J. LANG · G. METS · A. PAE

Füüsika

PRAKTIKUM

V-35278

J. LANG, G. METS, A. PAE

FÜÜSIKA PRAKTIKUM

4. PARANDATUD JA TÄIENDATUD TRÜKK

3079



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1960

EESSÕNA

«Füüsika praktikumi» 4. trükk nagu eelminegi püüab rahuldada Tartu Riiklikus Ülikoolis, Tallinna Polütehnilises Instituudis ja Eesti Põllumajanduse Akadeemias toimuva füüsika üldpraktikumi nõudeid. Arvestades selle õpiku senisel kasutamisel saadud kogemusi, on autorid käesolevas väljaandes teinud rohkesti parandusi ning täiendusi. Ära on jäetud 5 tööd kui mittevajalikud, uusi töid on lisandatud 12. Tööde lõpul olevate täiendavate küsimuste hulka on suurendatud ja raamatu lõppu on paigutatud põhiliste mõistete register, mis hõlbustab vajaduse puhul nende ülesleidmist.

Kõik TPI seisukohalt vajalikud muudatused on tehtud G. Metsa, TRÜ ja EPA seisukohalt vajalikud muudatused J. Langu ja A. Pae poolt.

Kõigile kolleegidele autorite südamlik tänu väärtuslike näpunäidete eest uue trüki ettevalmistamisel, eriti aga TRÜ eksperimentaalfüüsika kateedri õppejõududele O. Seemanile, L. Uibole ja T. Soovikule abi eest uute tööjuhendite koostamisel.

AUTORID

I. ÜLDOSA

1. SISSEJUHATUS

Meie sotsialistlik kodumaa liigub tohutute sammudega kommunismi suunas. Sellega kaasnevad ka hiigelsaavutused teaduse ja tehnika alal: mitmesuguste aatomireaktorite konstrueerimine ja energeetiline rakendamine, Maa kunstlike kaaslaste ja kosmiliste rakettide väljasaatmine.

Kuid nendele saavutustele ei jääda muidugi peatuma. Selleks, et edasi minna, on vaja veelgi rohkem ja veelgi parema ettevalmistusega kaadrit kui seni. 1959. aastal kehtestatud seadus kooli ja elu sidemete tugevdamise ja rahvaharidussüsteemi edasiarendamise kohta NSV Liidus kõneleb selget keelt — õpilaste ettevalmistus peab saama elulähedasemaks, lähedasemaks tegelikule tööle. Ettevalmistuse kogu tase aga peab veelgi tõusma.

Kõik see nõuab meie üliõpilastelt veelgi tõsisemat suhtumist oma töösse, läbivõetavate distsipliinide sügavamat ja kindlamat omandamist, nende distsipliinide meisterlikku valdamist ja oskust oma teadmisi ja võimeid rakendada nõukogude maa ja rahva teenistusse.

Paljude erialade põhidistsipliiniks on füüsika. Selle aine õppimine hõlmab nii teoreetilist kui ka praktilist tööd, mis on omavahel lahutamatult seotud.

Läinud sajandi keskel vaadati füüsikale kui teadusele, mis iseseisvalt uurib üldisi loodusseadusi ja mille eesmärgiks on anda inimestele üha selgem ja üksikasjalisem kujutlus ümbritseva maailma ehitusest. Tolleaegne tehnika oli veel vähe arenenud. Ja kuigi oli selge, et tehnika kasutab ära füüsikalisi nähtusi ja seadusi, ei olnud side füüsika ja tehnika vahel veel kuigi tihe.

Ka tänapäeval on füüsika põhiliselt jäänud endiseks. Side tehnika ja füüsika vahel aga on määratult kasvanud. Uued avastused füüsikas on ellu kutsunud terve rea tehnikaharusid, nagu näiteks kogu elektrotehnika kõigi tema harudega. Soojuse ja gaaside üksikasjaline füüsikaline uurimine võimaldas täiustada soojusjõumasinaid. Kui soojusjõumasinate kasutegur läinud sajandi algul oli veel 1 protsendi suurusjärgus ja alla selle, siis sajandi lõpul ulatus see juba 20 protsendini ja kõrgemalegi. Teiselt poolt toodab

arenev tehnika uusi ja täiuslikumaid füüsikalisi uurimisriistu, mis tingib omakorda füüsika kiiret arenemist. On näiteks raske kujutleda saavutatud edusamme aatomi ja aatomituuma uurimisel ilma elektrivooluta ja vastavate elektrotehniliste seadmeteta.

Ka arstiteaduses, põllumajanduses ja muudes rakendusalades kasutatakse ära füüsikalisi teadmisi. Reas tänapäeva tehnika harudes, nagu näiteks raadiotehnikas, raadiolokatsioonis, kaugnägemises, aatomienergia tootmises, kiirlennukite ehituses jm., on raske kindlaks teha, kus lõpeb füüsika ja algab tehnika.

Seepärast peab iga nõukogude insener, arst, agronoom jne. põhjalikult tundma oma ala tähtsaimat lähteallikat — füüsikat. Selleks aga ei piisa õppimisest raamatu järgi, vaid tuleb oma käega korraldada katseid ja mõõtmisi, oma silmaga vahetust lähedusest jälgida füüsikaliste nähtuste kulgemist. Alles siis omandatakse põhjalik ja õige ettekujutus nähtustest ja suudetakse neid parajal kohal rakendada.

Et füüsikaline vaatlus on sisuliselt mõõtmine, siis peab laboratoorsetes töödes pearõhk olema suunatud mõõtmise õppimisele.

Peaaegu kõikide alade eriteadlastel tuleb oma praktilises tegevuses kokku puutuda mõõtmistehnikaga. Nii näiteks arstipraktikas, eriti diagnoosimisel, tuleb mõõta vererõhku, silmaläätse fookuse varieerumise piirkonda jm. bioloogilisi näitajaid. Agrotehnikas on sagedaseks toiminguks maapinna nivelleerimine, kallaku mõõtmine ja muude pinnase näitajate määramine.

Keemik-analüütik mõõdab oma igapäevases töös ruumalasid, masse, pingeid jm. Keemik-tehnoloog sooritab vahetpidamata mõõtmisi reaktsiooni kulgemise käigus, et kindlaks teha preparaadi valmimist ja juhtida vastavalt reaktsiooni käiku. Mõõtmisi tuleb toimetada ka kõikidel tehnikaaladel. Mõõtmisi toimetatakse tehastes tootmisprotsessis ja valmisproduktsiooni kontrollimisel. Kas on võimalik toota näiteks töökõlblikke kuullaagreid ilma täpse mõõtmiseta (täpsusega alla 0,001 mm)? Kas on võimalik ilma mõõtmiseta valmistada korralikku raadioaparaati või elektrontoru-võimendajat, mis võimendaks võnkumisi ühesuguselt laias sageduste piirkonnas, s. o. annaks tõetruult edasi kõnet, muusikat jne? Või kas saab ilma erakordselt täpse mõõtmiseta toota lennukimootorite ja muude masinate detaile? Ei saa! Selleks peab olema häid mõõteriistu ja inimesi, kes oskavad neid riistu käsitseda, korras hoida ja kontrollida. Seepärast võib ütelda, et mõõtmise täpsuses peitub tehnika edu, veel rohkem — ka teaduse edu. Mitte mõõtmiskunsti enda pärast ei püüa füüsikud mõõtmistulemustes saavutada «viimaseid kümnendkohti». Spektroskoopias selgitati «viimaste» kümnendkohtade mõõtmisega aatomi struktuur. Aatomkaalude viimaste kümnendkohtade täpne teadmine selgitas aatomienergia saamise põhimõtte. Planeetide liikumise täpne mõõtmine astronoomide poolt võimaldas avastada uusi planeete (Neptuun) jne.

Nõukogude Liidu Kommunistlik Partei ja valitsus, saades aru mõõdumajanduse tähtsusest meie riigi tehnika ja majanduselu

arendamises, on kehtestanud kõikides tööstustes, kaubanduses ja teaduslikul uurimisel tarvitatavate mõõteriistade järjekindla kontrolli, luues üle kogu maa mõõteriistade kontrollasutuste võrgu. Seega on Nõukogude Liit esimeseks maaks maailmas, kus kogu mõõdumajandus on nii täiuslikult organiseeritud. Sellega on tagatud ühtsete mõõtude tarvitamine. Seepärast sobivad Tallinnas, Moskvas ja Vladivostokis toodetud masinaosad üksteisega kokku ning neid saab üksteisega asendada. Selle asjaolu tähtsus on arusaadav ilma kommentaarideta.

Eelöeldust peab igale üliõpilasele olema selge, et kui ta tahab saada täisväärtuslikuks nõukogude inseneriks, arstiks, agronoomiks jne., peab ta hoolega õppima mõõtmistehnikat, et ta võiks vajaduse korral juhatada mõõtmisi või ise nõutava täpsusega mõõta. Juba esimestel töödel näeb üliõpilane, et täpne kaalumine või pikkuse mõõtmine on omaette keerukas oskus, kuigi mitte väga raske. Algajal aga kipuvad milligrammid ja nende kümnendikud käest libisema. Sama on lugu ka tuhandike ja isegi sajandike millimeetritega.

Lähtudes sellest tähtsusest, mis on täpsel mõõtmisel tänapäeva teaduses ja tehnikas, on käesolevas raamatus peale elementaarsete võtete ja näpunäidete, mis on vajalikud algajale füüsika laboratoorsete tööde sooritamisel, püütud võimalust mööda anda ülevaade ja näpunäiteid ka täpsete mõõtmismeetodite kohta.

Selliseid näpunäiteid võib leida peamiselt Üleliidulise Mõõdukomitee publikatsioonidest, mis on aga määratud eriteadlastele. Elektrimõõtmiste kohta võib leida andmeid V. S. Popovi raamatust «Электрические измерения и приборы», mis on määratud tehnikumidele.

Füüsika praktikumi sooritamisel peab üliõpilasel tekkima arusaamine, et täpset mõõtmistulemust on võimalik saada ainult hoolika töö, vastava metoodika ja vastava aparatuuri rakendamise tulemusena. Mingi statistika ega matemaatika rakendamine saadud mõõtmistulemustele ei vähenda vea suurust, mis on tingitud eelmainitud teguritest: hoolsusest, metoodikast ja aparatuurist. Matemaatika võimaldab ainult arvutada lõpptulemuse vea suuruse, kui on teada mõõdetud suuruste mõõtevead, ja annab seega iseloomustuse tehtud mõõtmistele. Kujukaks näiteks on valguse kiiruse määramise katsed Michelsoni poolt. Michelson rakendas oma aja täpseimat metoodikat, mis andis üksikute mõõtmiste erinevuse keskmisest väärtusest kuni 100 km/s. Michelson korraldas aga sajad mõõtmised, töötas andmed statistiliselt läbi ja sai 1926. aastal tulemuseks 299 796 $\pm$4 km/s. Jätkates tööd ja viimistledes metoodikat, saadi 1933. aastal väärtus 299 774 $\pm$11 km/s. Siit on näha, et kuigi tõenäoline viga on $\pm$4 km/s või vastavalt $\pm$11 km/s, on erinevus mõlema väärtuse vahel 22 km/s. Seega esineb viga juba viiendas kümnendkohas. Pikkuste mõõtmist võis Michelsoni ajal küll vajaliku täpsusega läbi viia, kuid aja mõõtmise metoodika ja eriti lühikeste ajavahemike mõõtmise metoodika

ei andnud kaugeltki täpsust 10^{-5}. Seoses kvartskellade arenemisega on tänapäeval võimalik mõõta ka üsna lühikesi ajavahemikke täpsusega alla 10^{-7}. Vastavalt sellele arendati aastail 1947—1950 välja uued valguse kiiruse mõõtmise meetodid, mis annavad valguse kiiruse väärtuseks 299 792,7 $\pm$0,25 km/s, kusjuures üksikute mõõtmiste kõrvalekaldumine keskväärtusest ei ületa $\pm$0,3 km/s. Seega vastav metoodika, mitte aga statistika ja matemaatika on viinud vea juba seitsmendasse kümnendkohta.

Mõõtmistehnika paremaks omandamiseks tuleks tööd grupeerida üksikute mõõtmisalade järgi (massi mõõtmine, pikkuste mõõtmine jne.), mida pole aga siiski võimalik täiesti järjekindlalt läbi viia.

Mõõtmismeetodid, mida rakendatakse laboratoorsetes töödes, ei ole mõeldud selleks, et üliõpilane võtaks nad teadmiseks, vaid üliõpilane peab püüdma nad ära õppida. Tihti aga võib näha, et kui üliõpilane pärast esialgsete harjutuste läbitegemist, näiteks analüütilistel kaaludel, peab mingis töös määrama keha täpse kaalu, siis püüab ta seda teha kuidagi «oma moodi», lihtsamalt, näiteks tasakaalustades keha ligikaudu vihtidega. Töö lõpul tuleb aga välja, et saavutatud täpsusest ei piisa isegi kvalitatiivse pildi saamiseks, ja siis tuleb ikkagi kõik algusest lõpuni uuesti läbi teha, seekord aga juba «juuksekarva lõhkiajamise» meetodiga. Kokkuvõttes võib ütelda, et füüsika laboratoorsetel töödel puutub tulevane eriteadlane vahetult kokku nähtustega, millest on räägitud loengul, õpib rea elementaarseid võtteid täpsete mõõtmiste sooritamiseks ning tutvub mitmesuguse aparatuuri ehituse ja käsitsemisega. Laboratooriumi juhatav õppejõud on selles töös sõber ja abiline, kelle poole tuleb pöörduda iga raskuse ja arusaamatuse puhul, et vältida üleliigset ajakulu ja aparaatide rikkumist.

2. MÕÕTMINE JA MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMID

Mõõtmine on mõõdetava suuruse võrdlemine mõõtühikuga. Kui tahame näiteks praegu loetava rea pikkust mõõta, siis võrdleme teda pikkusühikuga 1 cm. Kui 1 cm mahub rea pikkusse 11 korda, siis ütleme, et rea pikkus on 11 cm. Füüsikalisi esemeid ja nähtusi iseloomustavaid suurusi on õige rohkesti (pikkus, pindala ja ruumala, mass, raskus, aeg, kiirus, töö, temperatuur, pinnavalgustus, pinge jne.), mistõttu on tarvis ka terve rida mitmesuguseid ühikuid nende suuruste mõõtmiseks.

Kogemused näitavad, et kõik füüsikalised suurused on mitmesuguste füüsikaliste seaduste kaudu omavahel seotud. See võimaldab kõiki füüsikalisi suurusi avaldada mingi kolme valitud füüsikalise suuruse kaudu. Neid kolme valitud suurust nimetatakse põhisuurusteks. Põhisuurusi ei saa seega defineerida teiste suuruste kaudu, vaid neid tuleb kirjeldada, anda eeskiri nende mõõtühikute saamiseks või nende mõõtühikute etaloonid lihtsalt ette anda.

Põhisuuruste valik oleneb sellest, missuguste suurustega tuleb rohkem tegelda, kuivõrd hõlpus ja lihtne on valmistada ja säilitada nende suuruste ühikute etaloone jne. Põhiühikuid püüti valida nii, et praktikas esinevad mõõtarvud väljenduksid kümnetes ja sadades. Kogemused siiski näitasid, et viimast nõuet võis järjekindlalt läbi viia ainult füüsika ühes kitsas valdkonnas. Üleminekul teise valdkonda aga, kui ei tahetud valemitesse sisse viia meelevaldseid konstante, muutusid uute suuruste ühikud kas «mikroskoopiliselt» väikesteks või «astronoomiliselt» suurteks, s. t. praktikas esinevate suuruste mõõtarvud avaldusid kas väga väikestes arvudes (miljondikes, miljardikes) või äärmiselt suurtes arvudes (miljonites, miljardites jne.).

Mõned mõõtühikute süsteemid peame ära õppima ja neid täpselt tundma. Nagu me ei suuda ükskordühe tundmiseta lahendada lihtsamatki aritmeetilist ülesannet, nii ei suuda me ka lahendada ühtki füüsikalist ülesannet ega tehnilist probleemi, tundmata peast täpselt vähemalt üht mõõtühikute süsteemi.

3. ABSOLUUTSE MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMI ÜLESEHITUS

Nõndanimetatud absoluutse süsteemi põhisuurusteks on pikkus, mass ja aeg. Kõik teised suurused seotakse põhisuurustega otstarbekohaselt valitud definitsioonide ja loodusseaduste kaudu. Ühikute defineerimisel lähtutakse põhimõttest, et võimalikult vähestes valemites esineksid ühest erinevad konstandid. Sellest järeldub: 1) loodusseaduste valik, milledest defineeritakse füüsikalisi suurusi ja nende ühikuid, ja 2) uus ühik defineeritakse ainult ühekordsete teiste ühikute kaudu. Vaatamata sellele rangele nõudele esineb füüsikalistes valemites siiski konstante, mis on tingitud füüsikaliste nähtuste iseloomust ja mis oluliselt iseloomustavad vastavat nähtuste kompleksi. Neid konstante nimetatakse looduse universaalseteks konstantideks. Neid on füüsikas mitu. Sagedamini esinevad gravitatsioonikonstant (γ), universaalne gaasikonstant (R), valguse kiirus (c) ja Plancki konstant (h). Gravitatsioonikonstant iseloomustab gravitatsioonitunge kui väga nõrku tunge (näiteks võrreldes elektritungidega). Nii näiteks on elektriline tõuketung kahe elektroni vahel $4{,}13 \cdot 10^{42}$ korda suurem kui nende vahel valitsev gravitatsiooni-tõmbetung. Prootonite puhul on see suhe veidi väiksem, kuid on siiski $1{,}22 \cdot 10^{36}$.

Et selgitada, kuidas ülaltoodud põhimõttest järeldub seaduste valik, milledest defineeritakse füüsikalisi suurusi, vaatleme üht näidet. Tungi võiks defineerida nii gravitatsiooniseadusest

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

kus ta avaldub otseselt põhisuuruste kaudu, kui ka Newtoni II liikumisseadusest

$$F = \beta ma.$$

Tavaliselt defineeritakse tung Newtoni II liikumisseadusest ja valitakse tungiühik nii, et $\beta = 1$. Siis tuleb gravitatsiooniseaduses mõõtmiste teel määrata gravitatsioonikonstant γ, kuna gravitatsiooniseaduses ei ole võimalik valida mõne suuruse ühikut nii, et γ saaks üheks, sest kõikide suuruste ühikud on juba olemas. Selle tulemusena esineb gravitatsioonikonstant kõigis taevamehaanika ja geofüüsika valemeis, ei esine aga mehaanika ja tehnika arvutusis. Kui me defineeriksime tungi ja selle ühiku gravitatsiooniseadusest nii, et gravitatsioonikonstant saaks üheks, siis Newtoni II liikumisseaduses esineks konstant $\beta = \frac{1}{\gamma}$. Siit aga läheks ta nii taevamehaanikasse, geofüüsikasse kui ka kõikidesse mehaanika ja tehnika arvutustesse, mis oleks muidugi väga ebamugav.

Füüsika üksikutes osades on praktilise mugavuse tõttu siiski kaldutud kõrvale täielikust järjekindlusest. Nii näiteks tuuakse soojusõpetuses sisse uus põhisuurus — temperatuur, kuigi temperatuuri võiks mõõta energiaühikutes mooli kohta.

Samuti osutub fotomeetrias otstarbekohasemaks ja lihtsamaks võtta tarvitusele uus põhisuurus — valgusallika tugevus, kuigi valgusallika tugevust võiks mõõta võimsusega ja selle jaotusega lainepikkustele.

Elektromagnetismis tekib omapärane olukord ühikutega. Elektrilaengu ühik defineeritakse Coulomb'i seadusest elektrilaengute vastastikuse mõju kohta, kusjuures dielektrilist konstanti ε vaadeldakse dimensioonita suurusena ja lepitakse kokku, et vaakuumi dielektriline konstant $\varepsilon_0 = 1$. Edasi defineeritakse elektrivälja tugevuse, pinge, mahtuvuse, voolutugevuse, takistuse jne. ühikud.

Magnetipooluse ühik defineeritakse Coulomb'i seadusest magnetipooluste vastastikuse mõju kohta. Aine magnetilist läbitavust μ vaadeldakse samuti dimensioonita suurusena ja lepitakse kokku, et vaakuumi magnetiline läbitavus $\mu_0 = 1$. Edasi defineeritakse magnetivälja tugevuse, magnetivoo jne. ühikud.

Biot-Savart'i seaduses

$$F = \frac{dlmI}{cr^2} \sin \alpha$$

voolu ja magnetipooluse vastastikuse mõju kohta on kõikidel suurustel seega juba ühikud olemas ja tuleb katseliselt määrata võrdetegur c. Maxwell näitas, et see konstant tähendab elektromagnetilise häire levimise kiirust vaakuumis ehk teiste sõnadega valguse levimise kiirust vaakuumis.

Seda konstanti Biot-Savart'i seaduses võib teha üheks põhiliselt kahel teel: 1) defineerida Biot-Savart'i seadusest uus voolutugevuse ühik, mis on c korda suurem absoluutsest elektrostaatilisest voolutugevuse ühikust. Siis aga ei oleks voolutugevuse mõiste nii ülevaatlik kui praegu: ajaühikus läbivoolanud elektrihulga asemele tuleks elektrihulk pikkusühiku kohta. Voolutugevuse ühiku kaudu tuleks defineerida laengu, pinge, takistuse jne. ühikud. Siis esineks Coulomb'i seaduses konstant c^2.

