mullikeses tekkimise momendil



Joon. 1.

$$\alpha = A \cdot H, \quad (3)$$

kus A on võrdetegur, mis sõltub toru otsa mõõtetest, olles seega antud katseriista puhul konstantne. Võrdetegurit A saab määrata, teostades katse mingi vedelikuga, mille pindpinevuskoeffitsient on teada (vesi). Siis, asendades vastavad väärtused H_0 ja α_0 , saadakse

$$A = \frac{\alpha_0}{H_0}. \quad (4)$$

Leides niiviisi riista konstandi, võib määrata meelevaldse vedeliku pindpinevuskoeffitsiendi valemist

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{H_0} \cdot H. \quad (5)$$

5. Mõõtmised.

a) Riista konstandi määramine. Valame aspiraatorisse vett kuni külgtoru nivooni, nõusse B aga destilleeritud vett kuni joonisel näidatud tasemeni, avame näpitsa d, viies sellega õhurõhu riista sees võrdseks välisõhu rõhuga. Seejuures võrdsustuvad vedeliku nivood manomeetri harudes. Nihutades manomeetri skaalat, seame nulljaotuse sellele nivoole. Suleme nüüd näpitsa d ja avame aspiraatori kraani niipalju, et rõhk muutuks küllalt aeglaselt ja oleks võimalik fikseerida nivoo de kõrgust manomeetris õhumullikese lahtirebenemise momendil.

Kui mullikeste tekkimise sagedus (silma järgi hinnates) muutub konstantseks, hakatakse võtma manomeetri lugemeid, märkides vedeliku nivoo manomeetri mõlemas harus õhumullikese eraldumise momendil. Lugemid võetakse mitte vähem kui kümne mullikese jaoks ja keskmistatakse. Samaaegselt märgitakse ka selle veeanuma temperatuur, milles asub nõu B. Asendades valemisse (4) leitud H_0 väärtuse ja tabelitest või graafikult leitud α antud temperatuuril, leitakse riista konstant A.

b) α sõltuvuse määramine lahuse kontsentratsioonist. Asendame nõus B vee teada oleva kontsentratsiooniga metüülpiirituse vesilahusega. Eelnevalt tuleb nõu B ja peeneotsaline toru loputada väikese hulga sama lahusega. Analoogiliselt eelnevas punktis kirjeldatuga mõõdetakse H ja valemi (5) järgi leitakse vastav α väärtus. Seda mõõtmist korratakse rea teada olevate erinevate kontsentratsioonidega lahustega ja joonistatakse α sõltuvuse graafik kontsentratsioonist $\alpha = \alpha(c)$.

c) α sõltuvus temperatuurist. Loputame ning täidame nõu B sobiva nivooni küülooliga. Soojendame välist anumad temperatuurini $80^\circ - 90^\circ$ ja laseme tal aeglaselt jahtuda, teostades punktis a) kirjeldatud mõõtmisi iga 10° tagant. Manomeeter olgu seejuures põletist

võimalikult kaugel ning tagumise küljega tema poole pööratud. Leides niiviisi α mitmesuguste temperatuuride t puhul, konstrueeritakse seose $\alpha = \alpha(t)$ graafik.

6. Isaküsimusi.

1. Põhjendada funktsioonide $\alpha = \alpha(c)$ ja $\alpha = \alpha(t)$ käiku.

2. Tõestada, et $A = \text{const}$, s.t. näidata, et sõltumata mistahes tingimustest mullikese kõverusraadius eraldumise momendil on alati üks ja sama (sama toru korral).

7. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр. 246-249.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. 1. М., "Наука", 1966, стр. 376-389.
3. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963, стр. 336-360.

29. TERMOSTAADI TÖÖREŽIIMI UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Termostaadi töö põhimõttega tutvumine ning tema režiimi uurimine sõltuvalt küttevõimsusest. Elektronrelee põhimõttega tutvumine.

2. Töövahendid.

Elektrikeedukann koos kaane ja segajaga, kontakttermomeeter, elektronrelee, laboratoorne termomeeter ($0,1^{\circ}$ jaotistega), autotrafo (vähemalt 5 A), voltmeeter 0-300 V, 50 Hz, planimeeter.

3. Termostaadi ehitusest ja termostateerimisest.

Termostaat on automaatne seadis temperatuuri hoidmiseks ettemääratud kõrgusel. Sõltuvalt keskkonnast, mille temperatuuri hoitakse püsivana, eristatakse vedelik-, õhk-, vaakuumtermostaate jne.

Iga termostaadi tähtsamateks koostisosadeks on termoregulaator ning soojusevahetaja. Kui ümbritseva keskkonna temperatuur on madalam termostaadi temperatuurist, siis soojusevahetajaks on küttekeha, millelt saadava energia arvel kompenseeritakse termostaadi soojuskadusid. Vastupidisel juhul, kui termostaadi temperatuur on madalam ümbritseva keskkonna temperatuurist, peab termostaadi koostisse kuuluma jahutaja.

Termoregulaatori ülesandeks on soojusevahetaja režiimi automaatne reguleerimine, mille tulemuseks on termostaadis temperatuuri püsimine ettenähtud piires. Iga termoregu-

laator sisaldab elementi, mille üks mingi parameeter sõltub temperatuurist. Vastava parameetri muutumine peab esile kutsuma soojusevahetaja režiimi muutumise sellises faasis, et termostaadi soojenemisel üle ettenähtud temperatuuri termoregulaator vähendaks soojusevahetaja poolt antavat võimsust, ning allajahtumisel - suurendaks võimsust.

Ükski termostaat ei hoia temperatuuri absoluutselt konstantsena. Termostateerimise täpsuseks nimetatakse temperatuuri maksimaalsete hälvete suurust keskmisest temperatuurist arvates, mille ümber kõigub termostaadis temperatuur. Temperatuuri kõikumised võivad tekkida mitmesugustel põhjustel, kuid enamasti on tingitud:

- 1) soojuse ülekandumise inertsist, s.t. soojusevahetajalt termoregulaatorini jõudmiseks kulub teatud ajavahemik;
- 2) termoregulaatori piiratud tundlikkusest.

Vastavalt automaatreguleerimise üldisele teooriale, millele allub ka termostaat, on süsteemi võnkumised seda suuremad, mida rohkem aega kulub informatsiooni jõudmiseks jõuahelast (näiteks kütteelemendist) informatsiooni vastuvõtjani ehk andurini. Termoregulaatoris on anduriks temperatuuri muutustele reageeriv element.

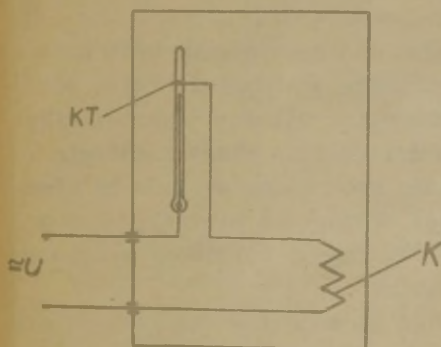
Termostaadi süsteemis on alati eristatavad rohkem kui üks inertsioosne lüli. Üks neist on termostateeriv keskkond. Vedelik- ning gaastäitega termostaatides vähendatakse sageli süsteemi inertsit termostateeritava keskkonna sundseamisega (elektriventilaator, mootoriga käivitatav tiivik jms.). Inertsioossete lülidena toimivad termostaadis veel termoregulaator ning soojusevahetaja, neil mõlemal on teatud soojusmahtuvus ning soojusejuhtivus, järelikult vajavad aega ümbritseva keskkonna temperatuurini jõudmiseks, kui nende temperatuur erineb sellest.

Sageli kasutatakse termoregulaatoris andurina elavhõbedakontakttermomeetrit, milles elavhõbedasamba kokkupuudet elektrikontaktiga kasutatakse ära termostaadi kütteahelas voolu tüürimiseks.

Osutub, et üksnes elavhõbedakontakttermomeetriga ei

saa kütet reguleerida üheski termostaadis. Kui temperatuur on ettemääratud madalam, siis elavhõbedasamm ei ulatu kontaktini ega sule küttevooluringi. Ning vastupidi, kui temperatuur on ettemääratud kõrgem, siis vooluring oleks suletud ning temperatuur aina tõuseks, kontakttermomeeter aga ei katkestaks vooluringi (vt. joon. 1; siin K on küttekeha, KT - kontakttermomeeter).

Automaatreguleerimise teooria terminoloogiat kasutades võiks öelda, et ülalnimetatud regulaator töötab vastupidises faasis, võrreldes sellega, mida vajatakse termostateerimise kindlustamiseks.

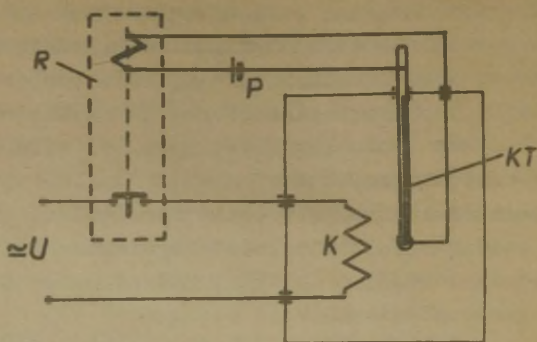


Joon. 1.

Ilma elektrireleeta ei saa elavhõbedakontakttermomeetrit kasutada termostateerimiseks. Elektrirelee on seadis, mis elektrenergia mõjutusel sooritab muutusi juhitavates vooluringides, nende sulgemist, avamist või ümberlülitamist. Levinuim elektrirelee liik on elektromagnetiline relee, mille all mõistetakse elektromagnetist ning kontaktisüsteemist koosnevat skeemielementi. Voolutugevuse muutmiseks elektromagneti mähises kutsutakse ankrü vahendusel esile kontaktide avanemist, sulgumist või ümberlülitumist.

Elektromagnetilisest releest ning elavhõbedakontakttermomeetrist koosneva termoregulaatoriga lihtsaima termostadi skeem on kujutatud joonisel 2. Siin K on küttekeha, KT - kontakttermomeeter, R - relee, P - releeahela toitepatari.

Joonisel 2 toodud skeemi puuduseks peetakse asjaolu, et elavhõbedasammast peab läbima relee mähise vool, mille



Joon. 2.

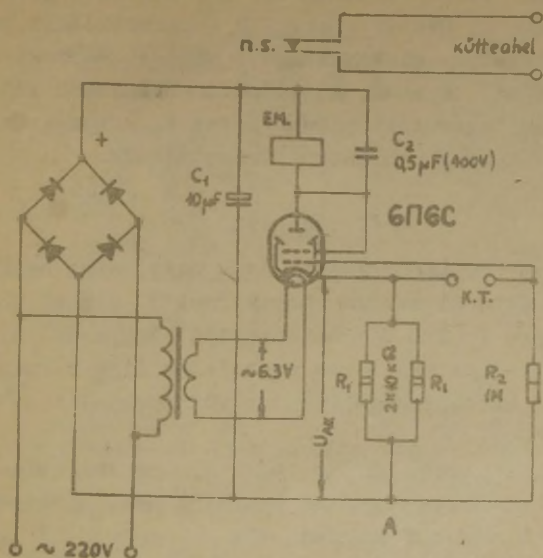
toimel elavhõbedasamba pikkus mõningal määral võib muutada, suurendades termostateerimise ebatäpsust. Teise puudusena tuleb märkida madalapingelise täiendava toiteallika vajadust (alla 10 V). Mõnekümnevoldise pinge kasutamine ei ole võimalik, sest viimane koos relee mähises indutseeruva pingega (ekstrapingega) põhjustaks elavhõbedasamba ning kontakti vahel sädeme või koguni kaarleegi tekkimist, seega kontakti tööea lühenemist.

Ülalnimetatud puudustest on vaba elektronlamp-releed sisaldav termoregulaator.

Joonisel 3 on esitatud lihtsaima elektronlamp-releed põhimõtteline skeem. Selle skeemi põhisõlmedeks on kaudse küttega elektronlamp, elektromagnetiline relee, anoodtoitealaldi ning kütetetransformaator. Anoodtoitealaldi moodustavad 4 germaaniumdiodi (sildlülituses) ning silumiskondensaator $C_1 = 10 \mu\text{F}$. Viimase ülesandeks on alaldatud pingepulsatsiooni vähendamine.

Skeemis kasutatav lamp 6П60 vajab kütteks pinget 6,3 V, tarvitades seejuures voolu 0,45 A.

Elektromagnetilise relee mähis EM on lülitatud järjestikku lambi anoodvooluahelasse. Relee mähisega paralleelselt on veel kondensaator $C_2 = 0,5 \mu\text{F}$, mille ülesandeks on relee mähist läbiva voolu täiendav silumine.



Joon. 3.

Voolutugevust läbi lambi tüüritakse esimese (katoodi-
le kõige lähemal asuva) võre potentsiaali muutmisega ka-
todi suhtes. Katodi potentsiaali loetakse skeemi vaatle-
misel kokkuleppeliselt nulliks.

Kontakttermomeeter lülitatakse katodi ning tüürvõre
vahele. Kui kontakttermomeeter mingil ajamomendil ei ühen-
da tüürvõret katodiga, siis võre omandab negatiivse potent-
siaali (katodi suhtes), sest võre on sel juhul ühendatud
läbi takisti R_2 skeemi punktiga A. Viimase potentsiaal ka-
todi suhtes on määratud lampi läbiva voolu tugevuse i_a
ning takisti R_1 takistuse korrutisega

$$U_{AK} = i_a R_1.$$

Antud olukorras lampi läbiva voolu tugevus ei ole pii-
sav relee elektromagneti töölerakendamiseks. Relee kontak-
tid on suletud.

Kui kontakttermomeeter ühendab võre katoodiga, siis väheneb järsult lambi sisetakistus ja vool läbi lambi suureneb hüppeliselt. Skeemi elemendid (elektronlambi tüüp, takistuse R_1 suurus, elektromagneti mähise keerdude arv) on nõnda valitud, et nüüd, kui võre on ühendatud katoodiga, anoodvoolu tugevusest piisab relee elektromagneti töö-lerakendamiseks ning kontaktide lahutamiseks.

4. Töö käik.

Käesoleva töö eksperimentaalses osas seame eesmärgiks vaadelda termostaadi mudeli tööd kolmel juhul: a) normaalse küttepingega (~ 220 V) režiimis, vett segamata, b) normaalse küttepingega, kuid vee segamisega ning c) poole võrra vähendatud küttepingega (veerandvõimsusega) ning vee segamisega.

Määrame kindlaks, milline paar klemme lampreleel on ette nähtud kontakttermomeetri ühendamiseks, milline - termostaadi kütteahela ühendamiseks.

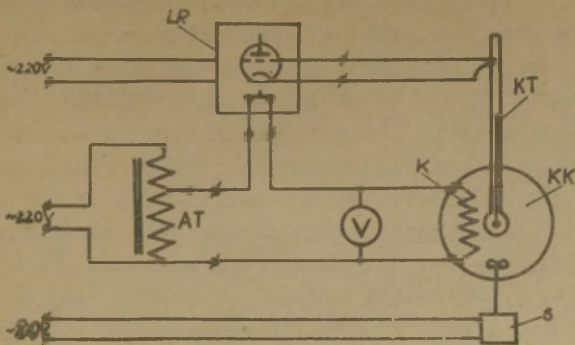
Termostaadina kasutame elektripeedukannu, mille kaanes on vasktorud ("taskud") kontakttermomeetri ning võrdlustermomeetri paigutamiseks. Keedukannu täidame veega nõnda, et termomeetrid ulatuksid ca 4 cm sügavuselt vette.

Kontakttermomeetri reguleerime mingile temperatuurile $+85^{\circ}$ - $+95^{\circ}\text{C}$ vahemikus.

Koostame skeemi vastavalt joonisele 4. Kui skeem on kontrollitud juhendava õppejõu poolt, siis võib ühendada lamprelee ning autotransformaatori elektrivõrku (seina-kontaktidega). Autotransformaatorit reguleerides seame küttepinge voltmeetrit jälgides 220 V-le.

Kui temperatuur tõuseb nivooni, mille juures relee lülitab termostaadi küttevoolu välja, siis alustame temperatuuri registreerimist, märkides üles iga poole minuti järel võrdlustermomeetri lugemid $0,05^{\circ}$ - $0,1^{\circ}$ täpsusega. Nõnda registreerime termostaadi soojenemist ning jahtumist vähemalt viie perioodi vältel.

Seejärel lülitame elektrivõrku veesegaja mootori ja



Joon. 4.

LR - lamprelee; AT - autotrafo; S - veesegaja mootor;
 KK - termostaat (elektrikeedukann); K - termostaadi küttekeha.

registreerime eespool kirjeldatud viisil temperatuuri käiku jällegi vähemalt viie võnkeperioodi vältel.

Lõpuks registreerime temperatuuri muutumist termostaadis veel neljakordselt vähendatud küttevõimsuse puhul. Registreerime temperatuuri jälle vähemalt viie võnkeperioodi vältel.

Tabelitesse kantud andmete põhjal koostame graafikud (millimeeterpaberil) kõigi kolme vaadeldud režiimi kohta. Abstsisssteljele kanname aja, ordinaatteljele temperatuuri. Graafikute võrdlemise hõlbustamiseks on soovitatav esitada nad erinevate värvidega või muul viisil ühes ning semas teljestikus.

Graafikute võrdlemisel leiame vastuse küsimustele:

- 1) Miks on temperatuuri ajalise muutuse graafikul tõusev osa järsem?
- 2) Mis määrab graafiku tõusunurga tõusvas ja langevas osas?
- 3) Mis määrab temperatuuri muutumise perioodi termostaadis?
- 4) Milline on kõige inertsioossem lüli antud termostaadis?

Määrame kõigil kolmel juhul termostateerimise täpsuse. Selleks tuleb leida keskmine temperatuur termostaadis, s.o. määrata iga graafiku jaoks horisontaalne sirge, nii et temperatuuri ajalise sõltuvuse graafiku ja selle sirge vahele jäävad pindalad ülal- ja allpool sirget oleksid võrdsed. Kui nimetatud graafik oleks sümmeetriline, s.o. kesksirgest üles- ja allapoole jäävad kujundid ("sakid") oleksid sarnased, siis oleks keskmise temperatuuri leidmine lihtne - see oleks lihtsalt kõrgeima ja madalaima temperatuuri aritmeetiline keskmine. Ebasümmeetrilise graafiku korral tuleb aga keskmise temperatuuri määramiseks leida eespool nimetatud kesksirge, mõõtes planimeetriga vähemalt 5 perioodi summaarsed pindalad ülal- ja allpool seda sirget. Sirget nihutades kordame mõõtmist seni, kuni need pindalad tulevad võrdsed. Viie amplituudi keskväärtusena määrame termostateerimise täpsuse eraldi positiivses ja negatiivses suunas. (Statsionaarse, s.o. ajas muutumatu või perioodiliselt muutuva soojusevahetusprotsessi korral peavad need 5 amplituudi võrdsed olema; on aga võimalikud mõõtmisvead ja juhuslikest põhjustest tingitud temperatuurimuutused.)

Leiame vastuse küsimusele: millised tegurid määravad termostateerimise täpsuse?

5. Täiendavaid küsimusi.

1. Tööstuslikes termostaatides on tavaliselt 2 soojusevahetajat - küttekeha ja jahutusseade. Miks soovitatakse valida nende võimsused selliselt (iga konkreetse temperatuuri korral), et termostaadi soojenemise ja jahutamise ajad oleksid võrdsed?

2. Kas termostateerimise täpsus sõltub ka termostaadi ja väliskeskkonna temperatuuride vahest? Kui jah, siis kuidas?

6. Kirjandus.

1. P. В. Телеснин. Молекулярная физика. М., "Высшая школа" 1965, стр. 15-18.

30. TAHKE KEHA ERISOOJUSE MÄÄRAMINE KALORIMEETRISEL MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Tahke keha erisoojuse määramine.

2. Töövahendid.

Kalorimeeter, aurukatel, veeauru-termostaat, uuritava
kehad, kalibritud pikkusega nõör, termomeeter, vatt-
meeter, autotrafo, elektrisekundkell, kell, tehnilised
osalud, vihid, baromeeter.

3. Sissejuhatus.

a) Erisoojuse mõiste.

Erisoojuseks nimetatakse soojushulka, mis kulub
ühikulise massiga keha soojendamiseks 1 deg võrra:

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} ; \quad (1)$$

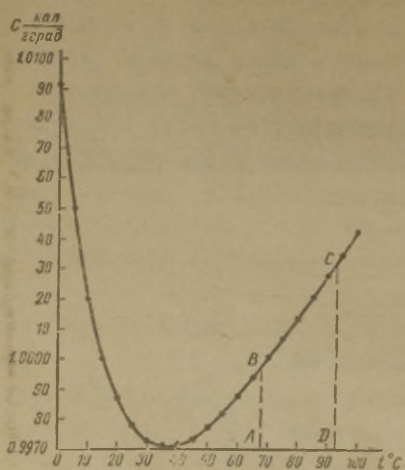
siin Q on soojushulk, mis on vajalik anda kehale massiga
 m , et tõsta tema temperatuuri t_1 -st t_2 -ni.

Et keha soojusmahtuvus sõltub temperatuurist, siis te-
gelikult on erisoojus määratud valemiga

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dt} . \quad (2)$$

Valem (1) aga määrab keskmise erisoojuse temperatuuride
vahemikus $t_1 \dots t_2$.

Temperatuuri tõusmisel paljude kehade soojusmahtuvus
suureneb. Vee soojusmahtuvus väheneb soojendamisel 0...
...35,5°C, kõrgematel temperatuuridel aga hakkab tõusma



Joon. 1.

(joon. 1). Temperatuuride vahemikus $0 \dots 100^{\circ}\text{C}$ on vee keskmine erisoojus võrdne erisoojusega soojendamisel $19,5^{\circ}\text{C}$ -lt $20,5^{\circ}\text{C}$ -ni.

Soojushulk, mis kulub keha soojendamiseks temperatuurilt t_1 temperatuurini t_2 , avaldub:

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (3)$$

On näha, et see soojushulk Q on võrdne keha aine erisoojuse temperatuurilise sõltuvuse kõvera aluse

pindala ja keha massi korrutisega.

Kui teatud temperatuuride vahemikus soojusmahtuvuse sõltuvus temperatuurist on vähene, siis keha soojendamiseks selles temperatuuride vahemikus käluv soojushulk on

$$Q = cm (t_2 - t_1). \quad (4)$$

b) Kalorimeetriliste mõõtmiste põhiprintsiibid.

Kalorimeeter koosneb kalorimeetrilisest nõust koos vedelikuga, termomeetrist, küttekehast ja vedeliku segajast. Soojusevahetuse vähendamiseks kasutatakse õhuvahedega eraldatud mitmekordsete seintega nõusid ja soojust halvasti juhtivaid materjale (klaasvatt j.m.).

Kalorimeetri soojusmahtuvus avaldub:

$$K = \sum_i m_i c_i, \quad (5)$$

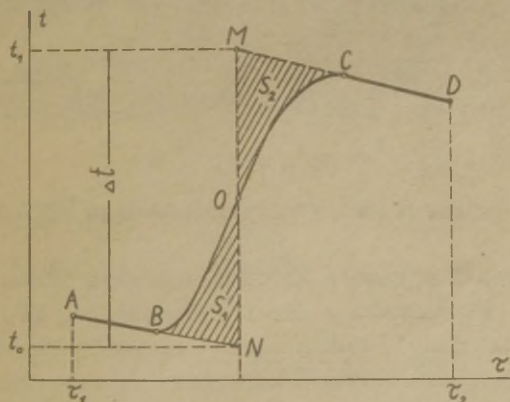
kus m_i on kalorimeetrilise süsteemi i -nda elemendi mass ja c_i - selle keskmine erisoojus. K suurus määratakse harilli-

kult katseliselt.

Oletame, et puudub soojusvahetus kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel. Andes kalorimeetrile soojushulga ΔQ , tõuseb tema temperatuur Δt võrra:

$$\Delta Q = K \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Et aga soojusvahetust kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel pole võimalik täielikult kõrvaldada, siis ei saa me katselisel teel täpselt määrata kalorimeetri temperatuuri muutust Δt . Küllaltki täpselt on võimalik seda määrata graafilise meetodiga.



Joon. 2.

Joonisel 2 on kujutatud graafiliselt temperatuuri muutumine termostaadis (horisontaalteljel aeg ja vertikaalteljel temperatuur).

Lõik AB iseloomustab temperatuuri muutumist kalorimeetris I etapil, kui toimub temperatuuri vähenemine soojusvahetuse tõttu kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel. II etapp (graafikul lõik BC) algab sellest momendist, kui kalorimeetrisse hakatakse andma soojushulka ΔQ . Seda etappi

iseloomustavad soojusvahetus kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel ning soojusvahetus kalorimeetrile soojust andva keha ja kalorimeetri vahel. Pärast soojusliku tasakaalu saabumist keha ja kalorimeetrilise süsteemi vahel väheneb jällegi kalorimeetri temperatuur soojusvahetuse tõttu kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel (lõik CD).

Kalorimeetrilise süsteemi temperatuuri muutuse Δt leidmisel asendatakse reaalne kõver ideaalsega. Oletame, et I etapil jahtus kalorimeeter temperatuurini t_0 , seejärel, oletades ΔQ silmapilkset üleandmist kalorimeetrile, tõusis kalorimeetri temperatuur II etapil t_1 -ni (t_1 -temperatuur, milleni tõuseks kalorimeetri temperatuur II perioodi lõpuks, kui puuduks soojusvahetus kalorimeetri ja ümbritseva keskkonna vahel). Seega $\Delta t = t_1 - t_0$.

Soojushulk, mille saab aja $\tau_2 - \tau_1$ jooksul kalorimeeter, on võrdeline pindalaga S kõvera ABOCD all (joon.3).

$$\Delta Q = \beta S. \quad (7)$$

Siin β on kalorimeetri konstruktsioonist sõltuv koefitsient.

Seega reaalse kõvera ABOCD asendamine ideaalsega peab toimuma nii, et pindala S jääks muutumatuks. See on võimalik ainult sel juhul, kui pindalad S_1 ja S_2 on võrdsed (joon. 2). Sellel põhinebki kalorimeetri temperatuuri muutuse määramise graafiline meetod - ekstrapoleeritakse lõike AB ja CD ning tõmmatakse vertikaalne joon MN nii, et $S_1 = S_2$ (pindalade S_1 ja S_2 võrdsus määratakse katseliselt planimeetriga või paberist väljalõigatud figuuride kaalumisega).

c) Kalorimeetri soojusmantuvuse määramiseks tuleb anda temale mõõdetud soojushulk ΔQ ja määrata eelkirjeldatud viisil temperatuuri muutus Δt . Mõõdetud soojushulka on kõige lihtsam anda kalorimeetrile elektriküttekeha abil. Vattmeetri abil määratakse küttekeha võimsus N , sekundkella abil aeg $\Delta \tau$, mille jooksul küttekeha oli sisse lülitatud. Soojusmahtuvus arvutatakse:

$$K = \frac{dQ}{dt} = \frac{N \Delta \tau}{\Delta t} \quad (8)$$

d) Tahke keha erisoojuse c määramiseks tuleb tõsta selle keha temperatuur kõrgemaks kalorimeetri temperatuurist. Seda on mugav teha näiteks veeauru abil. Kui veeauruga ühta mingit keha, püsib süsteemi auru - keha temperatuur konstantseks (võrdsena vee keemistemperatuuriga t_3 antud rõhul), kui soojuskaod teatud aja jooksul ei ületa sama aja jooksul juurdevoolava auru kondenseerumisel eralduvat soojushulka.