Sellist ühikute süsteemi nimetatakse elektromagnetiliste ühikute süsteemiks (cgsm).

Võib talitada ka teisiti: 2) Biot-Savart'i seadusest defineerida magnetipooluse ühik nii, et $c = 1$, s. o. võtta ta c korda suurem, defineerida magnetivälja tugevus jne. Siis esineks konstant c^2 jälle ainult Coulomb'i seaduses magnetipooluste vastastikuse mõju kohta. Sellist ühikute süsteemi nimetatakse elektrostaatiliste ühikute süsteemiks (cgse).

Selline meelevaldne universaalkonstandi «kaotamine» Biot-Savart'i seadusest ning elektrostaatiliste ja elektromagnetiliste ühikute süsteemide eraldamine ei ole aga füüsika seisukohalt kuidagi õigustatud. Seepärast kasutatakse füüsikas nn. Gauss-Weberi cgs-süsteemi (mida vahel täiesti õigustamatult nimetatakse segasüsteemiks), kus Biot-Savart'i seaduses esineb elektrodünaamiline konstant c — valguse kiirus —, mis sealt läheb kõikidesse elektrodünaamika valemitesse ja elektromagnetilise laine diferentsiaalvõrrandisse, kus ta esineb laine faasi kiirusena vaakuumis.

Võrrandite ja nendes esinevate suuruste füüsikaline sisu on cgs-süsteemis lihtsalt interpreteeritav ja vastab tänapäeva füüsikas kehtivatele seisukohtadele. Vastavad võrrandid cgsm- ja cgse-süsteemis on hoopis formaalsema ja mehhanistlikuma sisuga.

Tabelis 1 on toodud andmed mõõtühikute cgs-süsteemi kohta. Lühend cgs on tuletatud süsteemi põhiühikute tähistest.

Tabel 1

Suurus	Suuruse tähis	Defineeriv valem	Ühiku nimetus ja definitsioon	Ühiku tähis
1	2	3	4	5
			A. Põhisuurused	
Pikkus	l	—	Sentimeeter. 0,01 osa rahvusvahelisest meetrist.	cm
Mass	m	—	Gramm. 0,001 osa rahvusvahelisest kilogrammist.	g
Aeg	t	—	Sekund. $^1/_{86400}$ osa keskmisest päikeseööpäevast ehk 0,0000116057628 osa täheööpäevast.	s ehk sek

1	2	3	4	5
		Tuletatud suurused		
		B. Mehaanika		
Pindala	S	$S = l_1 l_2$	Ruutsentimeeter. Ruut, mille külje pikkus on 1 cm.	cm^2
Ruumala, maht	V	$V = l_1 l_2 l_3$	Kuupsentimeeter. Kuup, mille serva pikkus on 1 cm.	cm^3
Joonkiirus	v	$v = \frac{l}{t}$	Sentimeeter sekundis. Sirgjooneliselt ning ühtlaselt liikuva punkti kiirus, kui punkt liigub igas sekundis edasi 1 cm võrra.	$cm\ s^{-1}$
Joonkiirendus	a	$a = \frac{v}{t}$	Sentimeeter sekundi ruudu kohta. Sirgjooneliselt ning ühtlaselt kiirenevalt liikuva punkti kiirendus, kui punkti kiirus muutub igas sekundis 1 $cm\ s^{-1}$ võrra.	$cm\ s^{-2}$
Tung	F	$F = ma$	Düün. Tung, mis 1-grammise massiga kehale annab kiirenduse 1 $cm\ s^{-2}$ võrra.	$g\ cm\ s^{-2}$ dn
Rõhk	p	$p = \frac{F}{S}$	Baar (düün ruutsentimeetri kohta). Rõhk, mille puhul 1-ruutsentimeetrisele pinnale mõjub tung 1 düün.	$g\ cm^{-1}\ s^{-2}$ b
Töö	A	$A = Fl$	Erg. Töö, mida sooritab tung 1 düün 1 sentimeetri pikkusel teel, kui nihkumine toimub tungi suunas.	$g\ cm^2\ s^{-2}$ erg
Võimsus	N	$N = \frac{A}{t}$	Erg sekundis. Võimsus, mille puhul igas sekundis tehakse 1 erg tööd.	$g\ cm^2\ s^{-3}$ erg/s
Impulss, liikumishulk	I	$I = Ft = mv$	Düün-sekund või gramm-sentimeeter sekundi kohta. 1-düünise tungi mõju sekundi vältel või liikumishulk, mis on 1-grammise massiga kehal, kui ta kiirus on 1 sentimeeter sekundis.	$g\ cm\ s^{-1}$
Tihedus	ϱ, d	$\varrho = \frac{m}{V}$	Gramm kuupsentimeetri kohta. Aine tihedus, kui aine 1 kuupsentimeetri mass on 1 gramm.	$g\ cm^{-3}$

1	2	3	4	5
Erikaal	e	$e = \frac{F}{V}$	Düün kuupsentimeetri kohta. Aine erikaal, kui aine 1 kuupsentimeetri kaal on 1 düün.	$g\ cm^{-2}\ s^{-2}$
Nurk	α	$\alpha = \frac{l}{r}$	Radiaan. Tsentraalnurk, mis lõikab ringjoonest kaare, mille pikkus on võrdne ringi raadiusega.	rd
Ruuminurk	Ω	$\Omega = \frac{S}{r^2}$	Sterradiaan. Tsentraalnurk, mis lõikab kera pinnast pinna, mille suurus on võrdne raadiuse ruuduga.	sr
Sagedus	f, ν	$f = \frac{1}{T}$	Herts — üks võnge või üks pööre sekundis. Sellise pöörlemise sagedus, kus ühes sekundis toimub üks täispööre, või sellise võnkumise sagedus, kus ühes sekundis toimub üks täisvõnge.	s^{-1} Hz
Nurkkiirus ehk nurksagedus	ω	$\omega = \frac{\alpha}{t}$	Radiaan sekundis. Ühtlase pöörlemise nurkkiirus, kui keha pöördub 1 sekundis 1-radiaanise nurga võrra.	$rd\ s^{-1}$
Inertsimoment	I	masspunkti inertsimoment $I = mr^2$, keha inertsimoment $I = \sum m_i r_i^2$	Gramm-sentimeeter-ruudus. 1-grammise masspunkti inertsimoment, kui punkt asub 1 cm kaugusel pöördeteljest.	$g\ cm^2$
Tungimoment	M	$M = rF$	Düün-sentimeeter. 1-düünise tungi moment, kui tungi siht on risti pöördeteljega ja 1 sentimeetri kaugusel pöördeteljest.	$g\ cm^2\ s^{-2}$ dn cm
Impulsimoment ja pöörlemishulk	P	$P = Mt = I\omega$	Düün-sentimeeter-sekund või gramm-sentimeeter-ruudus sekundi kohta. Düünsentimeetrise momendi mõju sekundi vältel või pöörlemishulk, mis on 1-grammisel masspunktil, kui ta asub pöördeteljest 1 cm kaugusel ja pöörleb ümber telje nurkkiirusega 1 radiaan sekundis.	$g\ cm^2\ s^{-1}$

1	2	3	4	5
		C. Akustika		
Intensiivsus	I	$I=\frac{A}{St}=\frac{N}{S}$	Erg sekundis ruutsentimeetri kohta.	$g\,s^{-3}$
Heli energia tihedus	ϱ	$\varrho=\frac{A}{V}$	Erg kuupsentimeetri kohta.	$g\,cm^{-1}\,s^{-2}$
Valjus	H	$H=\log\frac{I}{I_0}$ $I=I_0 10^H$	Kui heli intensiivsus on 10^H korda suurem kuuldeläve intensiivsusest, siis öeldakse: valjus on H belli.	B
		D. Soojus		
Temperatuur	T t	—	(Senti)kraad. Üks sajandik jää sulamis- ja vee keemistemperatuuri vahest; jaotamine (interpoleerimine) toimetatakse ideaalse gaasi termomeetriga.	kr °C — loetud jää sulamispunktist, °K — loetud absoluutsest nullist
Soojushulk	q	$q=cm\Delta t$	Kalor (grammkalor). Soojushulk, mis kulub 1 grammi vee temperatuuri tõstmiseks 19,5° C kuni 20,5° C.	cal
		E. Elekter		
Elektrihulk	Q	$F=\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	Absoluutne elektrostaatiline laenguühik. Punktlaeng, mis teisele niisama suurele punktlaengule vaakuumis mõjub 1 sentimeetri kauguselt 1-düünise tungiga.	$g^{1/2}cm^{3/2}s^{-1}$ lü
Elektrivälja tugevus	E	$E=\frac{F}{Q}$	Absoluutne elektrivälja tugevuse ühik. Sellise välja tugevus, kus laenguühikule mõjuv tung on 1 düün.	$g^{1/2}cm^{-1/2}s^{-1}$ dn/lü
Elektriline induktsioon	D	$D=\varepsilon E$	Üks induktsioonijoon ruutsentimeetri kohta.	$g^{1/2}cm^{-1/2}s^{-1}$
Elektriline induktsioonivoog	Φ_e	$\Phi_e=DS$	Üks induktsioonijoon.	$g^{1/2}\,cm^{3/2}\,s^{-1}$

1	2	3	4	5
Pinge, potentsiaal	U	$A = QU$	Absoluutne elektrostaatiline pingeühik. Pinge välja kahe punkti vahel, kui 1 absoluutse elektrostaatilise laenguühiku üleviimiseks ühest punktist teise tuleb teha 1 erg tööd.	$g^{1/2}\,cm^{1/2}\,s^{-1}$ erg/lü pü
Elektromotoorne jõud	E	$E = \oint \vec{E}\,\vec{ds}$	Absoluutne emj ühik. Ahelas mõjuv emj, mille puhul 1 lü ühekordseks läbi ahela viimiseks kulub 1 erg tööd.	pü
Elektrimahtuvus	C	$C = \frac{Q}{U}$	Sentimeeter. Sellise juhi mahtuvus, mille potentsiaali tõstmiseks 1 absoluutse pingeühiku võrra tuleb juurde anda 1 absoluutne laenguühik elektrit.	cm
Voolutugevus	I	$I = \frac{Q}{t}$	Absoluutne elektrostaatiline voolutugevuse ühik. Ühtlase voolu tugevus, mille puhul juhtme ristlõiget läbib 1 sekundis 1 absoluutne elektrostaatiline ühik elektrit.	$g^{1/2}\,cm^{3/2}\,s^{-2}$ lü/s
Takistus	R	$I = \frac{U}{R}$	Absoluutne elektrostaatiline takistuse ühik. Sellise juhtme takistus, milles pinge 1 absoluutne elektrostaatiline pingeühik tekitab voolutugevuse 1 absoluutne elektrostaatiline voolutugevuse ühik.	$cm^{-1}\,s$
Induktiivsus	L	$U = -L\frac{dI}{dt}$	Absoluutne induktiivsuse ühik. Induktiivsus, mille puhul voolu muutumisel juhtmes 1 absoluutse elektrostaatilise ühiku võrra sekundis juhtmes tekib induktsioonpinge 1 absoluutne elektrostaatiline pingeühik.	$cm^{-1}\,s^2$
Magnetipoolus	m	$F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}$	Absoluutne magnetipooluse ühik. Selline punkt-magnetipoolus, mis teisele niisama suurele punkt-magnetipoolusele vaakuumis mõjub 1 sentimeetri kauguselt 1-düünise tungiga.	$g^{1/2}\,cm^{3/2}\,s^{-1}$

1	2	3	4	5
Magnetivälja tugevus	H	$F = Hm$	Örsted. Sellise välja tugevus, mis magnetipooluse ühikule mõjub 1-düünise tungiga.	$g^{1/2}cm^{-1/2}s^{-1}$ Oe
Magnetiline induktsioon	B	$B = \mu H$	Gauss. Üks induktsioonijoon ruutsentimeetri kohta.	$g^{1/2}cm^{-3/2}s^{-1}$ Gs
Magnetivoog	Φ_m	$\Phi_m = BS$	Üks induktsioonijoon.	$g^{1/2}cm^{3/2}s^{-1}$ Mx
Magnetomotoorne jõud	U_m	$U_m = \oint \vec{H}\,\vec{dl}$	Gilbert. Magnetomotoorne jõud, mille puhul ühikpooluse ühekordseks läbi magnetiahela viimiseks kulub üks erg tööd.	$g^{1/2}cm^{1/2}s^{-1}$ Gb
		F. Optika		
Valgusallika tugevus	I	—	Rahvusvaheline küünal (candela). Absoluutselt musta keha üks ruutsentimeeter kiirgab normaali suunas 2046° K juures (puhta plaatina hangumise temperatuuril) 60 rahvusvahelise küünla tugevust valgust.	cd
Valgusvoog	Φ	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Luumen. Valgusvoog, mida kiirgab punktikujuline valgusallikas tugevusega 1 rahvusvaheline küünal 1 ruuminurgaühikusse.	lm
Pinnavalgustus (intensiivsus)	E	$E = \frac{d\Phi}{dS}$	Fott. Intensiivsus, mille puhul 1 ruutsentimeetrile langeb ühtlaselt voog 1 luumen.	fott ph
			Luks. Intensiivsus, mille puhul 1 ruutmeetrile langeb ühtlaselt voog 1 luumen.	lx
Heledus	B	$B = \frac{I}{S}$	Stilb. Pinna heledus, mille puhul pinna 1 ruutsentimeeter kiirgab normaali suunas 1 cd. Spektraalne jaotus on määratud cd-ga ja sellega, et mõõtmine toimub normaalse silma abil.	sb
Spektraalne kiirgusvõime	$E_{\nu T}$	$E_{\nu T}\,d\nu d\Omega = \frac{N_{\nu T}}{S}\,d\nu d\Omega$	Erg sekundis kiirgusenergiat ruutsentimeetrilt normaali suunas ruuminurga ühikusse sageduste vahemikus 1 herts.	$g\,s^{-2}$

1	2	3	4	5
Kogu kiirgusvõime	E_T	$E_T d\Omega = \frac{N_T}{S} d\Omega$	Erg sekundis kiirgusenergiat ruutsentimeetrilt normaali suunas ruuminurga ühikusse kõikidel sagedustel.	$g\,s^{-3}$
Spektraalne kiirgusenergia tihedus	$\varrho_{\nu T}$	$\varrho_{\nu T} = \frac{8\pi E_{\nu T}}{C}$	Erg kuupsentimeetris kiirgusenergiat sageduste vahemikus üks herts.	$g\,cm^{-1}\,s^{-1}$

Tihti kasutatakse aga ka teistsuguselt defineeritud kiirgusvõimeid, nimelt energiahulka, mida kiirgab üks ruutsentimeeter kõikides suundades, s. o. ruuminurka 2π. Siis

$$E_{\nu T} d\nu = \int E_{\nu T} d\nu \cos\Theta\, d\Omega = E_{\nu T} d\nu \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\Theta \cos\Theta\, d\Theta = \pi E_{\nu T} d\nu.$$

Saadud kiirgusvõimed on π korda suuremad eespool defineeritud suurustest.

4. PRAKTILISTE MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMI «RAHVUSVAHELISED» NING ABSOLUUTSED MÕÕTÜHIKUD JA ETALOONID

Et nii cgse- kui ka cgsm-süsteemi ühikud on kas liiga väikesed või liiga suured praktikas esinevate mõõtmiste ja arvutuste jaoks, siis loodi läinud sajandi lõpul veel «absoluutne praktiliste mõõtühikute süsteem», mis pidi olema seotud cgsm-süsteemiga. Praktilised ühikud pidid olema 10^n kordsed cgsm-süsteemi ühikud, kus n on positiivne või negatiivne täisarv.

Silmapaistva vene füüsiku prof. A. G. Stoletovi aktiivsel osavõtul võeti rahvusvahelistel konverentsidel 1881. ja 1889. aastal vastu absoluutse süsteemi praktiliste ühikute — ampri, oomi, voldi, kuloni, vati, džauli, faradi ja henri — definitsioonid.

Nende suuruste küllalt täpsete praktiliste etaloonide loomine aga põrkas algul ületamatutele raskustele.

Rahvusvahelisel kongressil ja rahvusvahelisel konverentsil 1908. aastal otsustati absoluutsete praktiliste ühikute kõrval tarvitusele võtta ampri ja oomi rahvusvahelised etaloonid, mis tolleaegse mõõtetehnika piirides olid tehtud võimalikult täpselt võrdseks absoluutsete praktiliste ühikutega.

Vastavalt sellele kokkuleppele on rahvusvahelise ampri etaloon määratud järgmise eeskirjaga: amper on ühtlase voolu tugevus, mis eraldab hõbenitraadi lahusest igas sekundis 1,11800 mg hõbedat; ning oomi etaloon: oom on elavhõbedasamba takistus 0°C ja 760 tr juu-

res, kui samba pikkus on 106,300 cm, ühtlane ristlõige 1 mm² ja mass 14,4521 g.

Need etaloonid olid aluseks nn. rahvusvaheliste elektriühikute süsteemile, mis oli NSV Liidus kehtiv OST 515 alusel. Mõõtude ja Mõõteriistade Komitee käskkirjaga nr. 56 13. aprillist 1948 kehtestati absoluutne praktiliste mõõtühikute süsteem (mksM).[1] Rahvusvahelistes ühikutes kaliibritud mõõteriistu võis kasutada kuni 1953. aastani.

Üleminekul rahvusvahelistelt ühikutelt absoluutsetele tuleb arvestada järgmisi üleminekutegureid:

1	rahvusvaheline	džaul	= 1,00020	abs.	džauli
1	„	vatt	= 1,00020	„	vatti
1	„	amper	= 0,99985	„	amprit
1	„	kulon	= 0,99985	„	kulonit
1	„	volt	= 1,00035	„	volti
1	„	oom	= 1,00050	„	oomi
1	„	farad	= 0,99950	„	faradit
1	„	henri	= 1,00050	„	henrit

Vastavalt Rahvusvahelise Mõõtude Komitee soovitusele on NSV Liidus 1. jaanuarist 1957 kehtestatud absoluutne praktiliste mõõtühikute süsteem, kus neljandaks põhiühikuks on võetud elektriline ühik amper, mille tõttu süsteemi lühendatud nimetus on mksA. «Rahvusvahelised» ühikud on seega läinud ajalukku.

Kui esinevad vanemad elektrilised etaloonid, mis on kaliibritud rahvusvahelistes ühikutes, siis võib ümberarvutusteks kasutada eespool toodud üleminekutegureid.

Kui on vaja tekstis näidata, kas tarvitatud ühikud on rahvusvahelised või absoluutsed, siis lisatakse ühiku tähisele esimesel juhul lühend «int.» ja teisel juhul lühend «abs.».

Neljanda ühiku sissetoomine on dikteeritud otstarbekohasusest — ühikute tuletamine on siis palju lihtsam ja mugavam, kuid mõnedesse võrranditesse tuleb juurde täiendav universaalkonstant. Amper on valitud põhiühikuks seetõttu, et tema reprodutseerimine on teostatav väga suure täpsusega.

Tabelis 3 toome ratsionaliseeritud absoluutse praktiliste mõõtühikute süsteemi (mksA-süsteemi) ühikute definitsioonid ning vahekorrad cgse- ja cgsm-süsteemi ühikutega.

Gauss-Ostrogradski lause kirjutatakse ratsionaliseeritud süsteemis kujul $DS = Q$, s. t. elektrilise läbitavuse D ühik valitakse nii, et kordaja 4π muutuks üheks. Analoogiliselt talitatakse magnetomotoorse jõu valemiga: $\oint Hds = I$. Siin valitakse magnetivälja ühik nii, et kordaja 4π muutuks üheks.

[1] Lühend mksM on tuletatud süsteemi põhiühikute (meeter, kilogramm, sekund, magn) tähistest. Magn on magnetilise läbitavuse ühik.

See-eest esineb kordaja 4π nende süsteemide puhul Coulomb'i seadustes laengute koosmõju kohta ja magnetipooluste koosmõju kohta, Biot-Savart'i seaduses ja mujalgi. Niisiis on «ratsionaliseerimine» otstarbekohane vaid väga kitsal alal (elektrotehnikas) ja seega küllaltki kaheldava väärtusega. Seda süsteemi kasutatakse aga tänapäeval elektrotehnilistes arvutustes kõige sagedamini.

5. ABSOLUUTNE PRAKTILISTE MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEM (mks-SÜSTEEM)

Absoluutse praktiliste mõõtühikute süsteemi (mks-süsteemi) mehaanika-põhisuurusteks on pikkus, mass ja aeg, põhiühikuteks meeter, kilogramm ja sekund. Tabelis 2 on esitatud selle süsteemi ühikud ja nende definitsioonid.

Tabel 2

mks-süsteemi tarvitatavamad mehaanika-ühikud

Suurus	Suuruse tähis	Defineeriv valem	Ühiku nimetus ja definitsioon	Ühiku tähis
1	2	3	4	5
		A. Põhisuurused		
Pikkus	l	—	Meeter. Kahe kriipsu vahe rahvusvahelise meetri etaloonil.	m
Mass	m	—	Kilogramm. Rahvusvahelise kilogrammi etalooni mass.	kg
Aeg	t	—	Sekund. $^1/_{86400}$ osa keskmisest päikeseööpäevast.	s ehk sek
		B. Tuletatud suurused		
Joonkiirus	v	$v = \frac{l}{t}$	Meeter sekundis. Sirgjooneliselt ning ühtlaselt liikuva punkti kiirus, kui punkt liigub igas sekundis edasi 1 m võrra.	$m\,s^{-1}$
Joonkiirendus	a	$a = \frac{v}{t}$	Meeter sekundi ruudu kohta. Sirgjooneliselt ning ühtlaselt kiirenevalt liikuva punkti kiirendus, kui punkti kiirus muutub igas sekundis 1 $m\,s^{-1}$ võrra.	$m\,s^{-2}$

1	2	3	4	5
Tung	F	$F = ma$	N j u u t o n. Tung, mis 1-kilogrammise massiga kehale annab kiirenduse 1 $m\,s^{-2}$ võrra.	$m\,kg\,s^{-2}$ N
Töö	A	$A = Fl$	D ž a u l. Töö, mida sooritab tung 1 njuuton 1 meetri pikkusel teel, kui nihkumine toimub tungi suunas.	$m^2\,kg\,s^{-2}$ J
Võimsus	N	$N = \frac{A}{t}$	V a t t. Džaul sekundis.	$m^2\,kg\,s^{-3}$ W

6. RATSIONALISEERITUD ABSOLUUTSE PRAKTILISTE MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMI (mksA-SÜSTEEMI) ELEKTRILISTE JA MAGNETILISTE ÜHIKUTE DEFINITSIOONID JA VAHEKORRAD RATSIONALISEERIMATA SÜSTEEMIDE (cgsm- JA cgse-SÜSTEEMI) ÜHIKUTEGA

Tabel 3

Suurus	Defineeriv valem	Ühiku nimetus ja definitsioon	cgsm ühikut	cgse ühikut
1	2	3	4	5
Voolutugevus	$F = \frac{2I_1I_2l_2}{r}$	A m p e r (A). Sellise muutumatu voolu tugevus, mis voolab lõpmata pikas sirges väikese läbimõõduga (võrreldes kaugusega teise juhtmeni) juhtmes ja mõjub ühe meetri kaugusel oleva niisama tugeva rööbiku voolu ühe meetri pikkusele osale tungiga $2 \cdot 10^{-7}$ njuutonit.	10^{-1}	$10^{-1}c = 3 \cdot 10^9$
Elektrihulk	$I = \frac{dQ}{dt}$	K u l o n (C). Elektrihulk, mis läbib juhtme ristlõiget 1 sekundis 1-amprilise voolu korral.	10^{-1}	$10^{-1}c = 3 \cdot 10^9$
Pinge, potentsiaal, emj	$A = QU$	V o l t (V). Pinge välja kahe punkti vahel, kui 1-kulonilise laengu ülekandmiseks ühest punktist teise kulub 1 džaul tööd.	10^8	$\frac{10^8}{c} = \frac{1}{300}$

1	2	3	4	5
Elektrivälja tugevus	$E = \frac{dU}{ds}$	Volt meetri kohta $\left(\frac{V}{m}\right)$. Välja tugevus, kui potentsiaali gradient on 1 volt meetri kohta.	10^6	$\frac{10^6}{c} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$
Elektriline induktsioon	$DS = Q$	Kulon ruutmeetri kohta $\left(\frac{C}{m^2}\right)$. Elektriline induktsioon tasapinnalises kondensaatoris, kui laengu pindtihedus kondensaatori plaadil on 1 kulon ruutmeetri kohta.	$4\pi \cdot 10^{-5}$	$4\pi \cdot 10^{-5} c = 12\pi \cdot 10^5$
Elektrimahtuvus	$C = \frac{Q}{U}$	Farad (F). Sellise juhi elektrimahtuvus, mille laengu muutumisel 1 kuloni võrra pinge muutub 1 voldi võrra.	10^{-9}	$10^{-9} c^2 = 9 \cdot 10^{11}$
Elektriline läbitavus	$D = \varepsilon E$	Farad meetri kohta $\left(\frac{F}{m}\right)$. Sellise keskkonna elektriline läbitavus, milles elektrilise induktsiooni voog 1 kulon ruutmeetri kohta kutsub esile välja tugevuse 1 volt meetri kohta.	$4\pi \cdot 10^{-11}$	$4\pi \cdot 10^{-11} c^2 = 36\pi \cdot 10^9$
Takistus	$I = \frac{U}{R}$	Oom (Ω). Sellise juhtme takistus, mille otstele rakendatud pinge 1 volt kutsub esile voolu tugevusega 1 amper.	10^9	$\frac{10^9}{c^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$
Eritakistus	$R = \varrho \frac{l}{S}$	Oom-meeter (Ωm). Sellise aine eritakistus, mille 1 meetri pikkusel ja 1-ruutmeetrise ristlõikega tükil on takistus 1 oom.	10^{11}	$\frac{10^{11}}{c^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^9}$
Magnetivoog	$U = -\frac{d\Phi}{dt}$	Veeber (Wb, volt-sekund). Magnetivoo muutus 1 veeberi võrra sekundis tekitab magnetivoogu aheldavas kontuuris emj 1 volt.	10^8 Mx	$\frac{10^8}{c} = \frac{1}{300}$
Magnetiline induktsioon	$\Phi = BS$	Veeber ruutmeetri kohta $\left(\frac{Wb}{m^2}\right)$. Magnetiline induktsioon, kui 1-ruutmeetrist pinda, mis asub risti välja joontega, läbib voog 1 veeber.	10^4 Gs	$\frac{10^4}{c} = \frac{1}{3 \cdot 10^6}$

1	2	3	4	5
Magneto-motoorne jõud	$U_m = nI$	Amperkeerd (At). Magnetomotoorne jõud 1-amprilist voolu ahelda-vas kontuuris.	$4\pi \cdot 10^{-1}$ Gb	$4\pi \cdot 10^{-1} c = 12\pi \cdot 10^9$
Magneti-välja tuge-vus (magne-tiline ergu-tus)	$H = \frac{In}{l}$	Amperkeerd meetri kohta $\left(\frac{\text{At}}{\text{m}}\right)$. Magnetiväli lõpmata pikas solenoidis, kui solenoidi iga meetri kohta tuleb 1 amperkeerd.	$4\pi \cdot 10^{-3}$ Oe	$4\pi \cdot 10^{-3} c = 12\pi \cdot 10^7$
Induktiivsus, vastastikune induktiivsus	$U = -L\frac{dI}{dt}$	Henri (H). Sellise juhtme induktiivsus, mil-les voolu muutus 1 am-per sekundis kutsub esile lisa-emj 1 volt.	10^9	$\frac{10^9}{c^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$
Magnetiline läbitavus	$B = \mu H$	Henri meetri kohta $\left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right)$. Sellise kesk-konna magnetiline läbita-vus, milles magnetiväli tugevusega 1 amperkeerd meetri kohta kutsub esile magnetilise induktsiooni 1 veeber ruutmeetri kohta.	$\frac{10^7}{4\pi}$	$\frac{10^7}{4\pi c^2} = \frac{1}{36\pi \cdot 10^{13}}$

7. TEHNILINE EHK mkGs- (mkps-) SÜSTEEM

Ehitustehnikas tuleb teha tugevuse arvutusi, kusjuures koor-mistungideks on materjalide kaalud. Seepärast kasutatakse siin teistsugust ühikute süsteemi, nn. tehnilist süsteemi, mille põhi-ühikuteks on meeter (m) — pikkuse ühik, kilogramm-tung (kG) — tungi ühik, mida nimetatakse ka kilopondiks (kp), ja sekund (s) — aja ühik. Kilogramm-tung on kilogramm-massi kaal normaalras-kuskiirenduse korral ($g_n = 980{,}665$ cm/s^2). Et raskuskiirendus vari-eerub kohast kohta mõne tuhandiku piirides, siis erineb kilogramm-massi kaal nendes piirides eespool defineeritud kilogramm-tungist. Ehitustehnika seisukohalt on see tähtsusetu viga ja kilogramm-massi kaal loetakse kõikjal võrdseks kilogramm-tungiga. Füüsika-listel mõõtmistel aga on selline ebatäpsus küllaltki oluline, mis-tõttu selle süsteemi kasutamine piirdub ainult ehitustehnikaga.

Selle süsteemi õpetamisel ja isegi kasutamisel tekkis alatasa arusaamatusi kahesuguse kilogrammi — tungi kilogrammi (kG) ja massi kilogrammi (kg) — olemasolu tõttu. Et nimetatud arusaa-matusest vabaneda, tehti ettepanek nimetada kilogramm-tungi

Tehnilise ehk mkGs-süsteemi ühikud ja nende vahekorrad absoluutsete süsteemide (cgs ja mks) ühikutega

Suurus	Defineeriv valem	Ühiku tähis	Ühiku nimetus	Ühiku definitsioon	cgs ühikut	mks ühikut
Pikkus	—	m	meeter	Kahe kriipsu vahe rahvusvahelise meetri etaloonil.	100 cm	1 m
Tung	—	kG (kp)	kilogramm-tung (kilopond)	Kilogrammise massiga keha kaal normaalraskuskiirendusel (980,665 cm/s^2).	$9{,}81 \cdot 10^5$ dn	9,8 N
Aeg	—	s	sekund	1/86400 osa keskmisest päikeseööpäevast.	1 s	1 s
Kiirus	$v = \frac{l}{t}$	$m\,s^{-1}$	meeter sekundis	Sirgjooneliselt ning ühtlaselt liikuva punkti kiirus, kui punkt liigub igas sekundis edasi 1 m võrra.	10^2 $cm\,s^{-1}$	1 $m\,s^{-1}$
Kiirendus	$a = \frac{v}{t}$	$m\,s^{-2}$	meeter sekundi ruudu kohta	Sirgjooneliselt ning ühtlaselt kiirenevalt liikuva punkti kiirendus, kui punkti kiirus muutub igas sekundis 1 $m\,s^{-1}$ võrra.	10^2 $cm\,s^{-2}$	1 $m\,s^{-2}$
Mass	$F = ma$	$m^{-1}\,kG\,s^2$ ($m^{-1}\,kp\,s^2$)	tehniline massiühik	Sellise keha mass, millele tung 1 kG (kp) annab kiirenduse 1 $m\,s^{-2}$.	$9{,}81 \cdot 10^3$ g	9,8 kg
Töö	$A = Fl$	kGm (kpm)	kilogramm-meeter (kilopondmeeter)	Töö, mida sooritab tung 1 kilogramm (kilopond) 1 meetri pikkusel teel, kui nihkumine toimub tungi suunas.	$9{,}8 \cdot 10^7$ ergi	9,8 džauli
Võimsus	$N = \frac{A}{t}$	$kGm\,s^{-1}$ ($kpm\,s^{-1}$)	kilogramm-meeter sekundis (kilopondmeeter sekundis)	Võimsus, mille puhul igas sekundis tehakse 1 kGm (kpm) tööd.	$9{,}8 \cdot 10^7$ erg/s	9,8 vatti

kilopondiks (kp) ja gramm-tungi pondiks (p) (*pondus* — lad. k. raskus, kaal).

Tabelis 4 on esitatud tehnilise süsteemi ühikute definitsioonid ja vahekorrad absoluutsete süsteemide (cgs ja mks) ühikutega.

8. MÕÕTÜHIKUTE NIMETUSED NING TÄHISED JA FÜÜSIKALISTE SUURUSTE DIMENSIOONID

Füüsikalise suuruse mõõtühikuks on füüsikalise suuruse väärtus, millega võrreldakse teisi selle suuruse väärtusi. Iga füüsikalise suuruse mõõtühikul on teatav nimetus (düün, atmosfäär, kalor jt.). Neid nimetusi, seega mõõtühikuid endid tähistatakse lühidalt eriliste sümbolite ehk tähistega. Nii näiteks on pikkusühiku meetri tähiseks m, tööühiku kilogramm-meetri tähiseks kGm, pinnavalgustusühiku luksi tähiseks lx jne.

Et mõõtühikuid on väga palju, siis tuletatakse nende nimetused ja tähised sageli põhiühikute või teiste juba tuntud ühikute nimetustest ning tähistest. Seejuures tuleb kõigi mõõtühikute nimetuste või tähistega toimetada vormiliselt samasuguseid tehteid kui neile vastavate suuruste arvuliste väärtustega. Näiteks kiirendusühiku sentimeeter sekundi ruudu kohta tähise $\frac{cm}{s^2}$ saame vastava kiirusühiku tähise $\left(\frac{cm}{s}\right)$ jagamisel ajaühiku tähisega (s). Tööühiku ergi tähise $\frac{g \cdot cm^2}{s^2}$ saame vastava tungiühiku (düüni) tähise $\left(\frac{g \cdot cm}{s^2}\right)$ korrutamisel pikkusühiku tähisega (cm), jne.

Selliste liittähiste kasutamine on väga otstarbekohane, sest neist nähtub otseselt, missugustest põhiühikutest on antud ühik tuletatud. Nende tähiste kasutamisel on hõlpus ka üleminek ühest mõõtühikust teise, samuti valemite kontrollimine, sest iga füüsikalise valemi mõlemal poolel peab olema sama tähis. Ühtlaselt kiireneva liikumise tee pikkus näiteks väljendub valemiga

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Asetades selles valemis esinevate suuruste asemele nende süsteemipäraste ühikute tähised, saame:

$$cm = \frac{cm}{s} \cdot s + \frac{cm \cdot s^2}{s^2},$$

millest

$$cm = cm + cm.$$

Siit näeme, et tee pikkus sentimeetrites võrdub kahe sentimeetrites mõõdetud tee pikkuse summaga. Kui aga eelmine valem oleks antud eksikombel kujul $s = v_0 + \frac{at^2}{2}$, siis ilmneks eksitus kohe tähiste kontrollist, sest cm $\neq \frac{\text{cm}}{\text{s}} +$ cm.

Füüsikalise suuruse dimensiooniks nimetatakse avaldist, millest nähtub, kuidas see suurus oleneb põhisuurustest.

Lühiduse otstarbel tähistatakse põhisuurusi ainult ühe tähega: pikkust tähega L (lad. k. *longitudo* — pikkus), massi tähega M (lad. k. *massa* — mass) ja aega tähega T (lad. k. *tempus* — aeg). Sellele vastavalt saab füüsikalise suuruse dimensiooni üldkujul väljendada valemiga $L^aM^bT^c$, kus a, b ja c on positiivsed, negatiivsed või nulliga võrdsed astmenäitajad. Sellise tähistusviisi puhul on kiiruse dimensiooniks LT^{-1}, kiirenduse dimensiooniks LT^{-2}, pindala dimensiooniks L^2, ruumala dimensiooniks L^3, tiheduse dimensiooniks ML^{-3} jne. Dimensiooni väljendavat avaldist nimetatakse sageli ka dimensioonivalemiks.

Põhiühikute kaudu väljendatud mõõtühiku tähisest nähtub ka mõõdetava suuruse dimensioon. Seetõttu kasutatakse mõne suuruse dimensioonivalemi asemel sageli sama suuruse mõõtühiku tähist. Tõepoolest, kiirusühiku $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ tähisest nähtub otseselt, et kiiruse suuruse saamiseks tuleb pikkus (L) jagada ajaga (T), s. o. kiiruse dimensiooniks on $\frac{L}{T}$ ehk LT^{-1}. Samuti võib kasutada kiirenduse ühiku tähist $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ kiirenduse dimensioonivalemi asemel, tiheduse ühiku tähist $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ tiheduse dimensioonivalemi asemel jne.

Tuleb silmas pidada, et suuruse dimensioonivalemist veel ei nähtu, missugune on selle suuruse mõõtühik. Kiirust näiteks võib mõõta väga mitmesuguste ühikutega, kuid dimensioonivalem LT^{-1} jääb ikka samaks. Ka võivad hoopis erinevad suurused, näiteks töö ja pöördemoment, omada sama dimensiooni (ML^2T^{-2}).

Kui mõne suuruse puhul tahetakse märkida ainult dimensiooni, siis paigutatakse selle suuruse tähis nurksulgudesse. Töö dimensiooni näiteks võib valemi $A = fs$ põhjal väljendada järgmiselt:

$$[A] = [fs] = [f][s] = [ma]L = M\frac{L}{T^2}L = ML^2T^{-2}.$$

Kui mõne suuruse dimensioon saadakse kahe samanimelise ja samas astmes võetud suuruse dimensiooni jagamisel, siis loetakse sellise suuruse dimensioon nulliks. Nurga suuruse radiaanides näiteks saame kahe pikkuse (kaare ja raadiuse) jagamise teel. Seega nurk radiaanides on suurus dimensiooniga null ehk dimensioonita suurus. Samuti on dimensioonita suu-

rused kõik abstraktsed arvud, nagu logaritmid ja trigonomeetrilised funktsioonid (siinus, koosinus, tangens jt.) ning nende argumendid.

9. ARV MÕÕTMISE VÕI LOENDAMISE TULEMUSENA

Kui tahame teada näiteks oma töölaua pikkust, siis võtame sentimeetermõõdu ja mahutame pikkusühikut 1 cm laua pikkusesse nii mitu korda kui võimalik. Mahtugu 1 cm laua pikkusesse näiteks 120 korda. Me ütleme siis, et laua pikkus on 120 cm.

Kasutades aga sama laua pikkuse mõõtmiseks 10 korda suuremat ühikut, s. o. detsimeetrit, saame laua pikkuseks 12 dm, s. o. 10 korda väiksema arvu. Siit näeme, et mõõtmistulemusena saadud arv on seda väiksem, mida suurem on mõõtühik; üldiselt: mõõtarv on pöördvõrdeline mõõtühiku suurusega.

Küsime nüüd, kas mõõtmise tulemusena saadud arv 120 cm vastab absoluutselt täpselt meie töölaua pikkusele?

Esialgu näib, et jah. Lähemal järelemõtlemisel aga tekib rida kahtlusi. Tõepoolest, täpse mõõtmistulemuse saamiseks peab mõõtühik ise olema täpne. Kas meie mõõdul (mõõtpuul, mõõtjoonlal) esinev mõõtühik on seda? Vaevalt küll. Mõõt võib olla puudulikult valmistatud, aja jooksul muutunud materjalis esinevate sisemiste pingete tõttu, kulunud, kõveraks paindunud, temperatuuri ja niiskuse mõjul pikemaks või lühemaks muutunud jne.

Edasi, mõõdetava eseme, käesoleval korral laua, pikkus muutub alatasa mitmesuguste välistegurite (temperatuuri, niiskuse) mõjul. Näiteks võime igaüks enda suhtes veenduda, et hommikul voodist tõustes oleme 1—2 cm võrra pikemad kui õhtul enne voodisse heitmist. Seega tekib küsimus, missugust laua pikkust lugeda laua õigeks pikkuseks. Ka pole laua servad päris teravad, vaid pisut ümmargused, nii et tekib raskusi küsimusega, kust õieti mõõtmist alustada ja kus lõpetada.

Mõõtmise toimetamisel pole mõõt harilikult nii pikk kui mõõdetav ese, vaid mõõtu tuleb mahutada mõõdetavasse pikkusesse õige mitu korda, kusjuures aga mõõdu viimase kriipsu asend ei tarvitse sugugi ühte langeda mõõdu esimese kriipsu asendiga mõõdu edasinihutamisel. Ka ei suuda me palja silmaga kuigi täpselt hinnata, kas mõõt on õigesti (otse) asetatud. Pealegi ei mahu mõõtühik mõõdetavasse pikkusesse täpselt täisarv korda, vaid harilikult jääb midagi üle, mille suurust hindame mõõtühiku kümnendosades silma järgi, millest tuleneb jälle uus ja õige oluline ebatäpsuse võimalus.

Väga peente mõõtmiste puhul on segavaks asjaoluks veel see, et mõõdu kriipsud pole geomeetrilised jooned, s. o. ilma laiuseta, vaid nad kõik omavad teatavat laiust (jämedust), mis jälle segab õige lugemi saamist.

Kõigest eelöeldust selgub, et mitmesuguste juhuslikkude asjaolude tõttu ei vasta laua pikkuse mõõtmise tulemusena saadud arv 120 cm laua pikkusele päris täpselt, vaid *ainult ligikaudselt*.

Samalaadseid raskusi kui pikkuse mõõtmisel esineb ka kõigi teiste suuruste mõõtmisel, olgu see aeg, temperatuur, raskus, ruumala vm. Mitte kunagi ei ole me õigustatud väitma, et saadud mõõtarv vastab mõõdetavale suurusele absoluutselt täpselt: *iga mõõtarv väljendab mõõdetavat suurust ainult ligikaudselt*.

Sama väide kehtib üldiselt ka *loendamise tulemusena saadud arvude kohta*. On loendatav hulk väike, siis võime öelda selle suuruse päris täpselt: näiteks perekonnas on 5 last, karjas on 10 lammast, aias on 25 õunapuud jne. Suuremate hulkade loendamisel aga tekib juba tunduvaid raskusi. Näiteks elanike arvu mõnes linnas ei tea me kunagi päris täpselt elanikkonnas toimuvate alaliste muutuste tõttu (suremine, sündimine, mujale kolimine, juurdetulek). Kasutatavad arvud näitavad ainult mingit keskmist olukorda, millest tõelised olukorrad võivad erineda ühes või teises suunas õige suurel määral.

10. MÕÕTMISTULEMUSE ABSOLUUTNE VIGA

Mõõdetava suuruse tõelise väärtuse (x) ja saadud mõõtarvu (a) vahet nimetatakse mõõtmistulemuse *absoluutseks veaks* (α). Seega

tõeline väärtus		mõõtarv		abs. viga
x	$-$	a	$=$	$\alpha \pm$

millest

$$x = a \pm \alpha. \qquad (1)$$

s. o. *tõeline väärtus* x *võrdub mõõtarvu* a *ja absoluutse vea* α *summa või vahega*.