Soojendatud keha (massiga m) lastakse kalorimeetrisse, mille temperatuur olgu t'_0 . Soojusvahetuse tõttu keha ja kalorimeetri vahel saabub tasakaaluline temperatuur Θ , seejuures kalorimeetri temperatuur tõuseb $\Delta t_1 = \Theta - t'_0$ võrra. Soojusliku tasakaalu tingimustes kehtib seos:

$$c m (t_3 - \Theta) = K \Delta t_1,$$

millest

$$c = \frac{K \cdot \Delta t_1}{m(t_3 - \Theta)}.$$

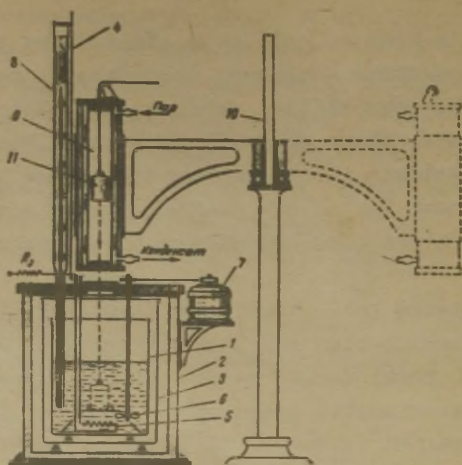
Et $\Theta = t'_0 + \Delta t_1$, siis

$$c = \frac{K \cdot \Delta t_1}{m [t_3 - (t'_0 + \Delta t_1)]} \quad (9)$$

Kalorimeetri temperatuuri muutus määratakse ka nüüd graafilisel meetodil.

4. Katseseadme kirjeldus.

Käesolevas katses kasutatava kalorimeetri (joon. 3) kalorimeetriline nõu (1) on väliskeskkonnast iseleeritud kahekordsete seintega (2) ja (3) anuma abil. Kaane külge on monteeritud küttekaha (5) ja vedeliku (vee) segaja (6) koos mootoriga (7) ning termomeeter (8). Küttekehale antakse 50 Hz vahelduvpinget üle reguleeritava autotransformatori, võimsust mõõdetakse vattmeetriga.



Joon. 3.

Uuritavast tahkest ainest valmistatud silindrilist keha (11) kuumutatakse pealt pööratava kaanega suletavas veeauru-termostaadis (9), mis on kinnitatud statiivile (10). Samal statiivil on veel konksuga muhv kalibreeritud pikkusega nõõri kinnitamiseks. Nõõri abil fikseeritakse uuritav keha kahes asendis: veeauru-termostaadi keskpai-gas ja kalorimeetrilises nõõs parajal sügavusel (nii et ta oleks üleni veepinna all, kuid ei vigastaks segajat ega küttekeha).

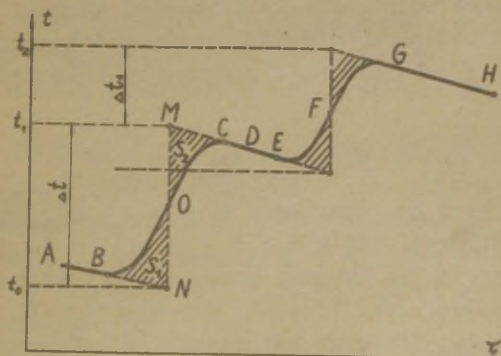
Auru tekitatakse spetsiaalses elektriga kõõetavas katlas.

5. Tõõ käik.

1. Kaalume uuritava keha tehnilistel kaaludel, ase-tame ta termostaati, lülitame aurukatla kütte sisse. Ter-mostaadi ja konksuga muhvi asendeid sobitades seame keha koos termostaadiga kalorimeetri kohale, nii et kalibri-

tud nõõri kaht aasa kasutades oleks teda lihtne kiiresti ühest eespool nimetatud asendist teise viia. Täidame kalorimeetrisse nõu vajaliku tasemeni destilleeritud veega.

2. Määrame kalorimeetri soojusmahtuvuse. Lülitame sisse veesegaja, märgime üles termomeetri näidud iga 30 s järel (vähemalt 5 - 7 min. jooksul). Seejärel lülitame sisse kalorimeetri küttekeha (5 - 10 minutiks), jätkates termomeetri näitude registreerimist. Temperatuuri registreerime veel ka pärast küttekeha väljalülitamist 8 - 10 min. jooksul. Joonestanud graafiku $t = f(\tau)$, määrame Δt (joon. 4).



Joon. 4.

Küttekeha töötamise aega mõõdame elektrisekundkella abil, mis lülitatakse sisse sama lülitiga, millega küttekeha. Valemist (8) arvutame soojusmahtuvuse K .

3. Laseme uuritava keha termostaadist kalorimeetrisse (vesi katlas peab keema, termostaadist peab koos kondensaatveega välja voolama ka kuuma auru juga - miks?). Seda katset on soovitatav alustada kohe pärast eelneva katse lõppemist, siis hoiame aega kokku (kuidas?). Jätkame temperatuuri registreerimist samade ajaintervallide ta-

gant, andmed kanname samale graafikule, kuhu eelneva katse andmedki (joon. 4). Määratud graafikult t_0' ja Δt_1 , arvutame valemist (9) erisoojuse t_3 leiame tabelitest, määratud eelnevalt atmosfääri rõhu baromeetriga.

Arvutame mõõtmistulemuse piirvea.

Mitme aine erisoojus tuleb määrata, seda otsustab juhendaja.

6. Täiendavaid küsimusi.

1. Miks on kalorimeetri väline anum poleeritud ja niikeldatud?

2. Kontrollida Dulong-Petit' seaduse kehtivust katsetulemuste põhjal.

3. Õhk on halb soojusjuht vaid siis, kui temas puuduvad konvektsioonivoolud. Kas kalorimeetri anumate seinte vahelistes õhukihtides on konvektsioonivooludel võimalik tekkida? Kui on, siis kuidas tuleks muuta kalorimeetri konstruktsiooni?

7. Kirjandus.

1. A. B. Кортнев и др. Практикум по физике. М., "Высшая школа", 1961, стр. 101-108.
2. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963, стр. 110-114, 476-484.
3. Р. В. Телеснин. Молекулярная физика. М., "Высшая школа", 1965, стр. 67-82.

31. METALLIDE ERISOOJUSE MÄÄRAMINE JAHTUMISMEETODIL.

1. Tööülesanne.

Metallide erisoojuse temperatuurist sõltuvuse määramine.

2. Töövahendid.

Statiiv elektriühju ja termopaariga, transformaator ühju kütteks, sekundkell, millivoltmeeter, termomeeter, uuritavatest metallidest silindrilised proovikehad.

3. Meetodi teooria ja katseseadme kirjeldus.

Metallitükk, mille temperatuur on ümbritseva keskkonna (õhu) temperatuurist kõrgem, jahtub. Soojushulk, mida see metallitükk annab ümbritsevatele õhule ajavahemiku dt jooksul, on arvutatav tema erisoojuse c ja temperatuuri muutumise kiiruse $\frac{\partial T}{\partial t}$ kaudu:

$$Q = \int_V c \rho \frac{\partial T}{\partial t} dt dV. \quad (1)$$

Siin ρ on metalli tihedus; integreerimine toimub üle kogu metallitüki ruumala V .

See soojushulk antakse õhule metallitüki välispinna kaudu, teda võib arvutada ka Newtoni valemi järgi soojusevahetusprotsesside kohta:

$$\Delta Q = \int_S \alpha (T - T_0) dt dS. \quad (2)$$

Siin α on soojusevahetuse tegur, T_0 on väliskeskkonna temperatuur (keskkond loetakse olevat lõpmatu ulatusega,

tema temperatuur ei muntu soojusevahetusprotsessi tulemusena), T on metallitüki temperatuur. Integreerimine toimub üle kogu metallitüki välispinna.

Homogeense metallitüki korral on c ja ϱ kogu ruumala ulatuses konstantsed. Eeldades, et ka jahtumise kiirus $\frac{\partial T}{\partial t}$ on kogu ruumala ulatuses konstantne ja et α ning T on kogu välispinna ulatuses konstandid, saab avaldised (1) ja (2) lihtsalt integreerida. Et (1) ja (2) vasakud pooled on võrdsed, siis võib kirjutada

$$c \varrho \frac{\partial T}{\partial t} V = \alpha (T - T_0) S. \quad (3)$$

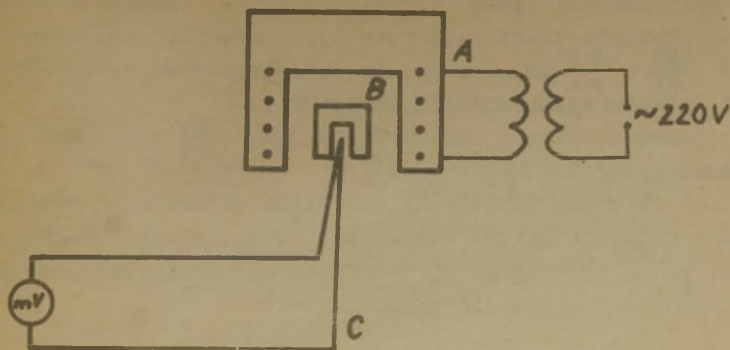
Kahe erinevast materjalist, kuid samade lineaarmõõtmega metallitüki korral on $\alpha_1 = \alpha_2$, $S_1 = S_2$ ja $V_1 = V_2 = V$. Kirjutatud avaldise (3) kummagi metallitüki jaoks üles sama temperatuuri korral (s.t. $T_1 = T_2$) ja jaganud võrduste vastavad pooled, saadakse

$$c_2 = c_1 \frac{m_1 \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_1}{m_2 \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_2}. \quad (4)$$

Siin $m_1 = \varrho_1 V$ ja $m_2 = \varrho_2 V$ on vastavalt esimese ja teise metallitüki massid.

On näha, et kui ühe metalli (etalooni) jaoks on teada tema erisoojus c_1 mingil temperatuuril T , siis on võimalik määrata teiste metallide erisoojusi samal temperatuuril, määrates eksperimentidest jahtumiskiirused etalooni ja uuritava metalli jaoks (samal temperatuuril).

Katseseadme skeem on toodud joonisel 1. Elektriahi A on nihutatav piki statiivi metallvarba üles ja alla ning varva ülemises otsas pööratav ümber varva pikitelje. Uuritavast või etaloonainest silindrikujulise proovikeha B ühes otsas on ava, kuhu ulatub portselantoru termopaariga C. Termopaari elektromotoorset jõudu mõõdetakse millivoltmeetriga mV . Termopaari "teine jootekoht" on statiivil olevate klemmide all. Elektriahju köetakse vahelduvpingega müttetransformaatorist Tr .



Joon. 1.

4. Töö käik.

1. Asetame ühe proovikehadest portselantorule, laseme ahju alla, nii et silinder oleks täielikult ahju sees. Lülitame sisse küttevoolu. Kui proovikeha on kuumenenud 550 - 600°C (alumiiniumi mitte kuumutada üle 550°C!), tõstame ahju kiiresti üles ja pöörame 180° ümber statiivi varva (proovikeha kohalt ära). Proovikeha jahtub mitteliikuvas õhus. Iga 10 s järel kirjutame üles millivoltmeetri näidu. Mõõdame ka "teise jootekoha" temperatuuri. Kui silinder on jahtunud alla 100°C, kordame katsed (iga proovikehaga vähemalt 3 katsed), alustades aja lugemist samast temperatuurist mis esimeses katses. Arvutame keskmised temperatuurid.

2. Joonestame kõverad $T = f(t)$. Millivoltmeetri näitudele vastavad temperatuuri väärtused leiame riistaga kaasasolevalt kalibrimiskõveralt. Sealjuures tuleb arvestada ka "teise jootekoha" temperatuuri.

3. Meil tuleb leida jahtumiskiiruse $\frac{\partial T}{\partial t}$ sõltuvus temperatuurist. Selleks diferentseerime funktsiooni $T = f(t)$ vertikaalsete joontega osadeks. Vertikaalsed jooned peavad üksteisele küllalt lähedal olema (miks?) ja võrdsel kaugusel üksteisest. Kõvera lõikepunktidele vertikaalidega vastavate ordinaatide väärtuste vahed kujutavad endast tem-

peratuurimuutusi teatud ajaintervallides. Jagades ordinaatide väärtuste vahed vastavate ajaintervallidega, saame suurusel $\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\partial T}{\partial t}$ väärtused, mis iseloomustavad jahtumiskiirust vastava ajaintervalli keskpunktis.

Leidnud kõikide proovikehade jaoks $\frac{\partial T}{\partial t}$ väärtused, joonestame graafikud $\frac{\partial T}{\partial t} = \varphi(T)$.

4. Arvutame uuritavate metallide erisoojused mitmesugustel temperatuuridel valemi (4) järgi. Etaloonaineks on vask, mille erisoojuse c_1 väärtused sõltuvalt temperatuurist on antud alltoodud tabelis.

T(°C)	0	100	200	300	400	500	600
c_1 (J/kg.deg)	381,0	393,6	408,2	422,0	434,6	448,0	456,4

Massid määrame analüütilistel kuuludel.

Uuritavate ainete jaoks arvutame erisoojused selles tabelis antud temperatuuridel. Joonestame graafikud $c = \psi(T)$ iga metalli jaoks.

5. Täiendavaid küsimusi.

1. Millistel eeldustel võib lugeda $\frac{\partial T}{\partial t}$ ja T kogu metalli ruumala ja pinna ulatuses konstantideks? Kas töös kirjeldatud meetod on kasutatav ka mittemetallide korral?