Valemis (1) on antud absoluutse vea aritmeetiline väärtus ehk absoluutne suurus. Et absoluutne viga tuleb kas mõõtarvuga liita või sellest lahutada, siis kirjutatakse tema suuruse ette kaks märki: $+$ ja $-$.

Et mõõdetava eseme tõeline suurus (x) on tundmatu, siis pole antud juhul võimalik määrata ka absoluutse vea (α) suurust. Selle asemel kasutatakse nn. *absoluutse vea ülemmäära* $\Delta\alpha$, s. o. *kõige väiksemat arvu, mille kohta oleme veendunud, et absoluutne viga ei saa olla temast suurem*.

Kui näiteks töölaua pikkuse mõõtmisel võime öelda, et kõiki võimalikke asjaolusid arvestades *ei saa* absoluutne viga α *olla*

suurem kui $\pm 0{,}5$ cm, siis sel juhul absoluutse vea ülemmääraks Δa ongi $\pm 0{,}5$ cm, mis tähendab, et laua tõeline pikkus x on määratud seosega $120 - 0{,}5 \leqslant x \leqslant 120 + 0{,}5$ või üldjuhul

$$a - \Delta a \leqslant x \leqslant a + \Delta a.$$

Eelmiste võrratuste asemel kirjutatakse lühidalt $x = 120(\pm 0{,}5)$ cm või üldjuhul

$$x = a(\pm \Delta a) \text{ cm}.$$

Sellise kirjutusviisi kohaselt $x = 15{,}4(\pm 0{,}1)$ s tähendab, et $15{,}3 \text{ s} \leqslant x \leqslant 15{,}5 \text{ s}$.

Mõõtmistulemuse üleskirjutamisel tuleb ära märkida ka selle absoluutse vea ülemmäär, nagu see on tehtud eelmistes näidetes.

11. ARVUDE ÜMARDAMINE

Nagu eespool nägime, peab iga mõõtmistulemusena saadud arv (a) olema varustatud mõõtmisvea ülemmääraga (Δa), või kui seda pole antud, siis peab arv ise olema võetud nõnda, et kõik tema kümnendkohad oleksid õiged. Sel juhul määrab arvu absoluutse vea ülemmäära viimane kümnendkoht ja vea suurus ei tohi mingil juhul ületada viimase kümnendkoha poolt ühikut.

Kui pole kindel, et arvu viimased kümnendkohad on õiged, siis jäetakse nad kümnendmurrus hoopis ära, täisarvus aga ümardatakse nullideks. Sedasama tehakse ka siis, kui pole vajadust anda arvu väga suure täpsusega. Võtame näiteks arvu 75,324 kg. Kui teame, et meie kaalud võimaldavad mõõta ainult 50-grammise täpsusega, siis kaks viimast kohta ei tarvitse enam õiged olla ja me kirjutame arvu lihtsamalt: 75,3 kg. Sel kujul erineb see arv õigest väärtusest vähem kui 0,05 kg võrra.

Olgu elanike arv N. linnas 51 347. Kui oleme veendunud, et selle arvu kolm viimast kohta pole õiged, siis on õigem nende asemele kirjutada nullid ja anda see arv hoopis lihtsamal kujul: 51 000, mis iseloomustab linna elanikkonda niisama hästi kui eelminegi arv, kuid on hoopis lihtsam meelespidamiseks ja arvutamiseks.

Teaduslikus kirjanduses on üldiseks kombeks eraldada arvudes kindlasti teada olevad kohad arvu ülejäänud osast. Näiteks Maa kaugus Päikesest kujul $149{,}5 \cdot 10^6$ km on antud neljakohalise täpsusega. Täpselt mitte teada olevad kohad märgitakse kindlasti teada olevate kohtade kõrvale kümne astmete näol. Mõõtühiku muutmine ei muuda arvu täpsust, sest see kajastub ainult kümne astmenäitaja muutumises. Maa kaugus Päikesest neljakohalise täpsusega on näiteks ka $1{,}495 \cdot 10^{13}$ cm. Suurusjärgu esiletõstmiseks ja

meelespidamise hõlbustamiseks antaksegi harilikult kõikide konstantide täisarvuline osa kümne piirides, ülejäänud teadaolevad kohad aga kümnendkohtadena pärast koma. Elektroni laengu suurus näiteks on nelja kohaga $4{,}802 \cdot 10^{-10}$ lü, kolme kohaga $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ lü jne. Kui null tähistab arvu teadaolevat kohta, siis ei tohi teda arvu lõpust mingil juhul ära jätta. See vähendaks selle arvu kui mõõtmistulemuse täpsust.

Loomulikult tuleb arvude ümardamisel toimida nõnda, et ümardamisest tingitud viga oleks võimalikult väike. Seepärast kasutatakse arvude ümardamisel suurema täpsuse saavutamiseks järgmist reeglit: kui ärajäetav kümnendkoht või nulliga asendatav number on 0, 1, 2, 3, 4, siis jäetakse sellele eelnev number muutmatuks; kui aga ärajäetav kümnendkoht või nulliga asendatav number on 5, 6, 7, 8, 9, siis suurendatakse eelmise kümnendkoha ühikute arvu (numbrit) ühe võrra. Näiteks 1 m^3 õhku kaalub 1,293 kG, ümardatult sajandikeni 1,29 kG, ümardatult kümnendikeni aga 1,3 kG. On selge, et 1,3 kG on õigele väärtusele hoopis lähemal kui 1,2 kG. Esimesel juhul teeme vea 0,007 kG, teisel juhul aga 0,093 kG.

Sellist arvude ümardamise viisi nimetatakse ümardamiseks kuni viimase säilitatava kümnendkoha ühe ühiku pooleni ehk standardümardamiseks. Selle järgi on näiteks kirjutised 7,8 ja $7{,}8(\pm 0{,}05)$ täiesti üheväärsed.

Kui mõnes suurearvulises mõõtmisseerias esineb rida arve, mis lõpevad numbriga 5, ei ole otstarbekohane neid kõiki ümardada ülespoole. Sel juhul kasutatakse järgmist reeglit: kui viimase numbri ees on paarisarv, siis ümardatakse 5 allapoole, kui paaritu arv, siis ülespoole, s. o. igal juhul saadakse 5 ümardamisel tulemusena paarisarv. Niisama hästi võiks kasutada ka otse vastupidist reeglit. Oluline on siin sama reegli järjekindel rakendamine, sest siis on ümardamisel tehtavate vigade vastastikune kompenseerumine kõige suurem.

12. MÕÕTMISE TÄPSUS JA RELATIIVNE VIGA

Igasuguse korraliku mõõtmise puhul peab teada olema mõõtmistulemusena saadud arvu absoluutse vea ülemmäär. See kirjutatakse arvu kõrvale või arv ise kirjutatakse kujul, millest otseselt nähtub tema absoluutse vea ülemmäär.

Mõõtmistulemuse absoluutse vea ülemmäär iseloomustab küll mõõtmistulemusena saadud arvu, kuid ei iseloomusta mõõtmise toimetamise täpsust ennast. Kui näiteks laua pikkus 120 cm on mõõdetud absoluutse vea ülemmääraga 0,5 cm ja maja pikkus 24 m absoluutse vea ülemmääraga 1 cm, siis on teine

mõõtmine toimetatud palju täpsemalt kui esimene, olgugi et absoluutse vea ülemmäär on esimesel juhul 2 korda väiksem. Tõepoolest, mõõtmise (mitte mõõtarvu!) täpsuse hindamisel pole oluline absoluutse vea ülemmäära suurus, vaid absoluutse vea ülemmäära ja mõõtmistulemuse suhe, mis näitab, kui suur osa veast tuleb mõõtmistulemuse iga ühiku, näiteks 1 cm kohta. Esimesel juhul saame:

$$0{,}5 \text{ cm} : 120 \text{ cm} = \frac{1}{240};$$

teisel juhul:

$$1 \text{ cm} : 2400 \text{ cm} = \frac{1}{2400}.$$

Siit näeme, et maja pikkus on mõõdetud 10 korda täpsemalt kui laua pikkus, sest iga mõõtühiku (1 cm) kohta tulev viga on esimesel juhul 10 korda väiksem.

Absoluutse vea ülemmäära ja mõõtarvu suhet nimetatakse relatiivseks ehk suhteliseks veaks (δ). Üldjuhul, kui tähistame mõõtarvu a-ga ja absoluutse vea ülemmäära Δa-ga, väljendub meie definitsiooni kohaselt relatiivne ehk suhteline viga valemiga

$$\delta = \frac{\Delta a}{a}. \qquad (1)$$

Suhtelist viga väljendatakse harilikult sajandikes — protsentides — või tuhandikes — promillides. Eelmises näites oli laua pikkuse mõõtmise puhul

$$\delta = \frac{\Delta a}{a} = \frac{0{,}5 \text{ cm}}{120 \text{ cm}} = \frac{1}{240} = 0{,}4\%;$$

maja pikkuse mõõtmise puhul

$$\delta = \frac{\Delta a}{a} = \frac{1 \text{ cm}}{2400 \text{ cm}} = \frac{1}{2400} = 0{,}4‰.$$

Nagu nähtub valemist (1), saab suhtelise vea kaudu arvutada ka absoluutse vea ülemmäära, sest

$$\Delta a = \delta \cdot a.$$

Kui näiteks kivi kaalub 4 kG ja kaalumine on toimetatud suhtelise veaga 0,5%, siis on absoluutse vea ülemmäär $\Delta a = 0{,}005 \cdot 4000 \text{ G} = 20 \text{ G}$.

Tabelis 5 on antud mõõtmistulemuse relatiivse vea suuruse ja ühes sellega ka mõõtmise toimetamise täpsuse hinnang.

Tabel 5

Relatiivse vea suurus	Relatiivse vea suuruse hinnang	Mõõtmise täpsuse hinnang
0,03—0,1%	väga väike	väga peen
0,1—0,3%	väike	peen
0,3—1%	keskmine	keskmine
1—3%	suur	jäme
3—10%	väga suur	väga jäme

13. VAATLUSVIGADE LIIGITUS

Eespool selgitasime, et mõõtmisel esineb alati vigu, mis võivad küll olla väga väikesed, kuid me peame siiski alati nende suurusest teadlikud olema.

Kõiki mõõtmisel esinevaid vigu võib jagada kahte suurde rühma: *süstemaatilised* ja *juhuslikud* vead. Esimese rühma vead mõjutavad tulemust kogu mõõtmisseeria kestel *ühes kindlas suunas*. Süstemaatilisi vigu võib põhjustada terve rida tegureid: mõõteskaala on suuremate ühikutega temperatuurse paisumise tõttu; keha kaalumisel saadud kaal on väiksem õhu hüdrostaatilise üleslükke tõttu; kasutataval mõõteriistal võib olla individuaalseid vigu jne. Olles sellistest vigadest teadlikud, saame neid kõrvaldada: määrame temperatuuri ja paisumisteguri ning arvutuse teel parandame tulemuse; määrame keha ruumala ja õhu erikaalu ning arvutame üleslükke; kontrollime riista ja arvestame tema viga jne.

Terve rea süstemaatiliste vigade põhjused aga on seda laadi, et me ei saa neid arvestada, kuigi oleme neist teadlikud. Nende hulka kuuluvad valgustustingimused, vaatleja enda viga, mis on tingitud tema psühhofüüsilisest konstitutsioonist, jne. Ajamomentide määramisel näiteks reageerib üks vaatleja signaalile hoopis kiiremini kui teine. Sel juhul püütakse rakendada niisugust metoodikat, et need vead üksteist kompenseeriksid. Kui see ei ole võimalik, siis korraldatakse vastavaid katseid ja uurimisi nende vigade suuruste hindamiseks.

Vigase, logiseva riistaga tehtud mõõtmisi ei saa üldse arvesse võtta — sellise riistaga ei mõõdeta. Riist tuleb korda seada, kontrollida, ja alles siis võib teda mõõtmiseks kasutada.

Võib juhtuda, et mõõtmistulemust mõjutavaid põhjusi on palju ja on raskusi nendest täieliku ülevaate saamisel. Mõningate süstemaatiliste vigade põhjustest me ei ole üldse teadlikud. Et selliseid vigu hinnata, peame korraldama samad mõõtmised teistsuguse metoodikaga ja teistsuguste riistadega. Siis võime oletada, et uuel mõõtmisel mõned põhjused ei mõjuta üldse tulemust, mõned aga mõjutavad vastassuunas. Kui osutub, et uue mõõtmise

tulemus erineb endisest vähe, siis võime kindlad olla, et mõõtmisviga ei ületa nende kahe tulemuse vahet.

Sageli on olukord niisugune, et vigade põhjused, millest meil ei ole ülevaadet, muutuvad kogu aeg ja koos nendega muutuvad ka vead. Mõõteriist näiteks võib vibreerida, võivad muutuda hõõrdumistingimused lugemi võtmisel, võib muutuda riista temperatuur köetud toas valitsevate õhuvoolude tõttu jne. Kui teeme mitu mõõtmist, eriti pikema aja tagant, siis võime kindlad olla, et vigade põhjused on igal mõõtmisel iselaadi ja erinevate suurustega, mistõttu ka vead ise on erinevad. Selliste vigade suuruste jaotus peaks olema enam-vähem juhuslik, mida näitab ka kogemus. Niisuguseid vigu nimetamegi *juhuslikeks vigadeks*. Saadud mõõtmistulemustele võib rakendada tõenäosusteooriat ja saada väga mitmesuguseid iseloomustusi tehtud mõõtmiste täpsuse kohta: arvutada keskmine viga, ruutkeskmine viga, tõenäone viga. Võib arvutada ka tõenäoseima tulemuse jne. Kuid nagu juba sissejuhatuses oli mainitud, need arvutused ei suurenda tulemuse täpsust, sest mõõtmisvead ei ole kunagi täiesti juhuslikud. Seepärast on täiesti piisav, kui me korduvate mõõtmiste teel saadud tulemustest arvutame aritmeetilise keskmise tulemuse ja anname maksimaalse või keskmise vea, mis iseloomustab mõõtmise täpsust.

14. VIGADE TEOORIAST

Olgu meil rida korduva mõõtmise teel saadud väärtusi a_i, mis on saadud ühesuguse mõõtmistäpsusega. Olgu nende hulk n. Me võime uurida, kuidas jaotub nende väärtuste esinemise sagedus. Väga suuri ja väga väikesi väärtusi esineb vähe. Teatava keskmise suurusega väärtusi on aga kõige rohkem. Seda kõige sagedamini esinevat väärtust nimetame *tõenäoseimaks väärtuseks* ja teda saame leida kas graafiliselt või arvutuse teel.

Kas võime lugeda tõenäoseimat väärtust kõige vähem erinevaks mõõdetava suuruse tõelisest väärtusest?

Teiselt poolt võime otsida sellist a väärtust, mille suhtes võetud vigade ruutude summa oleks minimaalne:

$$S^2 = \sum_1^n (a - a_i)^2 = \sum_1^n x_i^2 = \min. \qquad (1)$$

Suuruse S^2 miinimumi leidmisel peame silmas, et ta on suuruse a funktsioon, kuna a_i-d on konstandid. Miinimumi korral peab S^2 tuletis a järgi olema null:

$$\frac{d(S^2)}{da} = \sum_1^n 2(a - a_i) = 0. \qquad (2)$$

Taandades 2-ga ja arvutades summat peame meeles, et selles summas on n liidetavat:

$$na - \sum_1^n a_i = 0,$$

$$a = \frac{\sum_1^n a_i}{n}. \tag{3}$$

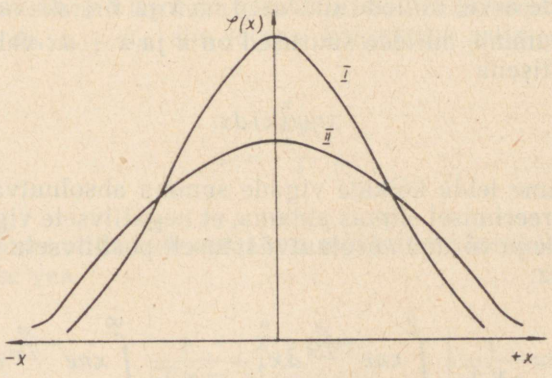
Siit selgub, et niiviisi valitud suurus a on aritmeetiline keskmine. Kui vead on jaotatud juhuslikult, siis enamikul praktikas esinevatel juhtudel langevad tõenäoseim väärtus ja aritmeetiline keskmine ühte. Seega on loogiline järeldada, et aritmeetiline keskmine on kõige vähem erinev mõõdetud suuruse tõelisest väärtusest. Kui tõenäoseim väärtus ühtib aritmeetilise keskmisega, siis alluvad vead selle väärtuse suhtes nn. normaalsele jaotusseadusele:

$$\varphi(x)\,dx = \frac{dx}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \tag{4}$$

$\varphi(x)\,dx$ tähendab siin vea esinemise tõenäosust väärtuste vahemikus x kuni $x + dx$. Suurust $\sigma^2 = \frac{S^2}{n-1}$ nimetatakse dispersiooniks ja ta tähendab vea ruudu keskväärtust. Vea esinemise tõenäosus väärtuste vahemikus $-\infty$ kuni $+\infty$ peab olema üks, seega

$$\int_{+\infty}^{-\infty} \varphi(x)\,dx = 1. \tag{5}$$

Funktsiooni $\varphi(x)$ maksimum asub kohas $x = 0$. Maksimumi suurus on $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$. Funktsiooni graafik on esitatud joonisel 1. Graa-



Joon. 1. Vigade jaotusfunktsioon.

fikuga piiratud pind peab vastavalt võrrandile (5) olema alati üks ühik. Sellest aga järeldub, et kui σ^2 suureneb, siis väheneb maksimumi väärtus kohal $x = 0$ ja $\varphi(x)$ kõver (II) kulgeb sel juhul suuremate x väärtuste juures kõrgemal, s. t. kui mõõtmisvea ruudu keskväärtus suureneb, siis suureneb ka suurte vigade esinemise tõenäosus ja mõõtmisseeria on halb, mistõttu maksimumi kõrgust $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ nimetatakse ka täpsuse mõõduks.

1. Suurust

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}, \tag{6}$$

s. o. ruutjuurt vea ruudu keskväärtusest, nimetame r u u t k e s k m i s e k s v e a k s ehk standardiks. Ta on seega üheks mõõtmist iseloomustavaks suuruseks.

2. K e s k m i s e v e a η saame sel teel, et liidame vigade absoluutväärtused ja jagame summa vigade arvuga n:

$$\eta = \frac{\sum_1^n |a - a_i|}{n}. \tag{7}$$

Valem kehtib väga suurte n väärtuste puhul. Kui n on väike, siis tuleb täpsema tulemuse saamiseks jagada mitte n-ga, vaid suurusega $\sqrt{n(n-1)}$:

$$\eta = \frac{\sum_1^n |a - a_i|}{\sqrt{n(n-1)}}. \tag{7a}$$

Kui tahame η siduda σ-ga, siis arvutame $\varphi(x)$ abil keskmise vea. Avaldis $\varphi(x)dx$ tähendas vea esinemise tõenäosust väärtuste vahemikus x kuni $x + dx$. Kui korrutame seda vigade hulgaga n, siis saame vigade arvu, millede suurused on x ja $x + dx$ vahel.

Vigade summa, millede suurused on x ja $x + dx$ vahel, avaldub seega korrutisena

$$xn\varphi(x)dx.$$

Kui tahame leida kõikide vigade summa absoluutväärtuse, siis peame integreerimisel silmas pidama, et negatiivsete vigade summa on negatiivne ja võrdub absoluutväärtuselt positiivsete vigade summaga. Seega:

$$\sum_1^n x_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\left|\int_{-\infty}^{0} xne^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}dx\right| + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_0^{\infty} xne^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}dx =$$

$$= \frac{2n}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{2n\sigma^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{2n\sigma}{\sqrt{2\pi}}.$$

Et saada keskmist viga, peame vigade absoluutväärtuste summa jagama vigade arvuga:

$$\eta = \frac{\sum_1^n x_i}{n} = \frac{2n\sigma}{n\sqrt{2\pi}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\,\sigma = 0{,}7979\sigma. \tag{8}$$

3. Tõenäone viga r. Kui tõenäosus, et esineva vea absoluutväärtus ei ületa väärtust r, on võrdne poolega, siis nimetame väärtust r tõenäoseks veaks. Seega

$$\int_{-r}^{+r} \varphi(x)\,dx = 2\int_0^r \varphi(x)\,dx = \Phi\left(\frac{r}{\sigma}\right) = \frac{1}{2}.$$

Siit leiame:

$$r = \sqrt{2}\,\varrho\sigma = \sqrt{\pi}\,\varrho\eta \approx 0{,}6745\sigma \approx 0{,}8454\eta, \tag{9}$$

kus ϱ on määratud võrrandiga

$$\Phi(\varrho\sqrt{2}) = {}^1/_2 \quad \text{ja} \quad \varrho = 0{,}4769.$$

Kokkuvõttes võib saadud mõõtmistulemuste läbitöötamise kohta öelda järgmist.