2. Defineerida soojusvahetuse tegur α . Millest ta sõltub?

3. Kas kirjeldatud meetod kõlbab ka absoluutseteks mõõtmisteks (ilma etaloonita)?

4. Kuidas mõista väljendit "proovikeha jahtub mitte-liikuvus õhus"? Kas õhu mitteliikuvus on obligatoorne tingimus? Kuidas seda garanteeritakse antud katses?

6. Kirjandus.

1. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., "Наука", 1967, стр.196-198.
2. Р. В. Телеснин. Молекулярная физика. М., 1965, стр. 67-71, 140_141.

32. METALLI (HEA SOOJUSJUHI) SOOJUSLIKU ERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Määrata vase soojuslik erijuhtivus.

2. Töövahendid.

Soojusejuhtivuse määramise riist 2 termopaariga, 2 galvanomeetrit, veevoolu stabiliseerimise anum, voolikud, nihik, sekundkell, mõõtsilinder.

3. Teooria ja katseseadme kirjeldus.

Tahkes kehas on põhiliseks soojuse levimise viisiks soojusejuhtivus. Juhtivuse tõttu levib soojus keha kõrge- ma temperatuuriga osadest madalama temperatuuriga osadesse. Soojusejuhtivuse üldine täpne teoreetiline käsitlus tahke keha puhul on väga keeruline. Ainult metallides, kus põhilisteks soojuse edasikandjateks on elektrongaasina käsitletavad vabad elektronid, saab soojusejuhtivust teoreetiliselt võrdlemisi lihtsalt käsitleda. Käesolevas juhendis piirdume üldise termodünaamilise teooriaga.

Olgu ühtlase ristlõikepindalaga S varb, mille otstes on temperatuurid vastavalt t_1 ja t_2 . Varva pikkus olgu l . Katsed ja ka intuiitiivne kujutus näitavad, et ajavahemiku τ jooksul varva mistahes ristlõiget läbinud soojushulk on võrdeline ristlõike pindalaga S ja temperatuuri gradiendiga $\frac{\Delta t}{\Delta x}$:

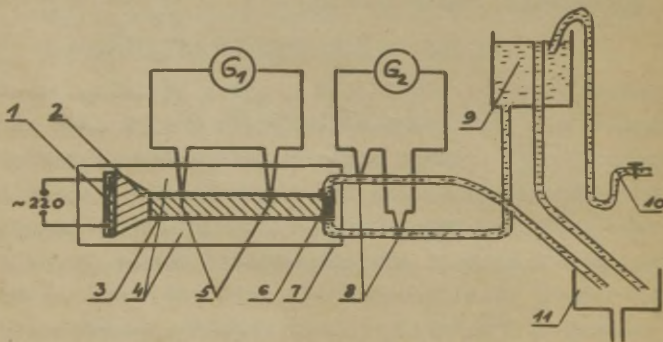
$$Q = \lambda S \tau \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (1)$$

Antud juhul

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{l}$$

Võrdetegurit λ nimetatakse soojusejuhtivuse teguriks e. soojuslikuks erijuhtivuseks. Valemist on näha, et kui $\frac{\Delta t}{\Delta x} = 1$, $S = 1$ ja $\tau = 1$, siis $Q = \lambda$, s.t. soojusejuhtivuse tegur on suurus, mida mõõdetakse soojushulgaga, mis ajaühikus läbib temperatuuri gradiendi suunaga risti oleva pinnal ühikut, kui temperatuuri gradient on võrdne ühe kraadiga pikkusühiku kohta.

λ määramiseks on olemas mitmesuguseid meetodeid. Üks lihtsamaid ja näitlikumaid on käesolevas ülesandes kirjeldatav meetod, mis põhineb valemi (1) otsesel kasutamisel. Siin hoitakse temperatuuri gradient kogu katse ajal konstantsena, mis teebki katse ülimalt näitlikuks ja andmete ümbertöötamise väga lihtsaks.



Joon. 1.

Uuritavast metallist valmistatud massiivne silinder (3) (joon. 1) on asetatud lahtivõetavasse puitkasti (7) ja konvektsiooni- ning kiirguskadude vältimiseks vooderdatud soojust isoleerivate materjalidega (4) (vilt, vatt, asbest). Silindri ühte otsa on joodetud rauast tüvikoonus

(2), milles asub elektrisoojenduskeha (1). Teise otsa on liimitud silindriline karp (6), millest voolab läbi jahutusvesi. Veevoolu konstantse kiiruse garanteerimiseks kasutatakse spetsiaalset ülevooluanumat (9), millesse juhitakse vesi kraanist (10). Vesi juhitakse ära valamusse (11). Temperatuuri gradienti mõõdetakse termopaariga (5), jahutusvette läinud soojushulga arvutamiseks vajalikku temperatuuride vahet mõõdetakse termopaariga (8).

Temperatuuride vahede mõõtmiseks tuleb antud töös kasutada termopaare. Termomeetreid ei saa kasutada kahel põhjusel: 1) termomeetrid nõuavad õige näidu saamiseks nende asetamist mõõdetava temperatuuriga keskkonda kas üleni või vähemalt skaala alguseni (olenevalt, kuidas on teostatud nende kalibratsioon tehases), 2) täpsed termomeetrid on suurte reservuaaridega, nende viimine uuritavasse silindrisse rikub oluliselt soojuse levimise tingimusi, nad on käsitsemisel õrnad ja kohmakad. Väikesed termomeetrid on aga ebatapsed ja ei kõlba väikeste temperatuurivahede mõõtmiseks. (jahutusvee temperatuuri tõus on ainult 2 - 3°C).

Soojenduskehas eralduv soojus levib silindri jahutatava otsa poole. Jahutusvee konstantse voolukiiruse korral tekib silindri ulatuses statsionaarne (ajas muutumatu) temperatuuri jaotus. Sel juhul saab jahutusvesi mistahes ajavahemikus samapalju soojust, kui eraldub küttekehas sama ajavahemiku jooksul (soojusejuhtivuse tegurite suure erinevuse tõttu võib soojuskao vilti ja asbesti jätta arvestamata). Et veevoolu kiirus on konstantne, jääb ka jahutuskarbist väljavoolanud vee temperatuuri tõus muutumatuks.

Olgu termopaari (5) jootekohtade vaheline kaugus l' , temperatuuride vahe termoelemendi jootekohtades Δt_1 , silindri ristlõikepindala S . Siis silindri mistahes ristlõiget läbib ajavahemiku τ jooksul soojushulk (valemi 1):

$$Q_1 = \lambda S \tau \frac{\Delta t_1}{l'}. \quad (1a)$$

Sama aja jooksul saab jahutusvesi soojust:

$$Q_2 = c.m \Delta t_2, \quad (2)$$

kus m - ajavahemiku τ jooksul jahutuskarbist läbivoolanud
vee mass,

c - vee erisoojus,

Δt_2 - jahutusvee temperatuuri tõus.

Eespool öeldu põhjal

$$Q_1 = Q_2,$$

millest

$$\lambda = \frac{c m l' \Delta t_2}{8 \tau \Delta t_1}. \quad (3)$$

4. Töö käik.

Avame kasti, tutvume katseseadme ehitusega. Nihiku abil mõõdame termopaari (5, joon. 1) jootekohtade vahelise kauguse ja silindri läbimõõdu. Suleme kasti uuesti.

Soojenduskeha lülitame 220 V vahelduvvoolu võrku.

Ühendame termopaarid mõõteseadmetega. Jahutusvee temperatuuri tõusu mõõtmiseks kasutame peegelgalvanomeetrit M 17 (C, joonisel 1), temperatuuri gradiendi mõõtmiseks silindrisalalisvoolu potentsiomeetrit III-63. Enne (ja pärast) mõõtmisi, lühistanud galvanomeetri klemmid, kontrollime ja vajaduse korral korrigeerime valgusosuti nullseisu.

Paneme kokku jahutusvee süsteemi vastavalt joonisele 1. Keerame kraani lahti, laseme täituda ülevooluanuma kuni ülevoolutoru ääreni ja reguleerime veesurve parajaks, nii et ülevoolutorust voolaks pidevalt vesi. Sellisel juhul veesurve väikesed kõikumised veevärgis mõjutavad ainult ülevoolutoru kaudu äravoolavat veehulka, kuna veetase (järelilikult rõhk ja voolu kiirus jahutusvee torustikus) jääb konstantseks. Ülevooluanuma riputame seinale kinnitatud laual kõige madalama kruvi külge. Juhul, kui voolikutesse on jäänud õhku, võib vee vool muutuda katkendlikuks, pulseerivaks. Siis tuleb tõsta anum korraks maksimaalselt kõrgele, nii et kiirem veevool viiks õhu välja.

Oodanud, kuni protsess on muutunud statsionaarseks

(galvanomeetri valgusosuti ja potentsiomeetri osuti seisavad vähemalt 1 minuti jooksul paigal), mõõdame mõõtsilindri ja sekundkella abil antud silindriga mõõdetava maksimaalse veehulga läbivoolamiseks kulunud aja ja fikseerime galvanomeetri ning potentsiomeetri näidud. Seda teeme ülevooluanuma vähemalt kolmel kõrgusel, igal kõrgusel vähemalt viis korda. Termopaaride kalibrimisgraafikud antakse välja praktikumis.

Lõpetanud katsed, tuleb enne veevoolu sulgemist ühendada lahti galvanomeetri G_2 ahel, sest veevoolu katkemisel võib karbi alumisse ossa jäänud vee tõttu tekkida termopaa-ri (8, joon. 1) jootekohtade vahel suur temperatuuride vahe, mis koormab galvanomeetri üle.

Igal kõrgusel saadud tulemused keskmistame, arvutame λ .

Saadud kolmest λ -st arvutame keskmise. Arvutame katsetulemuse piirvea.

5. Lisaküsimusi.

1. Millised soojuse edasikandumise viisid eksisteerivad looduses?

2. Millised raskused tekivad kirjeldatud meetodi rakendamisel halbade soojusejuhtide korral?

3. Miks peab ülevooluanuma keskmine toru olema tunduvalt suurema diameetriga kui teised torud?

6. Kirjandus.

1. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963, стр. 172-183, 487-491.

2. Р. В. Телеснин. Молекулярная физика. М., "Высшая школа", 1965, стр. 133-135, 148-149.

33. ÕHUNIISKUSE MÄÄRAMINE.

Sissejuhatus.

Õhuniiskuse iseloomustamiseks kasutatakse järgmisi suurusi.

1. Õhu absoluutne niiskus a - veeauru mass õhu ruumiühiku kohta, s.o. veeauru osa- ehk partsiaaltihedus. Mõõdetakse tavaliselt grammides kuupmeetri kohta (g/m^3).

2. Veeauru osarõhk õhus e ; mõõdetakse elavhõbedasamba millimeetrites (mm_{Hg}) või millibaarides (mb).¹

¹ Füüsikas nimetatakse baariks CGS-süsteemi rõhuühikut dn/cm^2 . Meteoroloogias defineeritakse baar miljon korda suurema ühikuna, s.o. $10^6 dn/cm^2$. Praktikas kasutatakse aga põhiliselt millibaari:

$$1 \text{ mb} = 1000 \text{ dn/cm}^2.$$

Et olemasolevad psühromeetrilised tabelid on meteoroloogilised, siis kasutame käesolevas töös meteoroloogilist terminoloogiat. Võib välja arvutada, et rõhule 1 baar (meteoroloogiline) vastab elavhõbedasamba kõrgus 750,08

mm,

$$1 \text{ mm}_{Hg} \text{ vastab } \frac{4}{3} \text{ mb,}$$

$$1 \text{ mb} \quad " \quad \frac{3}{4} \text{ mm}_{Hg},$$

$$760 \text{ mm}_{Hg} \quad " \quad 1013,2 \text{ mb.}$$

Praktikas mõõdetaksegi just veeauru osarõhku, mida sageli (rangelt öeldes ebaõigesti) nimetatakse absoluutseks niiskuseks.

Seos õhu absoluutse niiskuse a ja veeauru osarõhu e vahel avaldub järgmiselt:²

$$a = \frac{0,81 e}{1 + \alpha t} \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (1)$$

kus e on mõõdetud mb-des; ja

$$a = \frac{1,06 e}{1 + \alpha t} \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (2)$$

kus e on mõõdetud mm_{Hg}-tes,

α - õhu ruumpaisumiskoeffitsient, $\alpha = 0,00366$,

t - õhu temperatuur (Celsiuse skaala järgi).

3. Eriniiskus s - veeauru hulk grammides, mis sisaldub ühes kilogrammis niiskes õhus. Eriniiskust s võib arvutada valemist

$$s = \frac{622e}{p - 0,378e} \text{ (g/kg)}, \quad (3)$$

kus e on veeauru osarõhk ja

p - õhurõhk.

² 1 m^3 õhu mass 0°C ja normaairõhu p_0 juures on 1293 g. Rõhul e ja temperatuuri t juures on 1 m^3 õhu mass

$$\frac{1293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{e}{p_0} \text{ (g)},$$

kus α - õhu ruumpaisumiskoeffitsient.

Et veeauru tihedus samas tingimustes õhu suhtes on 0,622, siis veeauru mass 1 m^3 õhus osarõhu e korral tuleb

$$a = \frac{1293 \cdot 0,622e}{(1 + \alpha t)p_0} \text{ (g/m}^3\text{)}.$$

Olenevalt e ja p_0 ühikute valikust saadaksegi valemid (1) või (2).

4. Suhteline e. relatiivne niiskus r - õhus leiduva veeauru osarõhu suhe antud temperatuuril maksimaalsesse võimalikku veeauru (küllastava auru hulga) rõhuse, väljendatud suhtearvuna või protsentides:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%, \quad (4)$$

kus E on antud temperatuuril õhu küllastava veeauru rõhk.