Kui oleme saanud korduvate mõõtmiste tulemusena rea suuruse väärtusi $a_1, a_2, \ldots, a_n$, siis leiame kõigepealt aritmeetilise keskmise

$$a = \frac{\sum_1^n a_i}{n}. \tag{3a}$$

Edasi võime anda iseloomustuse mõõtmise täpsusele, arvutades kas keskmise vea

$$\eta = \frac{\sum_1^n |a - a_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \tag{7b}$$

või ruutkeskmise vea

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(a-a_i)^2}{n(n-1)}}. \qquad (6a)$$

Nendest võime arvutada tõenäose vea:

$$r_1 = 0{,}8454\,\eta, \qquad (9a)$$

$$r_2 = 0{,}6745\,\sigma. \qquad (9b)$$

Kui tõenäose vea väärtused, mis on arvutatud valemitest (9a) ja (9b), langevad hästi ühte, siis näitab see, et vigade jaotus allub juhuslike vigade normaalsele jaotusseadusele (4).

Eelöeldu selgituseks teeme järgmise katse. Võtame mõne sentimeetri laiuse, teravate rööpsete äärtega riba valget paberit ja määrame tema laiuse võimalikult 0,1 mm täpsusega. Selleks tõmbame risti üle riba terava joone ja asetame iga kord mm-skaala juhuslikult sellele joonele nõnda, et skaala lugemite võtmine toimuks paberi mõlemast äärest. Seitsme sellise vaatluse tulemused on paigutatud tabelisse 6.

Tabel 6

Lugemi järjekorra-number	Parempoolne lugem, cm	Vasakpoolne lugem, cm	Riba laius, cm	$l_k - l_i$
1	13,05	5,72	7,33	0,01
2	11,59	4,25	7,34	0,00
3	12,40	5,08	7,32	0,02
4	10,77	3,42	7,35	—0,01
5	9,88	2,54	7,34	0,00
6	10,79	3,44	7,35	—0,01
7	11,39	4,05	7,34	0,00

Märkus: Lugemi võtmine paberi mõlemast äärest on tarvilik, sest muidu hakkaks eelmine lugem mõjustama järgmisi. Ka on selle katse puhul oluline, et vaatlustingimused (valgustus, kumma silmaga vaadeldakse, vaatlussuund jne.) oleksid kõigil vaatlustel võimalikult samad.

Tabeli 6 tähelepanelikul silmitsemisel selgub, et täismillimeetrite arvus ühtivad kõik vaatlused, kuid kümnendikmillimeetrites esinevad juba erinevused — tekivad vaatlusvead, mida tuleb arvestada kui igasuguse mõõtmisega kaasnevat paratamatut pahet. Meil puudub võimalus vaatlusvigu vältida ka kõige parema tahtmise juures, sest me ei suuda oma meelte abil hinnata mõõdetavaid suurusi absoluutselt täpselt, vaid ainult ligikaudselt. Ka ei saa me

tagada, et kõik vaatlustingimused (sisemised — psühholoogilised — ja välised — valgustus, temperatuur, õhurõhk, niiskus, akustilised mõjud jne.) püsiksid kogu vaatluse kestel samadena.

On võimalik, et vilumuse ja heade vaatlustingimuste puhul saaksime ka kümnendikmillimeetrite osas iga kord sama tulemuse. Kui aga tahaksime eelmises katses otsese vaatluse täpsust suurendada 0,01 millimeetrini, siis osutuks see juba täiesti võimatuks.

Leiame aritmeetilise keskmise:

$$l_k = \frac{7{,}33 + 7{,}34 + 7{,}32 + 7{,}35 + 7{,}34 + 7{,}35 + 7{,}34}{7} = 7{,}34 \text{ cm}.$$

Tehnilise võttena on kasulik meeles pidada, et aritmeetilise keskmise määramisel on küllalt sellest, kui leida aritmeetiline keskmine ainult *muutuvast osast*, käesoleval korral sajandikest, sest kõigi liidetavate muutumatu osa 7,3 läheb automaatselt üle ka aritmeetilisse keskmisse. Niisiis:

$$l_k = 7{,}3 + \frac{0{,}03 + 0{,}04 + 0{,}02 + 0{,}05 + 0{,}04 + 0{,}05 + 0{,}04}{7} =$$

$$= 7{,}3 + \frac{0{,}27}{7} = 7{,}3 + 0{,}04 = 7{,}34 \text{ cm}.$$

Leiame mõõtmise täpsust iseloomustavad suurused:

$$\eta = \frac{0{,}05}{\sqrt{7 \cdot 6}} = 0{,}00771,$$

$$\sigma = 10^{-2}\sqrt{\frac{7}{6}} = 0{,}0108,$$

$$r_1 = 0{,}00652,$$

$$r_2 = 0{,}00727.$$

r_1 ja r_2 erinevus on 10%, mis on suhteliselt hea, kui arvestada, et vea suurus on antud ühe koha täpsusega ja et on teostatud ainult seitse mõõtmist.

Tuleb silmas pidada, et vaatlusviga ei tohi samastada vea mõistega koolipraktikas, kus viga tähendab eksimust või midagi, mis pole õigesti tehtud. Vaatlusviga ei ole mitte halvasti tehtud või vigase vaatluse, vaid ka kõige paremini toimetatud vaatluse lahutamatu kaaslane, s. o. normaalne ja paratamatu nähtus igasuguste vaatluste toimetamisel.

15. ARVUTAMISE TÄPSUS

Teoreetiliselt määratud suurusi võime arvutada kuitahes suure täpsusega. Näiteks π väärtus on arvutatud rohkem kui 700 kümnendkohaga, mis annab absoluutse vea ülemmäära väiksema kui

10^{-700} ning relatiivse vea väiksema kui $^1/_3 \cdot 10^{-700}$. Hoopis teine on lugu mõõtmisel saadud arvude või nende põhjal toimetatud arvutuste tulemuste täpsusega. Kui tahame näiteks määrata π suurust katseliselt, siis õnnestub see meil harilikult 2—3 õige kümnendkohani.

Olgu näiteks katseliselt saadud π väärtus $3^1/_7$. Kümnendmurruna võiksime selle kirjutada järgmiselt:

$$\pi = 3^1/_7 = 3{,}1428571.$$

Esialgu näib, nagu saaksime siin, jätkates jagamist küllalt kaugele, järjest suurendada π väärtuse õigete kohtade arvu. Tegelikult aga pole sellisel jagamisel mõtet, sest ringjoone pikkuse ja läbimõõdu mõõtmise tulemused olid ainult ligikaudsed. Ligikaudsetest andmetest aga pole võimalik ainult aritmeetiliste tehete varal saada täpset tulemust. Selgituseks võrdleme teoreetiliselt arvutatud π väärtust, mis on

$$\pi = 3{,}14159265\ldots,$$

meie poolt saadud tulemusega. Võrdlusest selgub, et konkreetse mõõtmise alusel saadud väärtuses võime õigeteks kümnendkohtadeks lugeda ainult kolm esimest (3, 1, 4), kuna kõik teised kui ebaõiged tuleb kõrvale heita.

Üldise juhendina võime arvutamise tulemuse täpsuse hindamisel kasutada järgmist: tulemuse viga ei saa olla väiksem kasutada olevate andmete suurimast veast. Kui näiteks ringjoone pikkus ja läbimõõt on määratud kolme õige kümnendkohaga, siis ei saa ka nende jagatise õigete kümnendkohtade arv olla suurem kolmest, vaid pigemini väiksem. Samuti: kui üks liidetav on antud veaga mitte üle 0,1 ja teine veaga mitte üle 0,001, siis summa vea ülemmäär ei saa olla väiksem kui 0,1.

16. VIGADE LEVIMINE ARVUTAMISEL

Vaatlusvead mõjustavad otseselt ainult vaatlustulemust, milleks on mõne suuruse (pikkuse, kaalu, massi, aja vm.) väärtus. Kui vaatlusest otseselt saadud tulemuse põhjal toimetatakse hiljem terve rida arvutusi, siis võib vaatlusviga levida ka arvutamise lõpptulemusse. Näiteks mõõtsime ringi raadiuse r absoluutse veaga $\pm \Delta r$. Seega ringi tõeline raadius $R = r \pm \Delta r$ ja tõeline pindala

$$S = \pi R^2 = \pi(r \pm \Delta r)^2 = \pi[r^2 \pm 2r \cdot \Delta r + (\Delta r)^2] \approx \pi r^2 \pm 2\pi r \cdot \Delta r,$$

sest $(\Delta r)^2$ kui väga väikese suuruse võime ilma tunduva veata jätta arvestamata. Edasi: mõõdetava ringi pindala absoluutne viga

$$\pi R^2 - \pi r^2 \approx \pm 2\pi r \cdot \Delta r$$

ja relatiivne viga

$$\delta = \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{\pi r^2} \approx \pm \frac{2\pi r \cdot \Delta r}{\pi r^2} = \pm \frac{2 \cdot \Delta r}{r} = \pm 2 \cdot \frac{\Delta r}{r}.$$

Saadud tulemusest nähtub, et ringi pindala relatiivne viga on kaks korda suurem tema raadiuse relatiivsest veast.

Arvutamisel võib iga matemaatiline tehe mõjustada tulemuse viga eri viisil. Seepärast tuleb teada vea levimisviisi iga matemaatilise põhitehte rakendamisel. Toome allpool lühidalt mõned vastavad juhised.

Liitmisel teeb ka üks ebaõige number mõnes veerus ebaõigeks kogu veeru tulemuse. Seetõttu tuleb kõik ebaõiged väiksemad kümnendkohad kõigis liidetavais ümardada. Seesama kehtib ka lahutamise kohta.

Näiteks 12,7 ja 3,529 liitmisel pole mõtet arvestada teises liidetavas kaht viimast kohta, sest esimeses liidetavas need kohad puuduvad. Järelikult $12{,}7 + 3{,}529 = 12{,}7 + 3{,}5 = 16{,}2$. Samuti $3{,}17 - 0{,}0278 = 3{,}17 - 0{,}03 = 3{,}14$.

Üldse peame meeles, et summas ei saa olla rohkem õigeid kümnendkohti, kui neid on kõige väiksema kümnendkohtade arvuga liidetavas. Analoogiline reegel kehtib ka lahutamise kohta.

Korrutamisel ja jagamisel ei ole tulemuse õigete kohtade arv suurem kõige väiksema täpsusega antud andme õigete kohtade arvust.

Näiteks 5,0276 ja 0,3 korrutamisel ei saa korrutise 1,50828 täpsus olla suurem teguri 0,3 täpsusest. Seega on mõtet võtta korrutisena ainult 1,5, sest ülejäänud kümnendkohad (0828) pole enam õiged.

Samuti piirdume 0,8 jagamisel 2,35-ga jagatises ainult kümnendikega, sest neile järgnevad kümnendkohad ei ole enam õiged.

Korrutamisel ja jagamisel võrdub tulemuse relatiivne viga andmete (tegurid, jagatav, jagaja) relatiivsete vigade summaga. Astme relatiivse vea saamiseks tuleb astmealuse relatiivne viga korrutada astendajaga.

Kui näiteks põranda pikkus on 4,35 m ja laius 3,18 m, siis saame neist andmeist arvutada põranda pindala relatiivse veaga

$$\frac{1}{318} + \frac{1}{435} = \frac{435 + 318}{318 \cdot 435} \approx 0{,}005.$$

Sellise täpsuse saavutamiseks on küllalt, kui võtta korrutises

vasakult paremale lugedes kolm õiget kohta, s. o. $4{,}35 \cdot 3{,}18 = 13{,}8$ m^2. Saadud tulemusest nähtub, et korrutise relatiivne viga on käesoleval juhul väiksem kui 1%.

17. INTERPOLATSIOON

Seos argumendi ja funktsiooni vahel võib olla väga mitmesugune, näiteks $s = vt$; $y = a \sin \alpha$; $m = n^x$; $y = \log N$ jne. Kui argumendi väärtus on antud, siis, kasutades funktsionaalset seost, võime arvutada ka sellele vastava funktsiooni väärtuse.

Arvutuspraktikas kasutatakse lihtsustamise otstarbel funktsiooni väärtuste saamiseks sageli nn. interpolatsioonivõtet. Interpoleerimine tähendab mõnele argumendile vastava funktsiooni väärtuse leidmist sellest argumendist suuremate ja väiksemate argumentide funktsioonide väärtuste abil. Näiteks kui teame, et $\sqrt{2} = 1{,}414$ ja $\sqrt{3} = 1{,}732$, siis $\sqrt{2{,}5}$ ligikaudse väärtuse saamiseks oletame, et funktsioon $\sqrt{N}$ muutub $\sqrt{2}$ ja $\sqrt{3}$ vahemikus võrdeliselt argumendiga. Argumendi muutusele $3 - 2 = 1$ võrra vastab funktsiooni muutus $1{,}732 - 1{,}414 = 0{,}318$ võrra; argumendi muutusele $2{,}5 - 2 = 0{,}5$ võrra vastaks sel puhul funktsiooni muutus $0{,}5 \cdot 0{,}318$ võrra. Järelikult peaks $\sqrt{2{,}5}$ väärtus olema $1{,}414 + 0{,}159 = 1{,}573$. Saadud tulemus erineb $\sqrt{2{,}5}$ õigest väärtusest 1,581 ainult 0,5 % võrra.

Samuti: kui teame, et küllastatud veeauru rõhk 15° C puhul on 12,79 ja 16° C puhul 13,64 mm Hg (torri), siis küllastatud veeauru rõhu määramiseks 15,4° C puhul toimime järgmiselt. Eeldame, et veeauru rõhk muutub 15° C ja 16° C vahel võrdeliselt temperatuuriga. Siis vastab temperatuuri muutusele 1° C võrra rõhu muutus $13{,}64 - 12{,}79 = 0{,}85$ mm Hg võrra ja temperatuuri muutusele 0,4° võrra rõhu muutus $0{,}4 \cdot 0{,}85 = 0{,}34$ mm Hg võrra. Järelikult on otsitav rõhk $12{,}79 + 0{,}34 = 13{,}13$, mis ainult 0,01 võrra erineb vastavatest tabeliandmetest.

Samasugust nn. lineaarset interpolatsiooni kasutame ka arvu logaritmi määramisel *Partes proportionales*'e abil, kaalumisel kaaluosuti nulltäpi määramisel jne. Interpolatsiooni teel saadud funktsiooni väärtus on seda õigem, mida kitsam on argumendi väärtuste vahemik, milles interpolatsioon toimub. Üldiselt tuleb hoiduda ekstrapoleerimisest, s. o. funktsiooni väärtuste leidmisest väljaspool tuntud argumentide vahemikku.

18. VÕTTEID ARVUTAMISE LIHTSUSTAMISEKS

Kui osa lähteandmeid on õige väikesed suurused (tähistame neid α, β, γ, ...), siis on arvutamise hõlbustamiseks sageli kasulik rakendada järgmisi ligikaudse arvutamise valemeid:

1) Otsese korrutamise teel saame:

$$(1+\alpha)(1+\beta) = 1+\alpha+\beta+\alpha\beta,$$

millest

$$(1+\alpha)(1+\beta) \approx 1+\alpha+\beta, \tag{1}$$

sest me võime korrutise $\alpha\beta$ kui väga väikese liidetava ilma tunduva veata hoopis ära jätta.

Näiteks $1{,}03 \cdot 1{,}02 = (1+0{,}03)(1+0{,}02) \approx 1+0{,}03+0{,}02 = 1{,}05$. Korrutise absoluutse vea ülemmäär on sel juhul $\alpha\beta = 0{,}03 \cdot 0{,}02 = 0{,}0006$ ja relatiivne viga $\delta = 0{,}0006 : 1{,}05 = 0{,}6‰$.

2) Samuti

$$(1+\alpha)(1-\beta) \approx 1+\alpha-\beta, \tag{2}$$

$$(1-\alpha)(1-\beta) \approx 1-\alpha-\beta. \tag{3}$$

Näiteks $1{,}04 \cdot 0{,}98 = (1+0{,}04)(1-0{,}02) \approx 1+0{,}04-0{,}02 = 1{,}02$; $0{,}97 \cdot 0{,}98 = (1-0{,}03)(1-0{,}02) \approx 0{,}95$.

3) Analoogiliselt eelmistega, ära jättes liikmed, kus α esineb teises või veelgi kõrgemas astmes, saame järgmised ligikaudsed võrdused:

$$(1 \pm \alpha)^2 \approx 1 \pm 2\alpha, \tag{4}$$

$$(1 \pm \alpha)^3 \approx 1 \pm 3\alpha, \tag{5}$$

üldiselt

$$(1 \pm \alpha)^n \approx 1 \pm n\alpha. \tag{6}$$

Kui näiteks kuubi serva pikkus on 0,99 cm, siis selle kuubi ruumala $(1-0{,}01)^3 \approx 1-3 \cdot 0{,}01 = 0{,}97$ cm³.

4) Tähistame valemis $(1 \pm \alpha)^2 \approx 1 \pm 2\alpha$ suuruse 2α tähega β; siis $\alpha = \frac{\beta}{2}$ ning

$$\left(1 \pm \frac{\beta}{2}\right)^2 \approx 1 \pm \beta,$$

millest

$$\sqrt{1 \pm \beta} \approx 1 \pm \frac{\beta}{2}. \tag{7}$$

Analoogiliselt saame:

$$\sqrt[3]{1 \pm \beta} \approx 1 \pm \frac{\beta}{3} \tag{8}$$

ning üldjuhul

$$\sqrt[n]{1 \pm \beta} \approx 1 \pm \frac{\beta}{n}. \tag{9}$$

Näiteks

$$\sqrt[3]{1{,}006} = \sqrt[3]{1 + 0{,}006} \approx 1 + \frac{0{,}006}{3} = 1 + 0{,}002 = 1{,}002.$$

5) Lõpuks peame meeles, et

$$\frac{1+\alpha}{1+\beta} \approx 1 + \alpha - \beta, \tag{10}$$

Tõepoolest,

$$\frac{1+\alpha}{1+\beta} = \frac{(1+\alpha)(1-\beta)}{(1+\beta)(1-\beta)} = \frac{1+\alpha-\beta-\alpha\beta}{1-\beta^2} \approx 1 + \alpha - \beta,$$

sest $\alpha\beta$ ja β^2 võrduvad praktiliselt nulliga. Valem (10) on kehtiv nii positiivse kui ka negatiivse α ja β puhul.

Kui $\alpha = 0$, järeldub valemist (10):

$$\frac{1}{1+\beta} \approx 1 - \beta, \tag{11}$$

$$\frac{1}{1-\beta} \approx 1 + \beta. \tag{12}$$

19. TULEMUSE VEA ARVUTAMINE ÜLDISEL JUHUL

Veaga mõõdetud suurustest tuleb tihti arvutada uusi suurusi, mis saadakse samuti teatava veaga. Arvutatava suuruse viga tuleb arvutada mõõdetud suuruste vigadest.

Oletame, et meil on vaja arvutada suurus F ja tema viga, mis on mõõdetud suuruste x, u, v funktsioon. Mõõdetud suuruste vead olgu tähistatud vastavalt Δx, Δu ja Δv. Kui vead on mõõdetud suurustega võrreldes väikesed ja kohal x, u, v funktsioon F on pidev ning lõplik, võime teda a r e n d a d a r i t t a ja piirduda esimese kahe liikmega, sest meid huvitab ainult vea suurusjärk:

$$F(x + \Delta x; u + \Delta u; v + \Delta v) = F(x, u, v) + \frac{dF}{dx}\Delta x + \frac{dF}{du}\Delta u +$$

$$+ \frac{dF}{dv}\Delta v = F + \Delta F. \tag{1}$$

Võrrandi paremal poolel tähendab $F(x, u, v)$ meie suuruse

väärtust, mis on arvutatud aritmeetilistest keskväärtustest x, u, v, ja ülejäänud osa annabki arvutatava suuruse vea:

$$\Delta F = \frac{dF}{dx}\Delta x + \frac{dF}{du}\Delta u + \frac{dF}{dv}\Delta v. \qquad (2)$$

Δx, Δu, Δv võivad siin olla nii positiivsed kui ka negatiivsed. Samuti võivad ka osatuletised olla nii positiivsed kui negatiivsed. Vea arvutamisel peame arvestama halvimat juhtu, s. o. juhtu, kus kõigi osatuletiste korrutised argumendi kasvuga on positiivsed:

$$\Delta F = \left|\frac{dF}{dx}\right| \cdot |\Delta x| + \left|\frac{dF}{du}\right| \cdot |\Delta u| + \left|\frac{dF}{dv}\right| \cdot |\Delta v|. \qquad (2a)$$

Selgitame selle valemi rakendamist ühe näitega. Olgu meil ülesandeks sumbuva võnkumise summutusteguri γ määramine. Lähtume logaritmilise dekremendi valemist

$$\frac{s_1}{s_2} = e^{\gamma T} = e^{\Lambda} \text{ ehk } \gamma = \frac{1}{T}\ln\frac{s_1}{s_2}, \qquad (3)$$

kus s_1 ja s_2 on kaks teineteisele järgnevat amplituudi, Λ — logaritmiline dekrement, T — sumbuva võnkumise omaperiood, e — naturaallogaritmide alus. Viimast võime leida tabelitest väga suure täpsusega, nii et tema vea loeme nulliks. γ määramiseks peame mõõtma s_1, s_2 ja T. Olgu nende mõõtmiste vead vastavalt ΔT ja Δs (amplituudide mõõtmise vead on ühesugused). Siis võime võrrandite (2) ja (3) alusel kirjutada:

$$\Delta\gamma' = -\frac{\ln\frac{s_1}{s_2}}{T^2}\Delta T + \frac{1}{T\frac{s_1}{s_2}s_2}\Delta s_1 - \frac{s_1}{T\frac{s_1}{s_2}s_2^2}\Delta s_2.$$

See on γ kasv, kui ΔT ja Δs on positiivsed. Me peame aga arvestama halvimat juhtu, kus kõik liikmed on positiivsed, s. o. peame rakendama võrrandit (2a):

$$\Delta\gamma = \frac{\ln\frac{s_1}{s_2}}{T^2}\Delta T + \frac{1}{Ts_1}\Delta s_1 + \frac{1}{Ts_2}\Delta s_2.$$

Lisamärkus näite juurde:

Kui γ on väike, siis on väike ka amplituudi muutus. Sel juhul võiksime rakendada (ja mõnikord on see mõõdapääsmatu) täpsemat meetodit γ määramiseks.

Kirjutame:

$$\left.\begin{aligned} \frac{s_1}{s_2} &= e^{\gamma T} \\ \frac{s_2}{s_3} &= e^{\gamma T} \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots\cdots \\ \frac{s_n}{s_{n+1}} &= e^{\gamma T} \end{aligned}\right\} \; n \text{ võrrandit}$$

Korrutades need võrrandid omavahel, näeme, et kõik s-id peale s_1 ja s_{n+1} taanduvad välja. Tulemuseks on

$$\frac{s_1}{s_{n+1}} = e^{n\gamma T} \text{ ehk } \gamma = \frac{1}{nT} \ln \frac{s_1}{s_{n+1}}.$$

Et $\Delta n = 0$ (loendamise viga), siis

$$\Delta\gamma_n = \frac{\ln \frac{s_1}{s_{n+1}}}{nT^2} \Delta T + \frac{1}{nTs_1} \Delta s_1 + \frac{1}{nTs_{n+1}} \Delta s_{n+1}.$$

Siit näeme, et kui $s_1 \approx s_{n+1}$, siis $\Delta\gamma_n \approx \frac{\Delta\gamma}{n}$, s. o. määramise viga on n korda väiksem. See tähendab, et me võime mõõtmise sama täpsuse juures saavutada n korda suurema täpsuse, kui mõõdame mitte kaht naaberamplituudi, vaid esimest ja $(n+1)$-ndat amplituudi.

Mõõtmistel on väga sageli võimalik leida sellist olukorda või metoodikat, mis vähendab viga mitmekordselt. Sellest seisukohast tulebki lähtuda mõõtmisviisi valikul.

20. ÜLDISI JUHISEID JA NÕUANDEID TÖÖDE SOORITAMISEKS

Tuleb alati meeles pidada, et kõik aparaadid ja mõõteriistad nõuavad ettevaatlikku ja hoolsat käsitsemist. See, et riist on valmistatud terasest või valgevasest, ei tähenda veel, et ta on väga tugev. Ettevaatamatul käsitsemisel ta võib-olla ei lähe kohe katki ega paindu märgatavalt, kuid muutub siiski tarvitamiskõlbmatuks. Seepärast ei tohi riista ükskõik kust kinni võtta. Mõned osad riknevad juba puudutamisel, nagu näiteks sfäromeetri kruvi pind. Ka kõiki kruvisid ei tohi lahti keerata. Kui mõni reguleerimiskruvi on lahti keeratud, tuleb riist uuesti reguleerida, mis tihti nõuab palju aega, head oskust ja keerukate aparaatide abi, mida ei ole iga kord käepärast.

Enne riistaga tööle asumist tuleb vastava juhise alusel hoolikalt ja tähelepanelikult tutvuda tema ehitusega ja töötamise põhi-

mõtetega. Tuleb endale selgeks teha, kust võib riista kinni hoida, missuguste osade puudutamisest on vaja eriti hoiduda jne. Kui pole selge riista kõikide osade töötamise põhimõte ja otstarve, tuleb seda küsida praktikumi juhendajalt. Kui riista on küllalt silmitsetud ja kui ollakse täiesti kindel tema üksikosade töös, võib ettevaatlikult proovida mõnd osa liigutada või keerata, et veenduda selles, kas juhise näpunäidetest on õigesti aru saadud. Kui riist tõrgub, ei tohi kohe jõudu tarvitada — siin on vaja oskust, mitte jõudu. Tarbe korral tuleb pöörduda praktikumi juhendaja poole.

Tööd alustades veendutakse, et kõik tööks vajalikud riistad ja abinõud on olemas, et töölaud on puhas ja kuiv ning et laual ei ole kõrvalisi esemeid.

Töö käigus tehtavate märkmete jaoks on vajalik erivihik. Sellesse vihikusse protokollitakse kõik vaatlusandmed ja selles teostatakse kõik vajalikud arvutused.

Kõige tähtsamaks osaks on siin vaatluse protokoll. Tuleb meeles pidada, et protokolli kantakse o t s e s e l t s a a d u d l u g e m i d, m i t t e a g a a r v u t a t u d v ä ä r t u s e d. Parandusi ei tohi siin loomulikult olla. Kui osutub, et lugemid olid siiski valed, ei kustutata neid kummiga, vaid tõmmatakse nendele kriips peale, et vajaduse korral saaks neid alati restaureerida. Õiged arvud kirjutatakse nendest kas üles- või allapoole.

Töö kirjelduses on tavaliselt antud ka protokolli vorm, enamasti tabeli näol. Vaatlusprotokolli puhul ei või olla «mustandit» ega «puhtandit», vaid see on ainukordne dokument, sest kui me protokollist «puhtandi» teeme, siis on see juba koopia, millesse võib sattuda ümberkirjutusvigu ja muid moonutusi. Vaatlusprotokolli koostamist tuleb õppida — see on tõsine ja vastutusrikas ülesanne. Tehaste laboratooriumides ja muudes asutustes on olemas protokollide raamatud, kuhu kantakse sisse kõikide laboratooriumis tehtavate mõõtmiste ja vaatluste tulemused ja kust neid andmeid võib vajaduse korral leida veel aastakümneid hiljem.

Protokollile peavad järgnema arvutused koos kõikide arvutustehetega ja valemitega, millede alusel on saadud lõpptulemused.

II. MEHAANIKA

21. PIKKUSE MÕÕTMINE

Pikkuse mõõtmisel võrreldakse mõõdetavat pikkust pikkusühikuga (cm, m jt.). Selleks kasutatakse mitmesuguseid riistu, nagu mõõtjoonlat (mõõtpuud), -paela ja -ahelat, varbsirklit, mikromeetrit jne.

Mõõtmine ise toimub harilikult nõnda, et seame mõõdu nullkriipsu kohakuti mõõdetava pikkuse ühe otsaga ja vaatame, missuguse kriipsu kohale või missuguste kriipsude vahele langeb mõõdetava pikkuse teine ots.

Olgu näiteks raamatu lehekülje pikkuse mõõtmisel sentimeetrites mõõdu nullkriips paigutatud lehe ühele äärele ja asetsegu teine äär 21 ja 22 cm kriipsude vahel; siis ütleme, et raamatu lehekülje pikkus on 21 cm. Kui tahame lehekülje pikkust teada täpsemalt, siis võtame kasutusele sentimeetri kümnendikosad — millimeetrid, kui need mõõdu skaalal ehk astmikul on olemas, ja loendame otseselt silmaga nende arvu täissentimeetritest (21 cm) üle ulatuvas osas. Olgu neid näiteks 6. Siis on lehekülje pikkus 21,6 cm ehk 216 mm.

Kui mõõdetava eseme ääred on küllalt teravad, siis on lihtne mõõdult otseselt silmaga võtta lugem sentimeetrites või millimeetrites täpsusega kuni 0,5 cm või 0,5 mm.

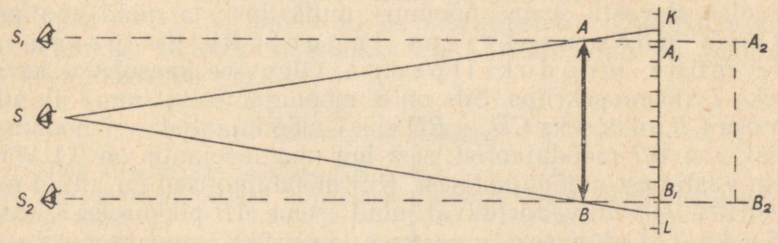
Vähese harjutamise tulemusena võime cm-skaalaga mõõtes kaunis õigesti hinnata ka kümnendiksentimeetrite arvu. Samuti ei ole raske hinnata palja silmaga otseselt kümnendikmillimeetrite arvu lugemis. Suuremat täpsust palja silmaga vaatlemine ei võimalda.

Kui mõõdu nullkriips pole küllalt terav, siis on otstarbekohane kasutada selle asemel mõnda teist kriipsu, näiteks kümnendat, muidugi arvestades seda asjaolu lugemi suuruse määramisel.

1. Joonestada paberile mõned juhusliku pikkusega lõigud ja harjutada nende pikkuse mõõtmist cm-skaalaga (ilma mm-jaotisteta), täpsusega 0,1 cm! Kontrollida saadud tulemusi teise mõõduga, millel on antud ka mm-jaotised!
2. Õppida mm-skaala abil mõõtes palja silmaga õigesti hindama kümnendikmillimeetrite arvu!

22. PARALLAKTILINE VIGA

Kui mõõdetav ese või vahemik pole otseses kokkupuutes mõõdu skaalaga, vaid me silmaga n.-ö. projekteerime eseme mõõdu skaalale, siis oleneb lugemi suurus silma asendist (joon. 2). Asendis



Joon. 2. Parallaktiline viga.

S näiteks saame mõõdetava eseme AB pikkuseks skaalal KL, mis on suurem eseme tõelisest pikkusest $AB = A_1B_1$. Sellisest nn. parallaktilisest veast hoidumiseks tuleb vaadelda nõnda, et vaatesihid (S_1A ja S_2B) oleksid risti mõõdu skaalaga, sest siis $AB = A_1B_1$.

Parallaktilise vea vältimiseks kasutatakse sageli peegelskaalat. Sel puhul vaadeldakse nõnda, et silm asetseks sirgel, mis läbib eseme otspunkti (A) ja tema kujutist peegelskaalal (A_2), sest on teada, et valguspunkti kujutis tasandpeeglis asetseb ristjoonel, mis on tõmmatud sellest valguspunktist tasandpeeglile.

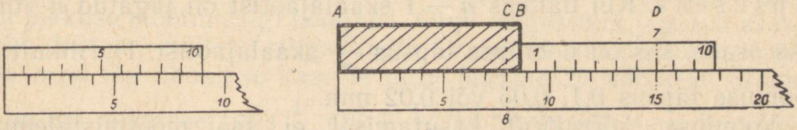
Jooniselt 2 nähtub ühtlasi, et parallaktilise vea võimalus on seda suurem, mida kaugemal asetseb mõõdetav ese skaalast. Seepärast on tarvilik, et mõõdu skaala oleks võimalikult otseses kokkupuutes mõõdetava eseme või vahemikuga.

Kuidas mõjustab parallaktiline viga õige kellaaja määramist näiteks tornikella numbrilaualt?

23. NOONIUS

Mõõtarvu murrulise osa, näiteks kümnendike määramiseks kasutatakse pikkuse mõõtmisel sageli erilist seadist, nn. nooniust, mille ehitus ja kasutamine selguvad jooniselt 3.

Siin on nooniuseks mõõdu skaalaga ühendatud abiskaala, mille



Joon. 3. Noonius ja selle kasutamine.

10 jaotist võrduvad mõõdu 9 jaotisega. Millimeetri kümnendikosade arvu saamiseks lugemis on nooniusel 9 mm jagatud kümneks võrdseks osaks. Seega on nooniuse iga jaotis ehk kriipsuvahe 0,1 mm võrra lühem kui 1 mm.

Kui tahame nooniuse abil määrata eseme AB pikkust (joon. 3), siis seame eseme otsa A kohakuti mõõdu nullkriipsuga. Eseme teise otsa B vastu seame nooniuse nullkriipsu ja nüüd vaatame, mitmes nooniusekriips langeb kõige paremini ühte mõne mõõdukriipsuga. Olgu see käesoleval korral näiteks 7. nooniusekriips. Siis on 8. mõõdujaotisest (mm) üle ulatuva osa CB pikkuseks $CD - BD$ ehk 7 mõõdujaotist — 7 nooniusejaotist, s. o. 0,7 mõõdujaotist, sest iga nooniusejaotis on 0,1 võrra lühem vastavast mõõdujaotisest. Kui mõõdujaotised on antud millimeetrites, siis on vaadeldaval juhul eseme AB pikkuseks 8,7 mm.

Seda liiki nooniuse kasutamisel saame eseme pikkusele vastava mõõtarvu murrulises osas nii mitu kümnendikku, kui mitmes nooniusekriips langeb kõige täpsemalt ühte mingi mõõdukriipsuga.

Üldjuhul: kui $n - 1$ skaalajaotist on jagatud nooniusel n võrdseks osaks ja nooniuse m-s kriips langeb kõige paremini ühte mõne skaalakriipsuga, siis on lugemi murruline osa $\frac{m}{n}$, sest

$$m - \frac{(n-1) \cdot m}{n} = \frac{m}{n}.$$

Kui näiteks mõõdu skaala 39 mm on jaotatud nooniusel 20 võrdseks osaks, siis nooniuse 1 jaotis $= \frac{39}{20}$ mm $= \left(2 - \frac{1}{20}\right)$ mm, s. o. nooniuse 1 jaotis on $\frac{1}{20}$ mm võrra lühem kui 2 mm. Ühtugu nooniuse n-s kriips kõige paremini mõne mm-jaotiste kriipsuga skaalal. Siis nooniuse skaala pikkus nullist alates kuni kriipsuni n on $n\left(2 - \frac{1}{20}\right)$ mm $= \left(2n - \frac{n}{20}\right)$ mm. Siit nähtub, et mõõdetava eseme täismillimeetritest üle ulatuva osa pikkus on $\frac{n}{20}$ ehk $\frac{5n}{100}$ mm.

Sellise nooniuse eeliseks on tema jaotiste suurus, mis hõlbustab kriipsude ühtelangemise jälgimist.

Arvu, mis näitab, missuguseid skaala kõige väiksemate jaotiste osi saab nooniuse abil veel eristada, nimetatakse selle nooniuse täpsuseks. Kui näiteks $n - 1$ skaalajaotist on jagatud n võrdseks osaks, siis on nooniuse täpsus $\frac{1}{n}$ skaalajaotist. Harilikult on nooniuse täpsus 0,1, 0,05 või 0,02 mm.

Nooniuse korralikul kasutamisel ei saa mõõtmistulemuse absoluutne viga olla suurem kui pool nooniuse täpsust.

Selle põhjuseks on asjaolu, et skaala ja nooniuse kriipsude ühtelangemise hindamisel ei saa viga ületada poolt jaotist.

Et nooniused võivad olla väga mitmesugused, siis tuleb enne nooniuse kasutamist alati selgusele jõuda:

1) missugused on silmaga otseselt loendatavad kõige väiksemad jaotised mõõdu skaalal (1 mm, 0,5 mm jne.);

2) mitu jaotist on nooniusel ja missugustes mõõtühiku osades (kümnendikes, kolmekümnendikes jne.) võimaldab ta määrata mõõtarvu murrulise osa.

Täiendavaid küsimusi

1. Mida nimetatakse nooniuse täpsuseks?
2. Missugune on eespool kirjeldatud nooniuste täpsus ja mõõtmistulemuse absoluutne viga?
3. Kui suurt täpsust võimaldab saavutada noonius, millel 19 mõõdujaotist on jagatud 20 võrdseks osaks?
4. Skaala 24 poolemillimeetrist jaotist (12 mm) on nooniusel jagatud 25 võrdseks osaks. Missugune on selle nooniuse täpsus?
5. Kuidas rakendada nooniust, millel 11 mõõdujaotist on jagatud 10 võrdseks osaks?
6. Pikkuse mõõtmisel nooniusega, mille täpsus on 0,02 mm, saadi tulemuseks 10,12 mm. Missugune on selle mõõtmistulemuse absoluutse vea ülemmäär ja relatiivne viga?

24. NURGA MÕÕTMINE

a) Nooniuse kasutamine nurga mõõtmisel. Nurki mõõdetakse kraadides, minutites ja sekundites. Üks nurgakraad on $^1/_{360}$ täispöördest, minut $^1/_{60}$ kraadist ja sekund $^1/_{60}$ minutist, lühidalt $1° = 60'$, $1' = 60''$.

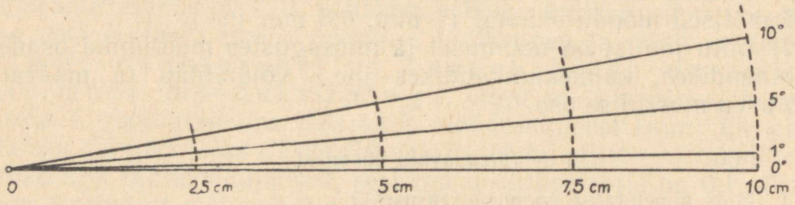
Et täispöördele vastab ringjoon, siis jagatakse ringjoon nagu täispööregi 360 kaarekraadiks, üks kaarekraad 60 kaareminutiks ja üks kaareminut 60 kaaresekundiks.

Et kesk- ehk tsentraalnurgad on võrdelised neile vastavate kaartega, siis tegelikult toimub nurga mõõtmine nurkadele vastavate kaarte võrdlemise abil, mis võimaldab rakendada nurga mõõtmisel pikkuse mõõtmise meetodeid.

Kui kaar on võetud küllalt suure raadiusega (vähemalt 3 cm), siis on võimalik palja silmaga veel selgesti eristada üksikuid kaarekraade, kuna nende kümnendikosade arvestamine tekitab juba tunduvaid raskusi. Mida suurem on kaare raadius, seda täpsemalt saab kaare abil hinnata nurga suurust (joon. 4).

Suurema täpsuse saavutamiseks kasutatakse kaare mõõtmisel nagu pikkuse mõõtmiselgi nooniust. Olgu ringastmik jagatud kraadideks. Võtame näiteks ringastmiku kaarel 19 kraadijaotist, kanname need üle nooniuse kaarele ning jagame 20 võrdseks osaks. Siis on iga nooniusejaotis $\frac{1°}{20}$ ehk $3'$ võrra lühem põhiastmiku ühest jaotisest, mis on $1°$. Lühidalt: selle nooniuse täpsus on $3'$.

Nurga mõõtmisel loeme täiskraadide arvu otseselt ringastmikult. Kraadi murrulise osa (viimasest täiskraadi kriipsust kuni nooniuse nullkriipsuni) saame sel teel, et märgime nooniusel selle kriipsu, mis ringastmiku kriipsuga kõige paremini ühte langeb.



Joon. 4. Kaare pikkuse olenevus raadiusest.

Olgu see näiteks 12. kriips. Et meie nooniuse iga kriipsuvahe on 3′ võrra lühem ühest kaarekraadist, siis on otsitav murruline osa $12 \cdot 3'$ ehk 36′.

Kui aga ringastmik on nii suure raadiusega, et me palja silmaga saame vabalt ära lugeda kaarekraadi kolmandikud (20′), ja kui nooniusel on 39 kaarekraadi kolmandikku jagatud 40 võrdseks osaks, siis sellise nooniusega saame kaare mõõtmisel lugemid täpsusega kuni $\frac{1}{40} \cdot 20'$ ehk $\frac{1'}{2}$. Tõepoolest: 1 nooniuse jaotis (kriipsuvahe) on $\frac{39}{40}$ ringastmiku kõige väiksemast jaotisest, milleks on aga $\frac{1°}{3}$ ehk 20′. Tähendab, üks nooniuse jaotis on ühest ringastmiku jaotisest väiksem $\frac{1}{40}$ ringastmiku jaotise ehk $\left(\frac{1}{40} \cdot 20\right)' = \frac{1'}{2}$ võrra. Kui sellise nooniuse 35. jaotuskriips langeb kõige paremini ühte ringastmiku mõne jaotuskriipsuga, siis on astmiku viimasest täiskriipsust üle ulatuv lugemiosa $(35 \cdot {}^1/_2)'$ ehk 17′30″.

Siin tuleb alati silmas pidada seda, et ringastmiku täisjaotiste arvu tuleb vaadata otseselt, kuna täisjaotisest nooniuse nullkriipsuni ulatuva osa saame nooniuse abil.

Kuigi füüsikas kasutatakse nurkade mõõtmiseks peamiselt radiaane (1 radiaan = 57,3°), toimub nurkade tegelik mõõtmine harilikult siiski kraadisüsteemi alusel.

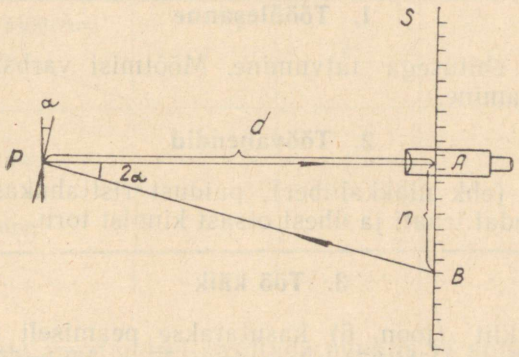
Viimasel ajal kasutatakse nurga mõõtühikuna kraadi asemel ka 0,01 osa täisnurgast. Selle nurgaühiku nimetuseks on g o n (tähis g), vahel ka u u s k r a a d. Seega 90° = 100g.

b) N u r k a d e m õ õ t m i n e p e e g l i j a s k a a l a g a. Väikeste pöördenurkade mõõtmiseks kasutatakse pöörduva keha külge kinnitatud tasandpeeglit, mille peegeldav pind on paralleelne pöördeteljega. Peegli pöördumisel muutub peegeldunud kiire suund

peegli kahekordse pöördenurga võrra. Kiire suuna muutuse mõõtmiseks kasutatakse mm-jaotistega skaalat. Teades skaala kaugust peeglist ja mõõtes valguskiire asendi muutuse skaalal, saame arvutada peegli pöördenurga.