Suhtelist niiskust võib väljendada ka absoluutse niiskuse, s.o. tegelikult õhus oleva veeauru tiheduse a , ja antud temperatuuril õhu küllastava veeauru tiheduse A suhtena:

$$r = \frac{a}{A} \cdot 100\%. \quad (4a)$$

5. Niiskuse defitsiit e. küllastusvajak d - antud temperatuuril küllastava veeauru ja õhus tegelikult olemasoleva veeauru rõhkude vahe

$$d = E - e. \quad (5)$$

6. Kastepunkt - temperatuur, mille juures õhus olev veeaur muutub küllastavaks, kusjuures õhurõhk jääb samaks.

Käesolevas töös käsitletakse kaht õhuniiskuse määramise meetodit.

A. PSÜHROMEETRILINE MEETOD.

1. Tööülesanne.

Tutvumine niiskuse mõõtmise psühhrometriliste meetoditega ja psühhrometrite ehitusega. Õhuniiskuse määramine.

2. Töövahendid.

Augusti (statsionaarne) psühhromeeter, Assmani (aspiratsioon-) psühhromeeter, balloonikene Assmani psühhrometri "märja" termomeetri niisutamiseks, destilleeritud vesi.

3. Meetodi teooria.

Paljustest õhuniiskuse määramise meetoditest on levinuim psühhrometriline meetod. Selle meetodi puhul määra-

takse õhuniiskus kahe ühesuguse termomeetri näitude alusel. Üks termomeetritest on "kuiv" ja näitab õhu temperatuuri. Teise termomeetri reservuaar on mähitud niisutatud riidega ("märg" termomeeter), mille pinnalt toimub vee aurumine. Aurumise kiirus sõltub ümbritseva õhu niiskusest. Mida suurem on küllastusvajak, seda kiiremini toimub aurumine "märja" termomeetri pinnalt ja seda madalamat temperatuuri ta näitab, kuna aurumiseks kulub soojust, mis võetakse termomeetritelt.

Katsume arvutada "märja" termomeetri soojusbilansi. Pinnalt S ajaühikus auruva vee massi m võib arvutada Daltoni valemi järgi

$$m = \frac{cS(E_1 - e)}{p}, \quad (6)$$

kus E_1 on aurava pinna temperatuuril õhku küllastava veeauru osarõhk,

e - õhus leiduva veeauru osarõhk,

p - õhurõhk,

c - võrdetegur, mis sõltub põhiliselt õhu voolu kiirusest aurava pinna kohal.

Selle massi aurumiseks kuluv soojushulk

$$Q_1 = a \cdot m = \frac{caS(E_1 - e)}{p}, \quad (7)$$

kus a on vee aurustumissoojus.

Et termomeeter soojust ära andes jahtub, siis läheb õhust termomeetrisse ajaühikus soojushulk Q_2 , mida võib arvutada Newtoni valemi järgi

$$Q_2 = BS_1(t - t_1), \quad (8)$$

kus S_1 - pindala, mille kaudu toimub soojusvahetus,

t - ümbritseva õhu temperatuur,

t_1 - aurava pinna (märja termomeetri) temperatuur,

B - nn. välise soojusvahetuse koefitsient.

Et niiskuse määramine toimub "märja" termomeetri tasakaalustunud näidu korral, siis võib lugeda, et

$$Q_1 = Q_2, \text{ või}$$

$$\frac{c \Delta S (E_1 - e)}{p} = B S_1 (t - t_1).$$

Eeldades, et $S = S_1$, saab avaldada, et

$$e = E_1 - \frac{B(t-t_1)p}{c \Delta} . \quad (9)$$

Tähistades $\frac{B}{c \Delta} = C$, saadakse psühromeetriline valem

$$e = E_1 - C (t - t_1) p. \quad (10)$$

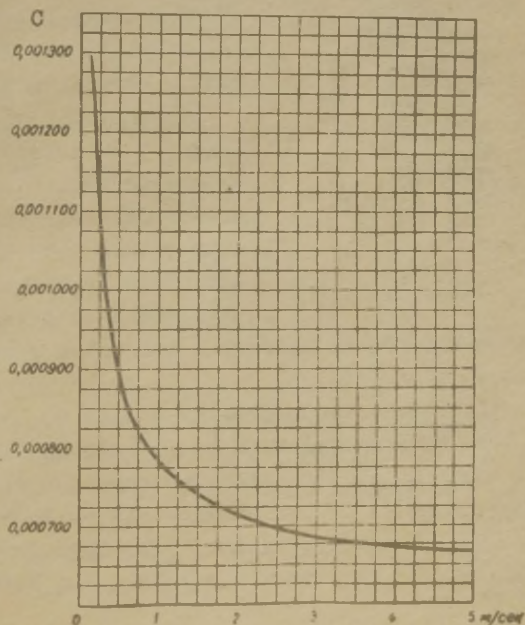
Siin e on õhus leiduva veeauru osarõhk,

E_1 - aurava pinna temperatuuril, s.o. "märja" termomeetri näidu juures, õhku küllastava veeauru osarõhk,

t ja t_1 - "kuiva" ja "märja" termomeetri näidud,

p - õhurõhk,

C - psühromeetri konstant, mis sõltub tema ehitusest ja põhiliselt õhuvoolu kiirusest termomeetrite reservuaaride ümber.



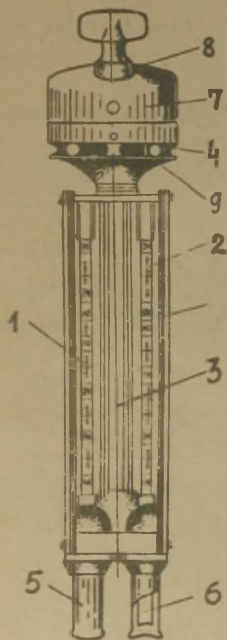
Joon. 1.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et õhuvoolu kiiruse suurenedes väheneb psühromeetri konstant algul väga kiiresti, seejärel tema muutumise kiirus väheneb ja alates voolu kiirusest 2,5 m/s muutub väga vähe. Psühromeetri konstandi sõltuvust õhuvoolu kiirusest kujutab joonis 1.

4. Psühromeetrite ehitus.

Statsionaarne (Angusti) psühromeeter koosneb kahest kõrvuti ühele statiivile kinnitatud täiesti sarnasest termomeetrist. Ühe termomeetri reservuaar on mähitud tihedalt batistitükikesse (kõlblik on vaid selline batist, mida mööda vesi 15 min. jooksul tõuseb mitte vähem kui 7 - 8 cm), mille ots on pistetud anumasse destilleeritud veega. Vahemaa anuma ülemisest servast kuni termomeetri reservuaarini peab olema mitte vähem kui 2-3 cm, et mitte segada vaba õhuvahest reservuaari ümber.

Aspiratsioon- (Assmani) psühromeeter. Aspiratsioonpsühromeetri töötamise põhimõte on täpselt sama, mis statsionaarselgi. Tema põhiliseks erinevuseks ja eeliseks on aga õhuvoolu kiiruse konstantsus termomeetrite reservuaaride kohal.



Joon. 2.

Kasutatakse nimelt kiirust 2 m/s. Seda saavutatakse kunstliku ventilatsiooniga.

Aspiratsioonpsühromeeter (joon. 2) koosneb kahest ühesugusest termomeetrist (1 ja 2), mis on kinnitatud metallist toestikule. Termomeetrite vahel on allosas kaheks hargnev toru (3). Toru ülemine ots on ühendatud aspiraatoriga (7), mis imeb välisõhku läbi toru ja tekitab õhuvoolu termomeetrite reservuaaride kohal, mis ulatuvad toru (3)

hargnenud osadesse (5 ja 6). Aspiraatori ventilaatori paneb tööle vedrumehhanism. Vedru keeratakse üles võtmega (8). Torudel (5 ja 6) on kahekordsed üksteisest isoleeritud seinad ja nad on keermega kinnitatud.

Ühe termomeetri (parempoolse, 2) reservuaar on tihedalt mähitud batisti. Kogu riist on nikeldatud ja poleeritud, mis võimaldab teostada mõõtmisi ka otsese päikesevalguse käes (suure peegelduskordaja tõttu riist ei kuumene). Samal eesmärgil on ka torude (5 ja 6) siseseinad isoleeritud korpussest.



Joon. 3.

tust balloonile, kuna siis võib vesi sattuda "kuivale" termomeetrile ja kaitsetorudele, mistõttu tulemused on ebausaldatavad.

Pärast termomeetri niisutamist keeratakse üles aspiraatori vedrumehhanism. Lugemi võtmise ajal peab see töötama täiskäiguga. Lugemid tuleb võtta, kui märja termomeetri näit enam ei muutu. Vajaduse korral keeratakse vedru veel kord üles.

Lugemi võtmisel loetakse kiiresti enne kraadi kümnendikossa mõlemal termomeetril ja alles siis terved kraadid,

Batistiga mähitud termomeetri reservuaar niisutatakse spetsiaalse ballooni abil (joon.3), mis on täidetud destilleeritud veega. Vajutades kummiballoonile (1) viiakse vee tase kuni jooneni klaaspipetil (2) ja surutakse näpitsaga (3) kinni kummiballooni kael. Seejärel viiakse pipett ettevaatlikult torusse (6), jättes ta sinna 3 - 5 sekundiks, kuni batist imbub veega läbi. Seejärel avatakse näpits ja lastakse vesi kummiballooni tagasi. Tuleb hoolikalt jälgida, et sel hetkel ei oleks juhuslikku vajutust ballooni, kuna siis võib vesi sattuda "kuivale" termomeetrile ja kaitsetorudele, mistõttu tulemused on ebausaldatavad.

kuna vaatleja lähenemine võib mõjutada tundlikke termomeetreid.

Vaatluste puhul vabas õhus tuleb rangelt jälgida, et tuul puhuks riistalt vaatleja poole.

Niiskus arvutatakse psühromeetrilise valemi järgi, võttes C tuule kiiruse jaoks 2 m/s . Sellise kiiruse loob ventilaator. Tugeva tuule puhul võib see kiirus muutuda. Seejärel, kui tuule kiirus ületab 3 m/s , pannakse aspiraatori tuulepoolsele küljele spetsiaalne tuulekaitse, mis on riistaga kaasas.

5. Õhuniiskuse arvutamine psühromeetri näitudest.

Nii statsionaarse kui aspiratsioonpsühromeetri puhul arvutatakse veeauru osarõhku valemist

$$e = E_1 - C (t - t_1)p \quad (10)$$

ja suhtelist niiskust valemist

$$r = \frac{e}{E} 100\%. \quad (11)$$

Seejuures tegur C on kummagi psühromeetri juures erinev. Meteoroloogiajaamades seatakse Augusti psühromeeter üles spetsiaalsesse onni. Niiskus leitakse valemi (10) alusel koostatud tabelitest, kus on võetud $p = 1000 \text{ mb}$ ja tuule kiiruseks onnis $0,8 \text{ m/s}$. Siis $C = 0,0007947$. Sellistel eeldustel saadud tulemused on muidugi väga ligikaudsed ja seda meetodit kasutatakse vaid tema erakordse lihtsuse tõttu. Praktikumis võtame C väärtuseks ülaltoodud arvu, p loeme aga baromeetritl.

Aspiratsioonpsühromeetri jaoks (tuule kiirus 2 m/s) tuleb võtta $C = 0,000662$.

Aspiratsioonpsühromeeter seatakse mõõtmiskohas üles vähemalt 15 min . enne lugemi võtmist (praktikumis on ta juba kohal, nii et ei tule oodata), et kogu tema keha temperatuur ühtlustuks ümbruse temperatuuriga. 4 min . enne lugemi võtmist niisutatakse "märg" termomeeter ja keeratakse üles vedru. Tehakse lugem, nagu selgitatud eespool. Seejuures ei tohi hingata psühromeetrile või puudutada te-

da käega.

Määratud t ja t_1 , leiame tabelist 1 küllastava auru osarõhud nendel temperatuuridel E ja E_1 . Loeme baromeetritl õhurõhu p ja valemitest (10) ja (11) arvutame e ja r .

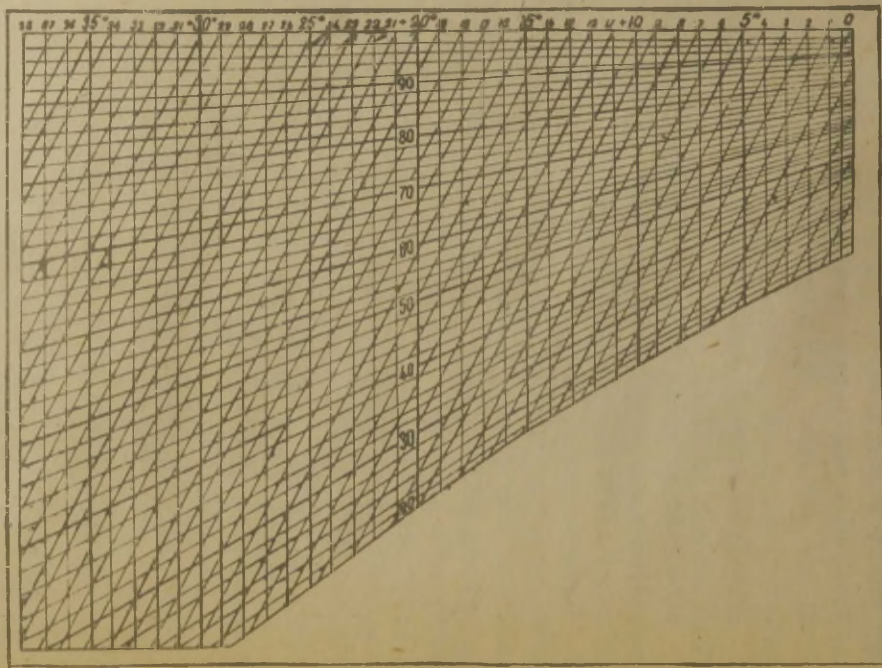
Veeauru osarõhu e saame mm_{Hg} -tes või mb -des sõltuvalt E_1 ja p ühikutest.