Subjektiivne meetod pöördenurga mõõtmiseks. Mõõtmiseks kasutatakse peeglist 2—3 m kaugusele üles seatud skaalat ja niitristiga pikksilma. Pikksilma vaatesuund seatakse risti skaalaga ja pikksilm suunatakse peeglile nii, et temas oleksid näha peegeldunud skaala jaotised. Skaalat valgustatakse tugevasti, et ta oleks paremini nähtav. Skaala kujutise kergemaks leidmiseks pikksilmas otsime esiteks palja silmaga silma lähedal hoitava hõõglambi kujutise ja suuname pikksilma sellele. Teravustame niitristi okulaari välimist läätse nihutades ja okulaari tervikuna nihutades teravustame pikksilma peeglile. Siis lähendame okulaari objektiivile, kuni näeme teravalt mõnd skaala vertikaaltasandis asuvat peegeldunud eset. Skaala ja pikksilma vertikaaltasandis nihutamisega saavutame lõpuks olukorra, kus pikksilmas on näha peegeldunud skaala jaotised. Edasi reguleerime pikksilma ja skaala asukoha peegli suhtes nii, et pikksilma vertikaalniit ühtub peegeldunud skaala keskmise jaotisega. See on skaala nullseis mõõtmistel.

Kui skaala S kaugus peeglist P on $AP = d$ cm ja peegli pöör-



Joon. 5. Nurkade mõõtmine pöörduva peegliga.

dumisel nurga α võrra peegeldub skaalalt pikksilma jaotis B, mille kaugus keskmisest jaotisest A on n cm (joon. 5), siis

$$\tan 2\alpha = \frac{n}{d}.$$

Väikeste nurkade puhul võime tangensi asendada nurgaga ja kirjutada

$$\alpha = \frac{n}{2d},$$

kus α on mõõdetud radiaanides. Arvestades, et 2π rd $= 360°$, leiame

nurga suuruse kraadides järgmiselt:

$$\alpha^\circ = \frac{n}{d}\,\frac{90}{\pi}.$$

Suuremate nurkade puhul kasutame seost

$$\alpha^\circ = 28{,}648 \arctan\frac{n}{d} = 28{,}648\,\frac{n}{d}\left[1 - \frac{1}{3}\left(\frac{n}{d}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{n}{d}\right)^4 - \cdots\right].$$

Objektiivne meetod pöördenurga mõõtmiseks. Selle meetodi puhul juhitakse teravapiirdelisest valgusallikast (pilu, sirge niidiga hõõglamp, niitrist valgusallika ees) tulev valgus peeglile, kust ta peegeldub skaalale. Skaala tuleb seada risti valgusallikat ja peeglit ühendava sirgega. Terava kujutise saamiseks skaalal juhitakse valguskiir läbi kumerläätse või kasutatakse nõguspeeglit. Peegli pöördenurga arvutamiseks on kasutatavad eelmise meetodi puhul tuletatud valemid.

Objektiivne meetod on lihtsam, kuid subjektiivsest meetodist väiksema täpsusega. Praktikumis kasutatakse kirjeldatud meetodeid peamiselt peegelgalvanomeetrite hälvete mõõtmiseks.

25. MÕÕTMISI VARBSIRKLIGA

1. Tööülesanne

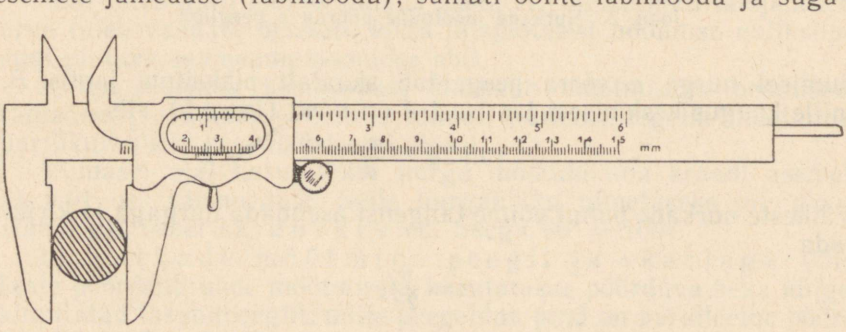
Varbsirkli ehitusega tutvumine. Mõõtmisi varbsirkliga. Vea mõiste rakendamine.

2. Töövahendid

Varbsirkel (ehk nihkkaliiber), puidust risttahukas, raudsilinder, tükk jämedat traati ja ühest otsast kinnist toru.

3. Töö käik

a) Varbsirklit (joon. 6) kasutatakse peamiselt ümmarguste esemete jämeduse (läbimõõdu), samuti õõnte läbimõõdu ja süga-



Joon. 6. Varbsirkel.

vuse mõõtmiseks. Varbsirkliks on kahe ristliistuga ehk nn. nokkadega varustatud mõõtastmik.

Kui mõlemad nokad on nihutatud teineteise vastu, siis on nende vahe null ja liikuva osa (lükati) nullkriips langeb ühte skaala nullkriipsuga; kui need kriipsud aga ei ühti, siis tuleb sel juhul lugemi õige väärtuse saamiseks erinevus arvesse võtta.

Kui tahame mõne keha, näiteks toru jämedust (läbimõõtu) määrata, siis asetame selle keha nokkade vahele ja loeme skaalalt otseselt läbimõõdu suuruse. Seejuures tuleb hoolitseda, et nokad mõõdetavat eset liiga lõdvalt ega liiga tugevasti ei suruks. Pidevaks nihutamiseks ja paraja kontakti saamiseks kasutatakse rattakest.

Täpsema lugemi võimaldamiseks on varbsirkli lükati harilikult ühendatud nooniusega. Sel juhul saame varbsirklilt otseselt lugemi täpsusega 0,1 mm või 0,05 mm, olenevalt nooniuse ehitusest.

b) Varbsirkli rakendamiseks lahendada järgmised ülesanded:

1) Määrata varbsirkliga mõne risttahukakujulise keha mõõtmed ja arvutada keha ruumala.

Mõõtmised toimetada täpsusega 0,1 mm. Iga mõõde määrata vähemalt eseme 10 eri kohast. Tulemused märkida tabelisse järgmiselt:

Mõõtmed / Mõõtmised	*a*	*b*	*c*	Ruumala
1. mõõtmine	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
10. mõõtmine	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Keskmine	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .

Keskmiste arvutamisel kasutada punktis 14 antud lihtsustamisvõtteid.

Kui suur on määratud ruumala absoluutne ja relatiivne viga?

Lihtsatel kaaludel määrata mõõdetud risttahuka kaal ja arvutada aine erikaal.

2) Määrata varbsirkliga raudsilindri läbimõõt ja kõrgus täpsusega 0,1 mm. Teha vähemalt 10 mõõtmist, võtta tulemustest aritmeetiline keskmine ja arvutada silindri ruumala.

Kui suur on lõpptulemuse absoluutne ja relatiivne viga?

Lihtsatel kaaludel määrata mõõdetud raudsilindri kaal ja arvutada raua erikaal.

3) Määrata traadi läbimõõt ja õõnsa toru sisemine läbimõõt ning sügavus.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kumb võte annab täpsema tulemuse: kas leida enne üksikute mõõtmete aritmeetiline keskmine ja siis ruumala või ümberpöördult?
2. Milleks kasutatakse joonisel 6 kujutatud varbsirkli paremast otsast välja ulatuvat teravikku ja vasaku otsa ülemisel poolel asuvaid nokkasid?
3. Missugune oli eelmistel mõõtmistel kasutatud varbsirkli täpsus?
4. Nooniusel on $\frac{7}{16}$ tolli jagatud 8 võrdseks osaks. Kui suur on selle nooniuse täpsus tollides?

26. MÕÕTMISI MIKROMEETRIGA

1. Tööülesanne

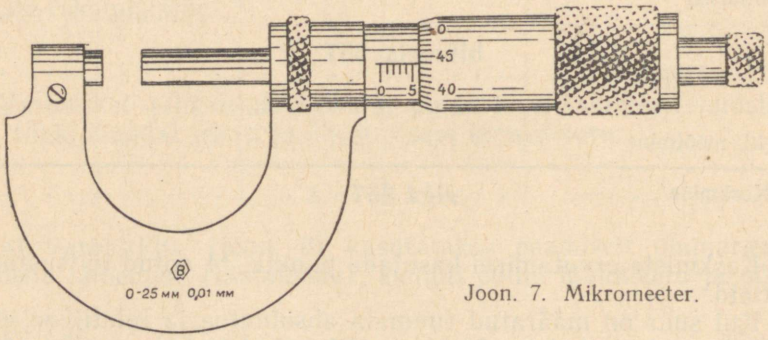
Mikromeetri ehitusega tutvumine. Mõõtmisi mikromeetriga. Traadi pikkuse määramine.

2. Töövahendid

Mikromeeter, mitmesuguses jämeduses traaditükke, traadikera jm.

3. Töö käik

a) Õige väikeste pikkuste (paksuste, jämeduste) mõõtmiseks kasutatakse kruvimikromeetrit ehk lihtsalt mikromeetrit (joon. 7).



Joon. 7. Mikromeeter.

Mikromeetriks on kindlas klambris edasi-tagasi liikuv kruvi. Kui kruvi teeb ühe täispöörde, siis nihkub ta edasi ühe kruvikäigu kõrguse ehk kruvisammu võrra. Olgu kruvikäigu kõrgus näiteks 1 mm. Ühe täispöörde puhul nihkub kruvi siis edasi 1 mm võrra, 0,5 täispöörde puhul 0,5 mm võrra, 0,02 täispöörde puhul 0,02 mm võrra jne.

Täispöörde osade hõlpsamaks jälgimiseks on kruvimikromeeter varustatud erilise trumliga (ringiga), mis on jaotatud harilikult 50 või 100 võrdseks osaks. Täispöörete arvu loeme mikromeetri teljel olevalt astmikult.

Mikromeetrite kruvikäigu kõrgused võivad olla mitmesugused, harilikult on need aga 1 või 0,5 mm. Viimasel juhul viib üks täispööre kruvi otsa edasi ainult 0,5 mm võrra. Sellele vastavalt on trummel jaotatud 50 võrdseks osaks. Pöördumisel 1 jaotise võrra nihkub kruvi järelikult edasi $\frac{1}{50} \cdot 0{,}5 = 0{,}01$ mm võrra. Täis- või poolmillimeetrid nähtuvad otseselt skaalalt, kuna täis- või poolmillimeetrist üle ulatuv osa loetakse trumlilt. Eksituste vältimiseks tuleb enne mikromeetri kasutamist alati selgusele jõuda, kui palju nihkub kruvi edasi pöördumisel ühe astmikul märgitud jaotise võrra.

Enne mõõtmisele asumist tuleb kontrollida, kas nullpunkt on korras, s. o. kas kruvi ja klambri kokkupuutumisel on trumli nullkriips täpselt kohakuti paigalpüsival silindril oleva kriipsuga. Kui see nõnda ei ole, siis tuleb kõik võetud lugemid vastavalt parandada nullpunkti erinevuse võrra.

Mõõtmisel asetame eseme klambri ja liikuva kruvi otsa vahele nõnda, et kruvi ots parajasti puudutaks eset. Täispöörete ja nende osade arv, mis läheb vaja, et viia kruvi ots klambriga kokkupuutest sellesse asendisse, annabki eseme paksuse (jämeduse).

Ühtlase surve saamiseks kruvi otsa kokkupuutumisel mõõdetava esemega tuleb kruvi pöörata tema teises otsas olevast liikuvast peast. Liikuva kruvipea puudumisel tuleb surve ühtlust reguleerida näppude tundlikkuse abil.

b) Mikromeetri rakendamiseks:

1) Määrata paberilehe paksus, juuksekarva jämedus ja traaditükkide keskmine jämedus (läbimõõt), tehes vähemalt 10 mõõtmist eri kohtadest.

2) Määrata mikromeetriga traadi läbimõõt ja lihtsatel kaaludel traadikera raskus ning saadud andmeist ja erikaalust arvutada keras oleva traadi pikkus.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas oleks võimalik tarbe korral mikromeetri nullpunkti reguleerida?
2. Millal tuleb mikromeetri nullpunkti parandus skaalalt võetud lugemiga liita ja millal sellest lahutada?
3. Mida tähendavad joonisel 7 kujutatud mikromeetri alumisele äärele märgitud arvud? Missuguse absoluutse veaga saab mõõta selle mikromeetri abil?
4. Kui saaksime silmaga täpselt hinnata trumli jaotiste kümnendikke, missugust mõõtmistäpsust võimaldaks siis joonisel 7 kujutatud mikromeeter?
5. Vastata järgmistele küsimustele: $10^6\ \mu = ?$ m; 0,05 mm $= ?\ \mu$; $3 \cdot 10^{-4}$ cm $= ?\ \mu$.

27. SFÄROMEETER

1. Tööülesanne

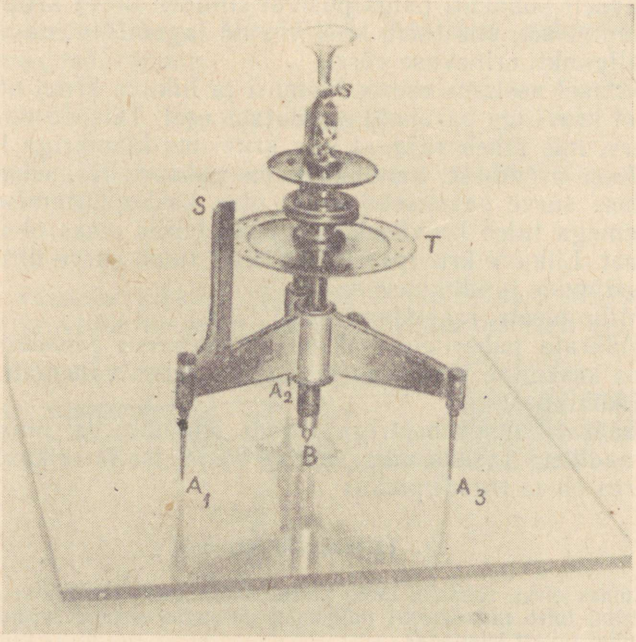
Tutvumine sfäromeetri ehitusega ja sfäromeetri kasutamine plaadi paksuse ning läätse kõverusraadiuse määramiseks.

2. Töövahendid

Sfäromeeter, tasane klaasplaat, mõõdetav klaasplaat, mõõdetav lääts, vahend pikkuse mõõtmiseks 0,1-millimeetrise täpsusega, Na-leek.

3. Töö käik

a) Sfäromeetri peamisteks osadeks on kolm võrdkülgse kolmnurga tippudes asuvat jalga A_1, A_2, A_3 ja kolmnurga keskpunktis asuv mikromeetriline kruvi B, millega on ühendatud ringskaala T. Kruvisamm on $^1/_2$ või 1 mm ja vastavalt sellele on ringskaala T jaotatud 500 või 1000 võrdseks osaks. Seega on



Joon. 8. Sfäromeeter.

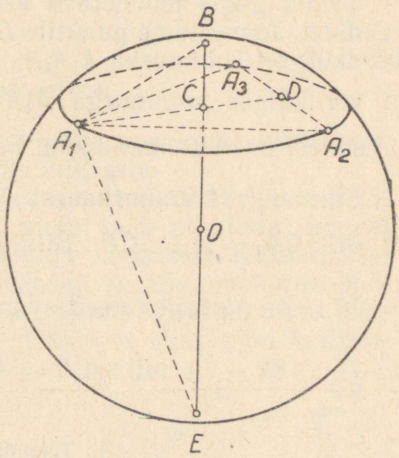
kruviseisu kõrgust võimalik lugeda 0,001-millimeetrise täpsusega. Kruvi täispöörete arvu määramist hõlbustab ringskaalaga risti olev abiskaala S.

Sfäromeetrit kasutatakse õhukeste esemete paksuse täpseks mõõtmiseks.

b) Kruvi nullseisu määramine. Mõõtmiseks asetame sfäromeetri tasasele alusele, näiteks peegliklaasile, mille tasasuses veendume selle järgi, kas tema pinnalt peegeldunud kaugete esemete kujutised on moonutamata või mitte, ja pöörame

kruvi kuni puutumiseni alusega. Puutemomendi määramise otstarbel moodustab mõnede sfäromeetrite kruvi südamiku liikuv pulgake, mille ülemisele otsale toetuv kangisüsteem hakkab puutemomendil liikuma. Sfäromeetri kruvi seis puutemomendil aluspinnaga ongi nullseis, mille loeme abiskaalalt täis- või poolmillimeetrites ning ringskaalalt tuhandikes millimeetrites. Saadud andmed registreerime.

Puutemomendi veel täpsemaks määramiseks pannakse puhtale klaasalusele 1—2 mm paksune lihvitud klaasi killuke. Kui läbi selle killukese vaatame mõne monokromaatse valgusallika (näiteks naatriumileegi) peegeldust, siis näeme interferentspilti: heledaid ja tumedaid triipusid. Interferents tekib kahe klaasi vahel olevas õhukeses õhukihis. Kui sfäromeetri kruvi ots surub klaasikillukese ja alusklaasi vahelise õhukihi kas või kümnendiku mikroni võrra õhemaks, nihkub jalamaid interferentspilt, mille järgi võimegi otsustada kruvi täpse nullseisu üle.



Joon. 9. Kõverusraadiuse määramine sfäromeetriga.

c) Eseme paksuse mõõtmiseks pöörame kruvi üles, asetame mõõdetava eseme alusele sfäromeetri jalgade vahele, viime kruvi otsa kontakti esemega ja registreerime kruvi kõrguse. Viimase lugemi ja null-lugemi vahe annabki otsitava paksuse. Eksituse vältimiseks on soovitatav kruvi täispöörded loendada.

Suurema täpsuse saavutamiseks kordame mõõtmist, määrates uuesti ka nullseisu. Kontrolliks mõõdame sama plaadi paksuse veel varbsirkliga ja mikromeetriga ning kõrvutame tulemused.

d) Läätse kõverusraadiuse määramine. Nimetus sfäromeeter tähendab keramõõtja. Sfäromeetrit kasutataksegi kerapinna, näiteks läätse kõverusraadiuse määramiseks, kui mõõtmiseks on kasutada ainult osa kerapinda.

Mõõtmiseks määrame sfäromeetri nullseisu tasasel plaadil, asetame siis sfäromeetri mõõdetavale kerapinnale ja pöörame kruvi nii, et jalad ja kruvi puudutavad pinda ühtlaselt. Registreerime kruvi asendi. Kahe lugemi vahe annab segmendi kõrguse, mille lõikab kerast jalgade puutepunktidega määratud tasapind. Kõverusraadiuse arvutamiseks peame teadma veel jalgade puutepunktide vahelist kaugust. Selle leiame kõige lihtsamalt, kui surume sfäromeetri jalad paberisse ning mõõdame mm-jaotistega mõõt-

joonlaga või varbsirkliga jälgedevahelised kaugused paberil täpsusega 0,1 mm. Kui kaugused on erinevad, siis võtame neist aritmeetilise keskmise.

Olgu segmendi kõrgus h ja keskmine jalgadevaheline kaugus a; neist andmeist kera raadius

$$R = \frac{h}{2} + \frac{a^2}{6h}.$$

Selle valemi tõestuseks jälgime joonist 9. Olgu A_1, A_2 ja A_3 sfäromeetri jalgade ja B mikromeetrilise kruvi puutepunktid kerapinnal. Siis on $A_1A_2 = A_1A_3 = A_2A_3 = a$ ja B kaugus tasapinnast $A_1A_2A_3$ segmendi kõrgus h.

Tähistagu O mõõdetava kerapinna keskpunkti ja R otsitavat raadiust. Joonestame punktile B vastava läbimõõdu BE, mis lõikab võrdkülgset kolmnurka $A_1A_2A_3$ keskpunktis C. Geomeetriast teame, et võrdkülgse kolmnurga $A_1A_2A_3$ kõrgus $A_1D = {}^1/_2\, a\sqrt{3}$ ja A_1C on sellest kaks kolmandikku. Seega $A_1C = {}^2/_3 \cdot {}^1/_2\, a\sqrt{3} = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

Sarnastest kolmnurkadest $\triangle A_1CE \sim \triangle BCA_1$ võime kirjutada, et $BC : CA_1 = A_1C : CE$. Siin on $BC = h$; $A_1C = \frac{a}{\sqrt{3}}$ ja $CE = 2R - h$. Asetades need suurused võrrandisse, saame $h : \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}} : (2R - h)$, millest $R = \frac{3h^2 + a^2}{6h} = \frac{h}{2} + \frac{a^2}{6h}$.

4. Täiendavaid küsimusi

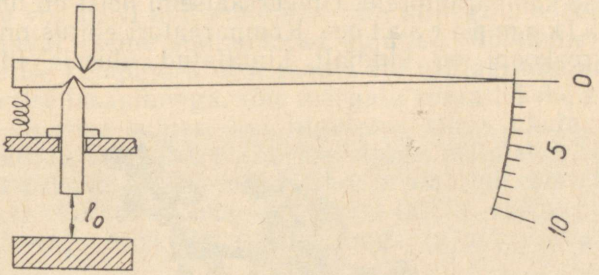
1. Kas sfäromeetriga saab määrata ka nõgusläätse kõverusraadiust?
2. Kuidas saaks plaatidevahelises õhukeses õhukihis tekkivaid valguse interferentsi nähtusi kasutada kruvi puutemomendi määramiseks?
3. Kuidas määrata puutemomenti elektrit juhtivate kehade puhul?