Absoluutse niiskuse a arvutamiseks kasutame valemid (1) või (2). Valemist (5) leiame küllastusvajaku, tabelist 1 kastepunkti.

Kõik need suurused arvutame mõlema psühromeetri näitudest, võrdleme tulemusi.

Suhtelist niiskust on aspiratsioonpsühromeetri puhul mugav määrata spetsiaalsest nomogrammist, mis antakse riistaga kaasa. Ülemisse horisontaalritta on kantud temperatuurid. Vertikaaljooned on "kuiva" termomeetri näitude jaoks, kaldjooned - "märja" termomeetri jaoks. Otsides meie näitudele vastavad jooned, leiame nende lõikepunkti ja sealt horisontaali mööda otsime nomogrammi keskel asuvalt vertikaalskaalalt suhtelise niiskuse väärtuse.

PSÜHROMEETRI LINE NOMOGRAMM ASPIRATSIOONPSÜHROMEETRI JAKS.



Табел 1.

Целые градусы	Десятые доли градусов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3) Максимальная упругость водяного пара над водой /в миллибарах/										
0°	6,1	6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	6,4	6,4	6,5	6,5
1	6,6	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0
2	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,5
3	7,6	7,6	7,7	7,7	7,8	7,8	7,9	8,0	8,0	8,1
4	8,1	8,2	8,2	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7
5	8,7	8,8	8,8	8,9	9,0	9,0	9,1	9,2	9,2	9,3
6	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8	9,9	10,0
7	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,6
8	10,7	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4
9	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,0	12,1	12,2
10	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13,0	13,0
11	13,1	13,2	13,3	13,1	13,5	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9
12	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9
13	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9
14	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	17,0
15	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	18,0	18,1
16	18,2	18,3	18,4	18,5	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,3
17	19,4	19,5	19,6	19,8	19,9	20,0	20,1	20,4	20,4	20,5
18	21,6	21,8	21,9	21,0	21,2	21,3	21,4	21,6	21,7	21,8
19	22,0	22,1	22,3	22,4	22,5	22,7	22,8	23,0	23,1	23,2
20	23,4	23,5	23,7	23,8	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7
21	24,9	25,0	25,2	25,4	25,5	25,7	25,8	26,0	26,1	26,3
22	26,5	26,6	26,8	26,9	27,1	27,3	27,4	27,6	27,8	27,9
23	28,1	28,3	28,5	28,6	28,8	29,0	29,2	29,3	29,5	29,7
24	29,9	30,0	30,2	30,4	30,6	30,8	31,0	31,1	31,3	31,5
25	31,7	31,9	32,1	32,3	32,5	32,7	32,9	33,0	33,2	33,4
26	33,6	33,8	34,0	34,2	34,4	34,6	34,9	35,1	35,3	35,5
27	35,7	35,9	36,1	36,3	36,5	36,8	37,0	37,2	37,4	37,6
28	37,8	38,1	38,3	38,5	38,7	39,0	39,2	39,4	39,6	39,9
29	40,1	40,3	40,6	40,8	41,0	41,3	41,5	41,8	42,0	42,3
30	42,5	42,7	43,0	43,2	43,5	43,7	44,0	44,2	44,5	44,7
31	44,0	44,2	44,5	44,8	45,0	45,3	45,5	45,8	46,1	46,3
32	47,6	47,9	48,1	48,4	48,7	49,0	49,2	49,5	49,8	50,1
33	51,4	51,6	51,9	52,2	52,5	52,8	53,1	53,4	53,7	54,0
34	55,3	55,6	55,9	56,2	56,5	56,8	57,1	57,4	57,7	58,0
35	59,3	59,6	60,0	60,3	60,6	61,0	61,3	61,6	61,9	62,3
36	63,8	64,2	64,5	64,9	65,2	65,6	65,9	66,3	66,6	67,0
37	68,8	69,2	69,5	69,9	70,3	70,7	71,1	71,5	71,9	72,3
38	74,4	74,8	75,2	75,6	76,0	76,4	76,8	77,2	77,6	78,0
39	80,6	81,0	81,4	81,8	82,2	82,6	83,0	83,4	83,8	84,2
40	87,4	87,8	88,2	88,6	89,0	89,4	89,8	90,2	90,6	91,0
41	94,8	95,2	95,6	96,0	96,4	96,8	97,2	97,6	98,0	98,4
42	102,8	103,2	103,6	104,0	104,4	104,8	105,2	105,6	106,0	106,4
43	111,4	111,8	112,2	112,6	113,0	113,4	113,8	114,2	114,6	115,0
44	120,6	121,0	121,4	121,8	122,2	122,6	123,0	123,4	123,8	124,2
45	130,4	130,8	131,2	131,6	132,0	132,4	132,8	133,2	133,6	134,0
46	140,8	141,2	141,6	142,0	142,4	142,8	143,2	143,6	144,0	144,4
47	151,8	152,2	152,6	153,0	153,4	153,8	154,2	154,6	155,0	155,4
48	163,4	163,8	164,2	164,6	165,0	165,4	165,8	166,2	166,6	167,0
49	175,6	176,0	176,4	176,8	177,2	177,6	178,0	178,4	178,8	179,2

Табел 2.

ПЕРЕВОД МИЛЛИБАРОВ В МИЛЛИМЕТРЫ РТУТНОГО СТОЛБА

Сотни и десятки мм	Единицы мм									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
680	510,0	510,8	611,5	512,3	513,0	513,8	514,5	515,3	516,0	516,8
690	517,5	518,3	519,0	519,8	520,5	521,3	522,0	522,8	523,5	524,3
700	525,0	525,8	526,5	527,3	528,0	528,8	529,5	530,3	531,0	531,8
710	532,5	533,3	534,0	534,8	535,5	536,3	537,0	537,8	538,5	539,3
720	540,0	540,8	541,5	542,3	543,0	543,8	544,5	545,3	546,0	546,8
730	547,5	548,3	549,0	549,8	550,5	551,3	552,0	552,8	553,5	554,3
740	555,0	555,8	556,5	557,3	558,0	558,8	559,5	560,3	561,0	561,8
750	562,5	563,3	564,0	564,8	565,5	566,3	567,0	567,8	568,5	569,3
760	570,0	570,8	571,5	572,3	573,0	573,8	574,5	575,3	576,0	577,0
770	577,5	578,3	579,0	579,8	580,5	581,3	582,0	582,8	583,5	584,3
780	585,0	585,8	586,5	587,3	588,0	588,8	589,5	590,3	591,0	591,8
790	592,5	593,3	594,0	594,8	595,5	596,3	597,0	597,8	598,5	599,3
800	600,0	600,8	601,6	602,3	603,1	603,8	604,6	605,3	606,1	606,8
810	607,5	608,3	609,0	609,8	610,5	611,3	612,0	612,8	613,5	614,3
820	615,0	615,8	616,5	617,3	618,0	618,8	619,5	620,3	621,0	621,8
830	622,5	623,3	624,0	624,8	625,6	626,3	627,1	627,8	628,6	629,3
840	630,0	630,8	631,6	632,3	633,1	633,8	634,6	635,3	636,1	636,8
850	637,5	638,3	639,1	639,8	640,6	641,3	642,1	642,8	643,6	644,3
860	645,0	645,8	646,6	647,3	648,1	648,8	649,6	650,3	651,1	651,8
870	652,5	653,3	654,1	654,8	655,6	656,3	657,1	657,8	658,6	659,3
880	660,0	660,8	661,6	662,3	663,1	663,8	664,6	665,3	666,1	666,8
890	667,5	668,3	669,1	669,8	670,6	671,3	672,1	672,8	673,6	674,3
900	675,0	675,8	676,6	677,3	678,1	678,8	679,6	680,3	681,1	681,8
910	682,5	683,3	684,1	684,8	685,6	686,3	687,1	687,8	688,6	689,3
920	690,0	690,8	691,6	692,3	693,1	693,8	694,6	695,3	696,1	696,8
930	697,5	698,3	699,1	699,8	700,6	701,3	702,1	702,8	703,6	704,3
940	705,0	705,8	706,6	707,3	708,1	708,8	709,6	710,3	711,1	711,8
950	712,5	713,3	714,1	714,8	715,6	716,3	717,1	717,8	718,6	719,3
960	720,0	720,8	721,6	722,3	723,1	723,8	724,6	725,3	726,1	726,8
970	727,5	728,3	729,1	729,8	730,6	731,3	732,1	732,8	733,6	734,3
980	735,0	735,8	736,6	737,3	738,1	738,8	739,6	740,3	741,1	741,8
990	742,5	743,3	744,1	744,8	745,6	746,3	747,1	747,8	748,6	749,3
1 000	750,0	750,8	751,6	752,3	753,1	753,8	754,6	755,3	756,1	756,8
1 010	757,5	758,3	759,1	759,8	760,6	761,3	762,1	762,8	763,6	764,3
1 020	765,0	765,8	766,6	767,3	768,1	768,8	769,6	770,3	771,1	771,8
1 030	772,5	773,3	774,1	774,8	775,6	776,3	777,1	777,8	778,6	779,3
1 040	780,0	780,8	781,6	782,3	783,1	783,8	784,6	785,3	786,1	786,8
1 050	787,5	788,3	789,1	789,8	790,6	791,3	792,1	792,8	793,6	794,3
1 060	795,0	795,8	796,6	797,3	798,1	798,8	799,6	800,3	801,1	801,8
1 070	802,5	803,3	804,1	804,8	805,6	806,3	807,1	807,8	808,6	809,3
1 080	810,0	810,8	811,6	812,3	813,1	813,8	814,6	815,3	816,1	816,8
1 090	817,5	818,3	819,1	819,8	820,6	821,3	822,1	822,8	823,6	824,3
1 100	825,0	825,8	826,6	827,4	828,1	828,8	829,6	830,3	831,1	831,8

Табел 3.

ПЕРЕВОД МИЛЛИМЕТРОВ РТУТНОГО СТОЛБА В МИЛЛИБАРЫ

Сотни и десятки мм рт. ст.	Единицы мм рт. ст.									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
510	679,9	681,3	682,6	683,9	685,3	686,6	687,9	689,3	690,6	691,9
520	693,3	694,6	695,9	697,3	698,6	699,9	701,3	702,6	703,9	705,3
530	706,6	707,9	709,3	710,6	711,9	713,3	714,6	715,9	717,3	718,6
540	719,9	721,3	722,6	723,9	725,3	726,6	727,9	729,3	730,6	731,9
550	733,3	734,6	735,9	737,3	738,6	739,9	741,3	742,6	743,9	745,3
560	746,6	747,9	749,3	750,6	751,9	753,3	754,6	755,9	757,3	758,6
570	759,9	761,3	762,6	763,9	765,3	766,6	767,9	769,3	770,6	771,9
580	773,3	774,6	775,9	777,3	778,6	779,9	781,3	782,6	783,9	785,3
590	786,6	787,9	789,3	790,6	791,9	793,3	794,6	795,9	797,3	798,6
600	799,9	801,3	802,6	803,9	805,3	806,6	807,9	809,3	810,6	811,9
610	813,3	814,6	815,9	817,3	818,6	819,9	821,3	822,6	823,9	825,3 Десятые
620	826,6	827,9	829,3	830,6	831,9	833,3	834,6	835,9	837,2	838,6 мм дб
630	831,9	841,2	842,6	843,9	845,2	846,6	847,9	849,2	850,6	851,9 0,1 0,1
640	853,2	854,6	855,9	857,2	858,6	859,9	861,2	862,6	863,9	864,2 0,2 0,3
650	866,6	867,9	869,2	870,6	871,9	873,2	874,6	875,9	877,2	878,6 0,3 0,4
660	879,9	881,2	882,6	883,9	885,2	886,6	887,9	889,2	891,6	891,9 0,4 0,5
670	893,2	894,6	895,9	897,2	898,6	899,9	901,2	932,6	903,9	905,2 0,5 0,7
680	906,6	907,9	909,2	910,6	911,9	913,2	914,6	915,9	917,2	918,6 0,7 0,9
690	919,9	921,2	922,6	923,9	925,2	926,6	927,9	929,2	930,6	931,9 0,8 1,1
700	933,2	934,6	935,9	937,2	938,6	939,9	941,2	942,6	943,9	945,2 0,9 1,2
710	946,6	947,9	949,2	950,6	951,9	953,2	954,6	955,9	957,2	958,6
720	959,9	961,2	962,6	963,9	965,2	966,6	967,9	969,2	970,6	971,9
730	973,2	974,6	975,9	977,2	978,6	979,9	981,2	982,6	983,9	985,2
740	986,6	987,9	989,2	990,6	991,9	993,2	994,6	995,9	997,2	998,6
750	999,9	1001,2	1002,6	1003,9	1005,2	1006,6	1007,9	1009,2	1010,6	1011,9
760	1013,2	1014,6	1015,9	1017,2	1018,6	1019,9	1021,2	1022,6	1023,9	1025,2
770	1026,6	1027,9	1029,2	1030,6	1031,9	1033,2	1034,6	1035,9	1037,2	1038,6
780	1039,9	1041,2	1042,6	1043,9	1045,2	1046,6	1047,9	1049,2	1050,6	1051,9
790	1053,2	1054,6	1055,9	1057,2	1058,6	1059,9	1061,2	1062,6	1063,9	1065,2
800	1066,6	1067,9	1069,2	1070,6	1071,9	1073,2	1074,6	1075,9	1077,2	1078,6
810	1079,9	1081,2	1082,6	1083,9	1085,2	1086,6	1087,9	1089,2	1090,6	1091,9
820	1093,2	1094,6	1095,9	1097,2	1098,6	1099,9	1101,2	1102,6	1103,9	1105,2
830	1106,6	1107,9	1109,2	1110,6	1111,9	1113,2	1114,6	1115,9	1117,2	1118,6

B. ÕHUNIISKUSE MÄÄRAMINE ABSOLUUTSEL (KAALUMISE) MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Määrata õhu absoluutne niiskus.

2. Töövahendid.

Õhureservuaar, U-toru absorbendiga (P_2O_5 või $CaCl_2$), analüütilised kaalud, vihid, õhupump.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Õhu absoluutse niiskuse määramiseks juhitakse õhku läbi U-toru, mis sisaldab absorbenti - vett tugevasti siduvat ainet. Õhu voolamisel läbi kitsaste pooride absorbendi osakeste vahel seotakse vee molekulid absorbendi pinna lähedastest õhukihtidest. Tekib veeauru kontsentratsiooni gradient ja algab auru difusioon absorbendi pinna poole. Kui õhk viibib poorides küllalt kaua (P_2O_5 korral mõned sekundid või vähemgi), seotakse praktiliselt kogu vesi ja õhu absoluutse niiskuse võib arvutada valemist

$$a = \frac{4m}{V},$$

kus $4m$ on absorbendi massi juurdekasv ja
 V - läbivoolanud õhu ruumala.

4. Töö käik.

Pumpame reservuaari vähemalt 25 l õhku ja suleme kraani. Puistame U-torusse absorbenti sellisel hulgal, et toru alumises osas moodustuks kork. Absorbenti mitte kätega puutada! Suleme kiiresti toru mõlemad otsad korgiga, kaalume toru analüütilistel kaaludel maksimaalse võimaliku täpsusega. Ühendame U-toru õhureservuaariga, avame toru teise otsa ja reservuaari kraani. Kraani abil reguleerime (kasutades reservuaari skaalat ja käekella) õhu ruumkiiruse $\phi \leq 1$ l/min. Lasknud peaaegu kogu õhu reservuaarist

välja, suleme U-toru otsad samade korkidega, kaalume ta
uesti. Arvutame absoluutse niiskuse a koos piirveaga. Ab-
sorbendi mitteküllaldasest efektiivsusest tingitud metoodi-
list viga siin hinnata ei saa.

Võrdleme tulemust teistel meetoditel saadud tulemuste-
ga.

T ä h e l e p a n u ! U-toru pesemisel tuleb absor-
benti algul ainult niisutada. Lahustumisega kaasneb tugev
soojuse eraldumine ja toru võib lõhkeda.

C. LISAKÜSIMUSI.

1. Millistes piirides võib muutuda r? Kas ta võib ol-
la üle 100%?
2. Millal tekib kaste?

D. KIRJANDUS.

1. A. Tõllassepp. Meteoroloogia kõigile. Tallinn, 1960,
lk. 106-118.
2. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин. Молекулярная физика. М.,
1963, стр. 360-372.
3. М. С. Стернзат, А. А. Сапожников. Метеорологические
приборы, наблюдения и их обработка. Гидрометиздат,
1950, стр. 75-89.

34. VAAKUUMI SAAMINE JA MÕOTMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine vaakuumtehnika põhimõistetega ja seadmetega, mida kasutatakse vaakuumi tekitamiseks ning mõõtmiseks.

2. Töövahendid.

Vaakuumsüsteem eelvaakuumpumbaga BH-461M ja difusioonpumbaga ПБД -100, vaakuummeeter ВМТ-1А manomeetriliste lampidega ИТ-2 ja ИМ-2, reguleeritav autotransformaator, vattmeeter.

3. Sissejuhatus.

Järgnevas ülevaates esitame vaakuumtehnika põhimõistete ja vaakuumi saamiseks ning mõõtmiseks kasutatavate seadmete kirjelduse. Esitame ainult kasutatud seadmete tööpõhimõtte, detailselt võib nende seadmetega tutvuda kirjanduse loetelus toodud kirjanduse abil.

a) Vaakuumtehnika põhimõisted.

V a a k u u m i k s nimetatakse sellist gaasi hõrendatud seisundit, mille puhul gaasi molekulide keskmine vaba tee pikkus (λ) on võrreldav anuma mõõtmetega (d).

Kõrgvaakuumiks nimetatakse gaasi seisundit, mille puhul $\lambda \gg d$. Kui $\lambda \ll d$, siis sellist gaasi seisundit nimetatakse madalaks vaakuumiks. Vahepealset gaasi seisundit, mille puhul $\lambda \approx d$, s. t. gaasi molekulide keskmine vaba tee pikkus erineb vähe anuma mõõtmetest, nimetatakse keskmiseks vaakuumiks.

Rõhkude piirkonnad ja vastavad molekulide vaba tee pikkused on toodud järgnevas tabelis.

Madal vaakuum		Keskmine vaakuum		Kõrgvaakuum	
P mm Hg	λ cm	P mm Hg	λ cm	P mm Hg	λ cm
760 ÷ 1	$6,2 \cdot 10^{-6} \div$ $\div 4,7 \cdot 10^{-3}$	1 ÷ $\div 1 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3} \div$ $\div 4,7$	$1 \cdot 10^{-3} \div$ $\div 1 \cdot 10^{-7}$	4,7 ÷ $4,7 \cdot 10^4$

G a a s i h u l k a mõõdetakse vaakuumtehnikas ühikutes p.V, s. t. gaasi hulka ruumalas V sõltub rõhust p, mille juures gaas asub:

$$q = pV .$$

G a a s i v o o l u k s läbi mingi toru ristlõike nimetatakse gaasi hulka, mis läheb läbi selle ristlõike ühes ajaühikus:

$$Q = \frac{dq}{dt} .$$

T o r u l ä b i l a s k e v õ i m e k s U nimetatakse gaasi hulka, mis läheb läbi toru ühes ajaühikus ühikulise rõhkude vahe korral toru otstes:

$$Q = U (p_1 - p_2) .$$

Toru läbilaskevõime arvutamiseks on vaja teada gaasi molekulide vaba tee pikkuse ja toru diameetri suhet λ/d . Molekulide vaba tee pikkuse võib arvutada järgmise valemi abil:

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p} ,$$

kus p on keskmine rõhk torus ($p = \frac{p_1 + p_2}{2}$), väljendatud mm Hg, λ - vaba tee pikkus cm-tes.

Kui

$$5 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\lambda}{d} \leq 1,5 ,$$

siis leiab aset gaasi molekulaar-viskoosne voolamine ja toru läbilaskevõimet õhu jaoks võib arvutada järgmise valemiga:

$$U = 1,21 \cdot 10^4 \frac{d}{L} \left(0,9 + 15,6 \frac{P_1 + P_2}{2} \right) / \frac{\text{cm}^3}{\text{s}},$$

kus L on toru pikkus;

kui aga

$$\frac{L}{d} \geq 1,5,$$

siis leiab aset gaasi molekulaarne voolamine ja

$$U_m = 1,21 \cdot 10^4 \cdot \frac{d^3}{L} / \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}.$$

Mõlemas valemis on L ja d väljendatud cm-tes, P_i - mm Hg.

b) Vaakuumpumpasid iseloomustavad suurused.

P i i r r õ h k s nimetatakse minimaalset rõhku, mida antud pumbaga on võimalik saavutada.

P u m p a m i s k i i r u s e k s (S) nimetatakse pumba väljalasketoru kaudu ühes ajaühikus eemaldatavat gaasi ruumala. Pumpamiskiirus sõltub rõhust pumba sisendis.

$$S = \frac{Q}{P_S},$$

kus S on pumpamiskiirus, Q - gaasi vool pumba väljundis, P_S - rõhk pumba sisendis.

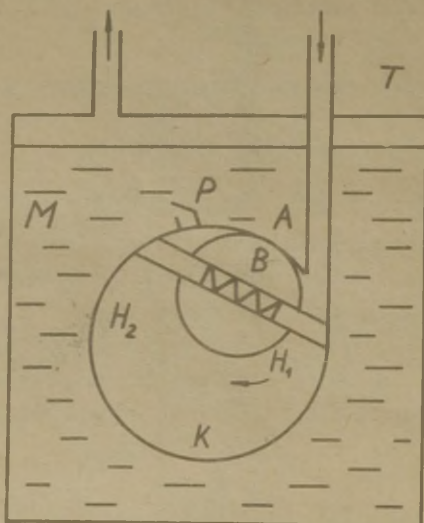
A l g r õ h k on rõhk, millest alates pump hakkab normaalselt tööle.

M a k s i m a a l n e v ä l j u n d r õ h k on maksimaalne rõhk pumba väljundis, mille puhul pump veel normaalselt töötab.

Mehhaanilistel pumpadel võib väljundrõhk olla natuke kõrgem kui normaalne õhurõhk. Difusioonpumpadel on maksimaalne väljundrõhk tavaliselt 0,1 + 0,2 mm Hg.

c) Eelvaakuumpump.

Eelvaakuumpumpadena kasutatakse vaakumtehnikas mitut tüüpi mehhaanilisi pumpe. Kuna antud vaakumsüsteemi juures on kasutatud eelvaakuumpumbana rotatsioonipumpa BH-461M, siis vaatleme järgnevalt rotatsioonipumba tööpõhimõtet.



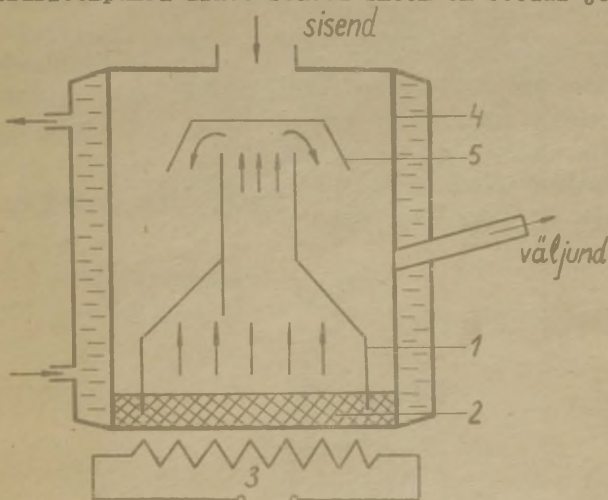
Joon. 1.

Silindrilises kambris K pöörleb ekstsentriliselt asetatud teljel trummel B, mis puudutab kambril seina punktis A. Trumli väljalõikesse on pandud plaadid H_1 ja H_2 , mis surutakse vedru abil tihedalt vastu kambril seina. Mõlemast otsast on kamber tihedalt suletud kaantega ja paigutatud reservuaari M, mis on täidetud õliga. Kambril on kaks ava. Üks neist on suletud klapiga P, mis laseb pumbatava õhu läbi õlikihi atmosfääri. Teine ava ühendab pumba kambril toru T abil tühjakspumbatava ruumalaga.

Trumli pöördumisel kellaosuti suunas imetakse õhk toru T kaudu kambri ossa, mis asub punkti A ja plaadi H_1 vahel ja mille ruumala trumli pöördumisel hakkab suurenema. Poolpöörde järel see kambri osa eraldatakse torust T plaadiga H_2 , seejärel ühendatakse väljalaskeklapiga ning tema ruumala hakkab vähenema. Selles kambri osas asuv õhk surutakse kokku ja väljub klapi P kaudu. Trumli ühe pöörde jooksul kordub kirjeldatud tsükkel kaks korda. Trummel pannakse pöörlema elektrimootori abil.

d) Difusioonpump.

Difusioonpumba lihtsustatud skeem on toodud joonisel 2.



Joon. 2.

Vertikaalselt asetsev aurujuhe (1) on alumise otsaga asetatud töövedelikku (2), mida kuumutatakse küttekeha (3) abil. Töövedelikuna kasutatakse spetsiaalset õli, mille aururõhk on küllalt madal. Aurujuhtme ülemine ots lõpeb spetsiaalse düüsiga (5), mis pöörab mööda aurujuhet tuleva aurujoa tagasisuunas. Pärast düüsist väljumist satuvad õliaurud pumba silindrilise korpuse seintele (4), mida jahutatakse voolava veega. Õliaurud kondenseeruvad seintel ja õli

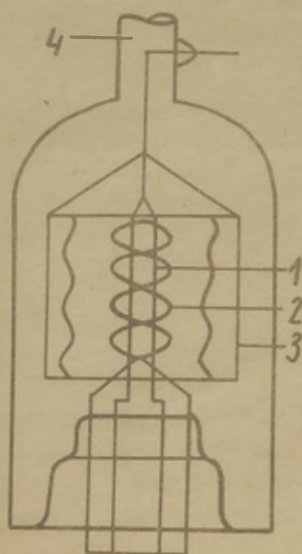
Manomeetriline lamp kujutab endast klaaskolbi, millesse on monteeritud kütteniit (3) ja termopaar (4), mis on punktis A joodetud kütteniidi külge. Kütteniiti toidetakse vooluga, mida saab reguleerida reostaadi (5) abil ja mõõta milliampermeetriga (1). Termopaaris tekkivat termoelektromotoorset jõudu mõõdab millivoltmeeter (2). Vaakuumeetriline lamp ühendatakse vaakuumüsteemiga toru (6) abil.

Kui süsteemis rõhk on võrdne välisrõhuga, siis antud manomeetrilise lambi jaoks ette antud küttevoolu tugevuse I_k juures on millivoltmeetri osuti nulli lähedal. Kui süsteemis rõhk hakkab langema, siis gaasi soojusejuhtivus väheneb, kütteniidi temperatuur tõuseb ja millivoltmeetri näit hakkab kasvama. See protsess kestab seni, kuni gaasi soojusejuhtivus muutub nii väikeseks, et ta praktiliselt enam ei mõjuta kütteniidi temperatuuri.

Termopaarmanomeetriga saab mõõta rõhkusid vahemikus $1 \div 10^{-3}$ mm Hg.

f) Ionisatsioonmanomeeter.

Ionisatsioonmanomeetrilise lambi skeem on kujutatud joonisel 4.

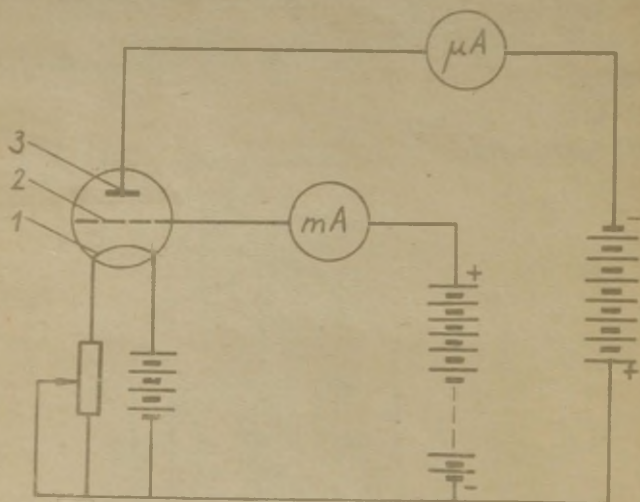


Joon. 4.

Manomeetriline lamp kujutab endast klaasballooni, milles asuvad kolm elektroodi: katood (1), anood (2) jaioonide kollektor (3). Manomeetriline lamp ühendatakse süsteemiga toru (4) abil.

Kuumast katoodist väljuvad elektronid kiirendatakse elektriväljas ja liiguvad anoodi suunas. Anood kujutab endast hõredat metallvõrku ja seetõttu ei satu kõik elektronid anoodile, vaid suur osa nendest tungib läbi võrgu anoodi ja silindrikujulise kollektori vahelisse ruumi, kus nad põrkuvad gaasi molekulidega ja ioniseerivad neid. Tekkinud positiivsed ioonid kiirendatakse kollektori negatiivses elektriväljas ja liikudes kollektorile, tekitavad ionisatsioonivoolu.

Ionisatsioonmanomeetri lülitusskeem on kujutatud joonisel 5.



Joon. 5.

Tähistame emissioonivoolu tugevuse I_e -ga ja ionisatsioonivoolu tugevuse I -ga. Nagu näitab eksperiment, on küllalt väikeste rõhkude juures ionisatsioonivoolu ja emissioonivoolu tugevuste suhe võrdeline gaasi rõhuga:

$$\frac{I}{I_e} = k p .$$

See sõltuvus on ionisatsioonmanomeetri töö aluseks.

$$p = \frac{1}{k} \cdot \frac{I}{I_e} .$$

Kui tähistada $k I_e = c$, saame:

$$p = \frac{1}{c} I ,$$

kus c on ionisatsioonmanomeetri konstant.

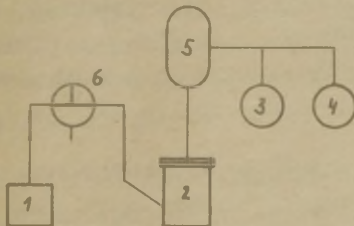
Rõhu mõõtmiseks on seega vaja mõõta antud emissioonivoolu tugevuse korral ionisatsioonivoolu tugevus ja jagada saadud suurus manomeetri konstandiga.

Antud töös kasutatav manomeetriline lamp IM-2 võimaldab mõõta rõhku vahemikus $10^{-3} + 10^{-7}$ mm Hg.

Ionisatsioonmanomeetri oluliseks puuduseks on sisselülitatud lambi kütteniidid läbipõlemine rõhu ootamatul tõusmisel süsteemis.

4. Seadme kirjeldus.

Käesolevas töös kasutatava vaakumsüsteemi skeem on toodud joonisel 6.

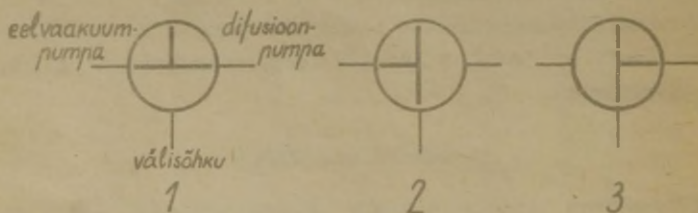


Joon. 6.

Joonisel on kasutatud järgmisi tähistusi:

1 - eelvaakuumpump BH-461M, 2 - difusioonpump ПДМ-100, 3 - manomeetrline lamp ЛТ-2, 4 - manomeetrline lamp ЛМ-2, 5 - õliaurude püünis, 6 - kolmepositsiooniline kraan.

Eelvaakuumpumba (1) abil luuakse difusioonpumba(2) töötamiseks vajalik eelvaakuum. Kraan (6) on vajalik selleks, et ühendada eelvaakuumpump (1) pärast väljalülitamist välisõhuga, vastasel juhul surub välisrõhk õli eelvaakuumpumbast torusse, mis ühendab pumba süsteemiga. Eelvaakuumpumba töö ajal peab kraan (6) olema asendis (1) (vt. joon. 7), ühendades eelvaakuumpumba süsteemiga. Pärast eelvaakuumpumba väljalülitamist tuleb ta ühendada välisõhuga, s. t. kraan tuleb pöörata asendisse 2.

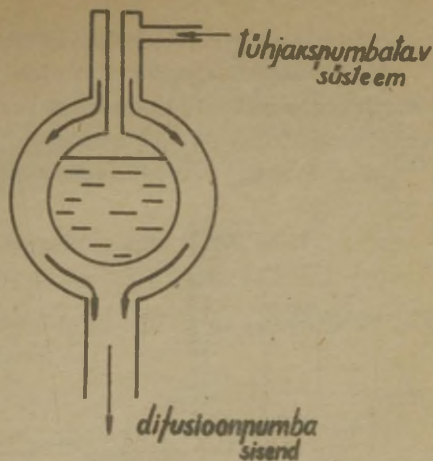


Joon. 7.

Et vältida õhu lahustumist difusioonpumbas olevas õlis, tuleb difusioonpumbas alati hoida vaakuumi, s. t. kraani ei tohi kunagi pöörata asendisse 3. Eriti ohtlik on õhu sattumine töötavasse difusioonpumba, sest kuum õli reageerib tormiliselt õhuga (põleb ära) ja pump langeb rivist välja.

Püünis (5) kujutab endast kahekordsete seintega klaaskolbi, mis täidetakse vedela lämmastikuga (vt. joon. 8).

Süsteemist eemaldatav gaas liigub kahekordsete seinte vahel. Läbi sellise püünise ei suuda õliaurud süsteemi tungida, piltlikult öeldes nad "külmutatakse välja".



Joon. 8.

Termopaarmanomeetrit (manomeetriline lamp 3 joonisel 6) kasutatakse rõhkude mõõtmiseks vahemikus $1 \div 10^{-3}$ mm Hg. Ionisatsioonmanomeetri (manomeetriline lamp 4 joonisel 6) abil mõõdetakse rõhku vahemikus $10^{-3} \div 10^{-7}$ mm Hg.

Enne tööle asumist peab tingimata tutvuma vaakuummeetri BHT-1A kasutamiseeskirjadega vastava instruksiooni abil!

5. Töö käik.

Ü l e s a n n e 1 .

Tutvuda pumpadega ja vaakuummeetriga ning nende kasutamise instruksioonidega. Joonistada vaakuummeetrите skeemid, näidata mõõtepiirkonnad. Tutvuda töös kasutatava vaakuumüsteemiga, joonistada süsteemi skeem.

Ü l e s a n n e 2 .

Eelvaakuumpumba piirrõhu määramine.

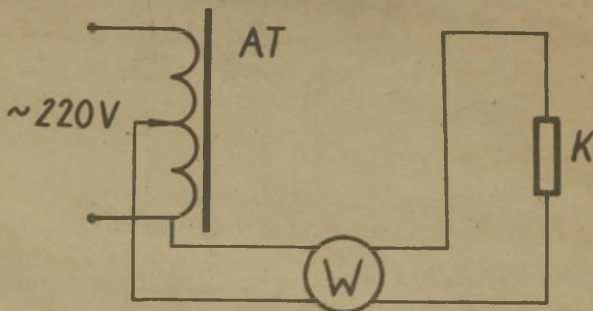
Selleks tuleb kraan pöörata asendisse 1, kontrollida õli taset eelvaakuumpumbas, lülitada eelvaakuumpump sisse ja määrata termopaarmanomeetri abil minimaalne saavutatav rõhk (suurusjärgus 10^{-2} mm Hg).

Mitte mingil juhul ei tohi sisse lülitada ionisatsioonmanomeetrit!

Ülesanne 3.

Difusioonpumba piirrõhu määramine.

Kui eelvaakuumpumba piirrõhk on saavutatud, võib asuda difusioonpumba käikulaskmisele. Selleks tuleb koostada elektriline skeem difusioonpumba küttekeha soojendamiseks ja küttevõimsuse mõõtmiseks, nagu on näidatud joonisel 9.



Joon. 9.

- AT - autotransformaator,
- W - vattmeeter,
- K - küttekeha.

Seejärel tuleb avada veekraan ja lasta vesi difusioonpumba jahutussüsteemi. Veendunud veevoolu olemasolus jahutussüsteemis, võib lülitada sisse difusioonpumba kütte. Küttevoolu võimsus reguleerida autotrafo abil 450 vatile.

Mitte mingil juhul ei tohi sisse lülitada difusioonpumpa, kui rõhk süsteemis on kõrgem kui 10^{-1} mm Hg!

Kui mingil põhjusel katkeb jahutusvee vool, tuleb difusioonpump kohe välja lülitada ja teatada sellest juhendajale või laborandile!

Pumba soojenemisel hakkab õlist eralduma seal neeldunud gaas ja seetõttu rõhk süsteemis natuke kasvab. Tuleb jälgida, et rõhk mitte mingil juhul ei tõuseks kõrgemale kui 10^{-1} mm Hg.

Kui rõhk on langenud alla 10^{-3} mm Hg, võib sisse lü-

ak süsteemis muutub

Töö lõpetamisel tuleb süsteem välja lülitada järgmiselt:

- 1) lülitada välja difusioonpumba küte; pumba kiiremaks jahutamiseks võib küttekeha pumba alt eemaldada;
- 2) kui rõhk langeb madalamale kui 10^{-3} mm Hg, lülitada välja ionisatsioonmanomeeter;
- 3) kui difusioonpump on täielikult jahtunud, võib eelvaakuumpumba välja lülitada, pärast seda tuleb tingimata pöörata kraan asendisse 2 (ühendada eelvaakuumpumba sisend välisõhuga);
- 4) sulgeda jahutusvee kraan ja lülitada välja termopaarmanomeeter; kraan jätta asendisse 2, difusioonpumpa õnku mitte lasta!

6. Lisaküsimusi.

1. Miks ei saa manomeetrilise lambiga $\Pi I-2$ mõõta väiksemat rõhku kui 10^{-3} mm Hg?
2. Miks tuleb jahutusvee voolu katkemisel difusioonpump välja lülitada?
3. Miks ei või ionisatsioonmanomeetrit sisse lülitada kõrgemal rõhul kui 10^{-3} mm Hg?
4. Kas termopaarmanomeetri peab välja lülitama, kui rõhk süsteemis langeb madalamale kui 10^{-3} mm Hg?

58, Физматгиз, 1962.

2. Б. И. Королев, Основы вакуумной техники, М., Физматгиз, 1958.

3. Г. А. Иванов, Электровacuумная технология, Госэнергоиздат, 1954.

4. Г. П. Шкурин, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Воентгиз, 1955.

S i s u k o r d .

Eessõna.

1	Lugemisseadmetega tutvumine	5
2	Tahke keha erikaalu määramine nihiku, kruviku ja tehniliste kaalude abil	14
3	Tehnilised mõõtmised	19
	Mikroskoopiliste pikkuste mõõtmine	23
5	Pikkuse mõõtmine täppismõõteriistade abil	27
5	Vesiloodi kaliibrimine ja tundlikkuse määramine ..	37
7	Nurkade ja pikkuste mõõtmine teodoliidi abil	47
3	Kaalumine summutiga analüütilistel kaaludel. Keha tõelise massi määramine	61
7	Mõõtkolvi kaliibrimine	69
4	Ajarelee kaliibrimine	73
	Liikumisseaduste kontrollimine Atwoodi masinaga ..	85
	Kuuli kiiruse määramine ballistilisel meetodil ...	93
	Risthooratta inertsimomendi määramine.....	103
4	Inertsimomendimääramine trifilaarpendli abil	109
5	Güroskoobi pretsessiooni uurimine	119
6	Vedrupendli omavõnkumiste uurimine	129
7	Füüsiline pendel	135
8	Sundvõnkumiste uurimine Pohli pöördpendliga	147

21. Poissoni	
ja nihkemooduli ka	
22. Tõmbedeformatsiooni uurimine	.....
23. Vedeliku sisehõrdeteguri temperatuurist sõltu- vuse määramine Stokes'i meetodil	..... 193
24. Vedeliku suhtelise viskoossuse määramine ketta sumbuvatest pöördvõnkumistest	..... 201
25. Vedeliku sisehõrdeteguri määramine kapillaar- viskosimeetriga	..... 209
26. Õhu sisehõrdeteguri määramine kapillaarviskosi- meetriga	..... 215
27. Pindpinevusteguri määramine vedeliku tõusa jär- gi kapillaartorades	..... 219
28. Pindpinevusteguri sõltuvus temperatuurist ja la- huse kontsentratsioonist	..... 223
29. Termostaadi töörežiimi uurimine	..... 229
30. Tihke keha erisoojuse määramine kalorimeetrili- sel meetodil	..... 237
31. Metallide erisoojuse määramine jahutusmeetodil.	245
32. Metallide (hea soojusjuhi) soojusliku erijuhtivuse määramine	..... 249
33. Õhuniiskuse määramine	..... 255
34. Vaakuumi saamine ja mõõtmine	..... 271