28. TÄPSUSMÕÕTERIISTAD

Et tänapäeva teaduslikus töös ja inseneripraktikas esineb terve rida täpsusmõõteriistu, mille kohta õpikutes puuduvad lähemad andmed, siis toome allpool tähtsamate täpsusriistade töötamise põhimõtted ja skeemid.

a) M i n i m e e t e r. Minimeetrit kasutatakse kindla suurusega esemete t o l e r a n t s i (lubatud erinevuste) määramiseks 10^{-3} mm täpsusega. Need riistad töötavad kangi põhimõttel. Nende osuti pikkus (kangi õla pikkus) on tavaliselt 100 mm, kangi teise õla pikkus aga 0,1 mm piirides. Ülekandeteguri suurusjärguks on seega 1000. Kang on kinnitatud kahe tera vahele (joon. 10). Üks tera (joonisel ülemine) on kinnitatud liikumatult ja tema otsa ümber

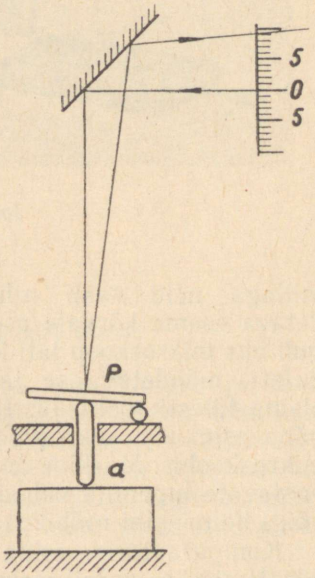
pöördub kang-osuti. Kui riistasse paigutatakse mõõdetav ese, surub see alumise tera üles ja osuti näitab skaalal eseme pikkuse erinevust standardsest pikkusest. Kui ülekandetegur on 1000, siis skaala iga millimeeter vastab mõõdetava pikkuse 10^{-3} millimeet-



Joon. 10. Minimeetri skeem.

rile. Mõõdetava tolerantsi suurus on $\pm$0,01 mm kuni $\pm$0,03 mm. Suuremate hälvete korral skaala ei ole lineaarne.

b) Optimeeter. Optimeetri skeem on kujutatud joonisel 11. See on mehaanilis-optiline süsteem, mida saab nihutada tugeval silindrilisel sambal ja kinnitada vajalikule kõrgusele. Kaliibri asetamisel mõõtelauale mõjub kaliiber vardale *a*, mis omakorda pöörab peeglit *P*. Seetõttu nihkub okulaari skaalal kujutis, mida tekitab peeglilt tagasi peegeldunud kiir. Okulaari skaala on kaliibritud tuhandikes millimeetrites. Kaliiber asetatakse alusele ja aluse kõrgust reguleeritakse nii, et riist näitaks nulli. Kui kaliibri asemele paigutada mõõdetav ese, näitab riist eseme pikkuse erinevust kaliibri pikkusest.



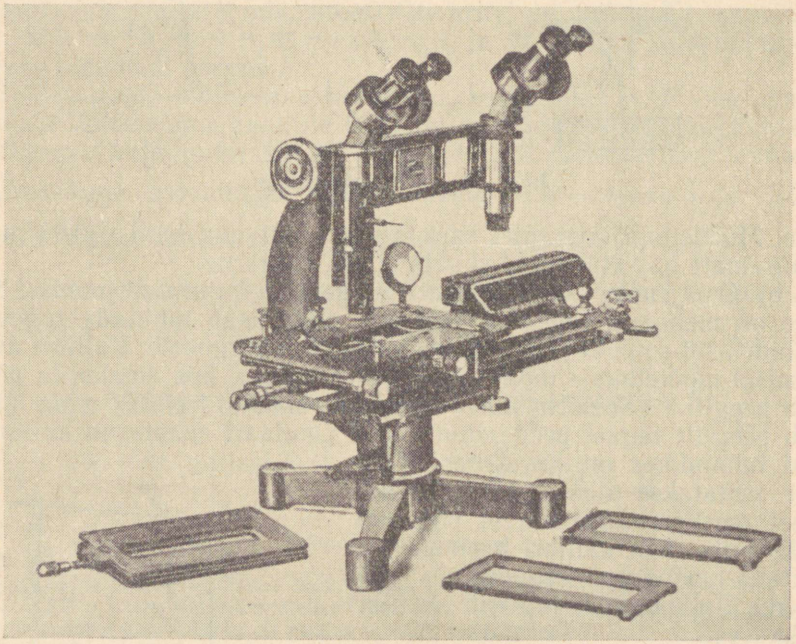
Joon. 11. Optimeetri skeem.

Tänu pikale optilisele õlale võimaldab optimeeter suuremat täpsust ja on stabiilsem kui minimeeter.

c) Mõõtkruvi. Kui on vaja mõõta näiteks spektrijoonte asukohti fotoplaadil veaga alla 0,01 mm, siis võib selleks kasutada täpse pika kruvi abil nihutatavat mikroskoopi. Lugemid saadakse kruviga ühendatud kettalt. Sellise kruvi valmistamine on seotud suurte raskustega. Kruvi valmistamisel tekivad paratamatult mitmesugused vead: lõikepingi tööst tingitud perioodilised vead ja kruvi materjali ebaühtlusest, pingete olukorrast jne. sõltuvad ju-

huslikud vead. Peale selle mõjub mõõtmisel nihkumise suurusele ōlikihi paksus kruvil, tolm, muutuv takistus mikroskoobi nihkumisel jne. Seetõttu ei kasutata mõõtkruvisid tavaliselt suuremate pikkuste mõõtmiseks kui 3—5 cm.

d) K o m p a r a a t o r. Suuremate pikkuste täpseks mõõtmiseks kasutatakse komparaatoreid. Universaalseim neist on nn. l o n g i t u d i n a a l k o m p a r a a t o r. Komparaatori ehitus on järgmine: kaks mikroskoopi on kindlalt kinnitatud ühisele invaralusele,



Joon. 12. Komparaator.

millega neid saab nihutada mööda mõõdetavat eset. Mõõdetava eseme kõrvale asetatakse täpne mõõdulatt. Mõõtmisel liigub üks mikroskoop lati kohal, teine mõõdetava eseme kohal. Mõõdulatt, mõõdetav ese ja mikroskoopide nihkumise siht peavad olema täiesti rööbikud. Igale märgile mõõdetaval esemel, mis on näha esimeses mikroskoobis, vastab siis mõõdulati lugem teises mikroskoobis. Märkide omavahelised kaugused saadakse mõõdulati vastavate lugemite vahedena. Siin määrab mõõtmise täpsuse piiri kõigi kolme sihi rööbikuse täpsus.

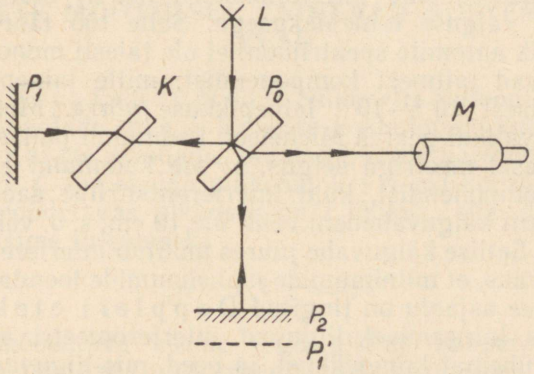
Komparaatoris, mida kasutatakse näiteks meetri etaloonide võrdlemiseks, on mikroskoobid paigal ja võrreldavaid pikkusi nihutatakse risti nende sihiga nii, et üks kord oleks üks pikkus mikro-

skoopide all, teine kord teine pikkus. Väikeste pikkuse erinevuste mõõtmiseks on mikroskoobid varustatud okulaarmikromeetritega. Sellist komparaatorit nimetatakse transversaalkomparaatoriks.

e) Okulaarmikromeeter. Okulaarmikromeetriks on kaspeen skaala või kruvi abil nihutatav niit, millega mõõdetakse okulaaris nähtavat eseme suurendatud kujutist. Mõõtmine peab toimuma kujutise tasapinnas. Kui skaala või okulaarmikromeetri niit ei ühtu kujutise tasapinnaga, võib märgata «parallaksi», s. o. skaala nihkumist kujutise suhtes, kui liigutame silma okulaari suhtes. Okulaarmikromeetrit tuleb kaliibrida täpse skaala abil: skaala asetatakse mikroskoobi alla ja mõõdetakse okulaarmikromeetriga. Sellest saadakse okulaarmikromeetri skaala jaotise väärtus. See väärtus muutub koos objektiivi suurendusega ja mikroskoobi fookustamisega.

f) Interferomeetrid. Valguse interferentsi nähtusi kasutatakse täpsetel mõõtmistel väga laialdaselt. Interferentsi abil võrreldakse täpseid otsmõõte, kontrollitakse pinna tasasust ja pinna töötlemise kvaliteeti (näiteks Linniki mikrointerferomeeter ja interferentsmikroskoop jt.).

Pikkuste mõõtmiseks kasutatavad interferomeetrid rajanevad põhiliselt Michelsoni poolt antud skeemil (joon. 13) ja erinevad



Joon. 13. Michelsoni interferomeetri skeem.

üksteisest ainult rakendusalade, tehnilise viimistletuse ja käsitsemise mugavuse poolest. Nõukogude tööstus toodab tehniliselt täiuslikku ja kergesti käsitsetavat kontaktinterferomeetrit, mis on konstrueeritud insener F. Uverski poolt. Riist võimaldab tehnilistel mõõtmistel saavutada täpsust 0,02 μ. Olgu mainitud, et sellisest täpsusest võime rääkida ainult hästi poleeritud pindadega kehade puhul.

Michelsoni skeemi alusel töötav interferomeeter mõõdab pikkusi poollainepikkustes. Et nähtava valguse keskmine lainepikkus on

0,5 μ, siis on tavaline mõõtmise absoluutne täpsus 0,25 μ. Kompensaatori K abil aga on võimalik mõõta $^1/_{50}$ poollainepikkuse, s. o. 0,005 $\mu = 5$ mμ täpsusega. See on maksimaalne tänapäeval saavutatav mõõtmise absoluutne täpsus pikkustel mitte palju üle 10 cm.

Selgitame lühidalt Michelsoni skeemi põhimõtte. Valgusallikast L (pilu) langeb monokromaatne valgus (tehnilistes riistades, nagu seda on Uverski interferomeeter, kasutatakse monokromatiseerimiseks absorbeerivat klaasi, teaduslikes uurimisriistades prismaatilist monokromaatorit) poolläbilaskvalt hõbetatud peeglile P_0. Üks osa kiirest peegeldub vasakule, läbib kompensaatori K, peegeldub peeglilt P_1 ja läheb endist teed mööda tagasi peeglile P_0; seal jaguneb ta uuesti kaheks kiireks, milledest üks satub mikroskoopi või pikksilma M. Teine osa esialgsest kiirest läbib plaadi P_0, peegeldub peeglilt P_2 ja tuleb uuesti peeglile P_0, kus jaguneb veel kord kaheks osaks, milledest üks satub pikksilma M. Mõlemad pikksilma tulnud kiired on koherentsed ja annavad interferentspildi. Peegel P_1 peegeldub peeglilt P_0. Kui peegel P_1 on veidi kallutatud, siis moodustab tema kujutis P_1' peegliga P_2 kiilu ning interferentspildiks on sirged triibud. Kui nihutada peeglit P_1, siis vastab igale tema nihkumisele ühe poollainepikkuse võrra interferentspildi edasinihkumine ühe triibu võrra. Loendades niitristi läbinud triipude arvu, mõõdame seega peegli P_1 nihke poollainepikkustes. Kompensaatori K pöördenurga järgi võime hinnata sajandikke lainepikkusi. Michelson kasutas oma interferomeetrit meetri etalooni pikkuse võrdlemiseks valguse lainepikkusega. Selle töö läbiviimisel selgus, et enamik aatomite spektrijooni ei ole täiesti monokromaatsed, vaid koosnevad mitmest komponendist, mille lainepikkused erinevad üksteisest 10^{-3}—10^{-6} lainepikkuse võrra. Monokromaatse spektrijoone valikul peatus Michelson kadmiumi punase joone juures. Võrdlemisel meetriga selgus, et see kadmiumi joon koosneb küll ühest komponendist, kuid interferentsitriipe saab tema abil loendada ainult käiguvahedeni veidi üle 10 cm, s. o. veidi üle $2 \cdot 10^5$ lainepikkuse. Sellise käiguvahe juures muutub interferentspilt sedavõrd ebateravaks, et miinimumide-maksimumide loendamine osutub võimatuks. See asjaolu on tingitud D o p p l e r i e f e k t i s t: need aatomid, mis kiirgamisel liiguvad interferomeetri suunas, saadavad veidi lühemat lainepikkust, ja need, mis liiguvad kiirgamise momendil interferomeetrist eemale, saadavad veidi pikemat lainepikkust kui paigalpüsiv aatom. Kadmiumi aatomite kiirus on kiirgamise tingimusis suur, sest valguse paraja intensiivsuse saamiseks tuleb kadmiumi soojendada temperatuurini 300° C, mille puhul tema auru tihedus ja seega ka kiirguse intensiivsus on juba küllalt suur.

Selle tulemusena me ei saa üht kindlat lainepikkust, vaid lainepikkused on jaotatud üle väikese piirkonna. Lainepikkuse täpsus oleneb peale selle veel joont tekitavate elektronide nivoode omadustest.

Et saada täpsemat lainepikkust, peame valima uue aine, mille

aatomkaal on suur ja mis annab parajat intensiivsust juba madalamatel temperatuuridel. Selliseks aineks on elavhõbe, kuid kõik tema jooned koosnevad paljudest lähestikku olevatest komponentidest, mis on tingitud sellest, et looduslik elavhõbe koosneb mitmest isotoobist, millest igaüks annab veidi erineva lainepikkuse.

Aatomispektrite teooriast on teada, et peenstruktuuri vabu jooni annavad isotoobid paarisarvulise massiarvuga. Selline on elavhõbeda isotoop massiarvuga 198. Tema eraldamine plejaadist küllaldase puhtusega ja küllaldastes hulkades on seotud suurte raskustega. Seepärast valmistati ta kullast, mille ainukese isotoobi massiarv on 197, pommitades seda neutronitega:

$$Au^{197} + n^1 \rightarrow Hg^{198} + e^-.$$

Selle aine rohelise joone lainepikkus võimaldas loendada interferentsi maksimume-miinimume käiguvaheni kuni 2,5 m.

Seega on interferentsimeetodi täpsus veelgi üle 20 korra kasvanud.

Rahvusvahelisele mõõtude komisjonile on tehtud ettepanek võtta pikkuse etalooniks selle elavhõbeda isotoobi rohelise joone lainepikkus (vt. «Успехи физических наук», kd. 34, lk. 105, 1948, ja kd. 47, lk. 161, 1952).

29. PIKKUSTE MÕÕTMISEL ESINEVAD SÜSTEMAATILISED VEAD

a) Temperatuuri mõju. Nii meetri etalooni kui ka sellelt kopeeritud skaalade pikkus loetakse kokkuleppe kohaselt õigeks 0° C juures. Kui me mõõdame skaalaga, mille paisumistegur on α_s, temperatuuril t, siis on iga pikkusühik $1 + \alpha_s t$ korda suurem. Kui leiame, et mõõdetavas pikkuses on l ühikut, siis õige skaalaga mõõtes saaksime tulemuseks

$$l_t = l(1 + \alpha_s t).$$

See on mõõdetava eseme õige pikkus temperatuuril t. Kui tahame seda taandada null kraadile, siis kirjutame:

$$l_t = l_0(1 + \alpha_l t),$$

kus α_l on mõõdetava eseme materjali paisumistegur. Siit saame:

$$l_0 = \frac{l_t}{1 + \alpha_l t} = \frac{l(1 + \alpha_s t)}{1 + \alpha_l t}.$$

b) Lati läbipaindumine. Mõõdulattide võrdlemisel peame arvestama nende läbipaindumist oma raskuse mõjul, mis oleneb lati ehitusest ja toetumisviisist. Läbipaindumine on väik-

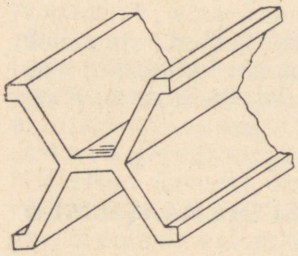
seim nn. Besseli toetuse korral, kus latt on toetatud kahest punktist, mis asuvad lati otstest $^2/_9$ kaugusel lati kogupikkusest. Varda pikkuse horisontaalprojektsiooni lühenemine sellise toetuse korral on

$$\Delta l = -6{,}6 \cdot 10^{-7} \frac{P^2 l^5}{I^2 E^2},$$

kus P — varda kaal,
l — varda pikkus,
I — varda ristlõike inertsimoment,
E — elastsusmoodul.

Ümmarguse meetripikkuse terasvarda ülemine pind lüheneb läbipaindumise tõttu ligi 2,5 mikroni võrra, mis metroloogilistel mõõtmistel on hästi märgatav.

Selle vea vähendamiseks on meetri etaloonide ristlõigetel joonisel 14 toodud kuju, kusjuures meetri pikkus on kantud nn. «neutraalsele» pinnale, mis paindumisel muutub väga vähe. Plaatina ja iriidiumi sulamist valmistatud etalooni muutus läbipaindumise tagajärjel on väiksem kui 1 mμ, s. o. väiksem kui metroloogilise mõõtmise viga.



Joon. 14. Meetri etalooni ristlõige.

Mõõdulint venib, kui teda sirgeks pingutatakse. Kui mõõdulint on horisontaalses asendis, siis toetatakse teda kahest punktist ja ta moodustab nn. «ketijoone», mis tugeva pingutuse korral erineb vähe sirgest. Venimisest ja «ketijoone» kujust tingitud viga tuleb arvutada. Selleks on vaja teada lindi materjali elastsusmoodulit, tihedust ja lindi ligikaudseid geomeetrilisi mõõtmeid (pikkust, paksust ja laiust).

30. KATETOMEETER. VEDELIKU ERIKAALU MÄÄRAMINE U-TORUS

1. Tööülesanne

Katetomeetri ehitusega tutvumine, tema töökorda seadmine ja vedeliku erikaalu määramine U-torus.

2. Töövahendid

Katetomeeter, U-toru kahe erineva vedelikuga.

3. Katetomeetri ehitus

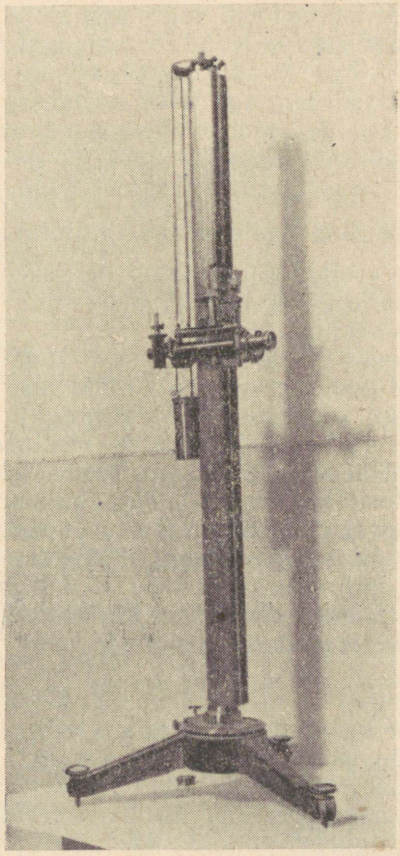
Katetomeetri peamiseks osaks on täpse skaalaga varustatud tugev vertikaalne sammas, mida saab pöörata vertikaalse telje

ümber. Kogu riist toetub kolmele jalgkruvile. Mööda sammast liigub üles-alla lükati pikksilmaga. Lükatit saab vastava peatuskruvi abil igas kõrguses peatada ja mikromeetriline kruvi võimaldab pikksilma kõrgust suure täpsusega reguleerida. Lugemi saamiseks on lükatil vastava täpsusega noonius. Pikksilm on varustatud tundliku vesiloodiga, mille abil sammas seatakse vertikaalseks ja pikksilm horisontaalseks. Ligikaudseks seadmiseks paigutatakse mõnikord vesilood ka katetomeetri samba alusele.

4. Katetomeetri töökorda seadmine

Katetomeeter on töökorras, kui tema sammas (seega ka skaala) on vertikaalne ja pikksilm horisontaalne.

Pikksilma optilise telje horisontaalsuse määrab vesilood, mille



Joon. 15. Katetomeeter.

telg peab olema rööbik pikksilma optilise teljega. Katetomeetri töökorda seadmine koosneb seega kahest operatsioonist: 1) pikksilma optilise telje ja vesiloodi telje rööbikuks seadmisest ja 2) katetomeetri samba vertikaalseks seadmisest. Missuguses järjekorras need operatsioonid sooritatakse, ei ole oluline.

Pikksilma optilise telje ja vesiloodi telje rööbikuse kontroll ei ole alati vajalik. Seepärast tuleb enne tööle asumist praktikumi juhendajalt küsida, kas on vaja kontrollida pikksilma ja vesiloodi rööbikust.

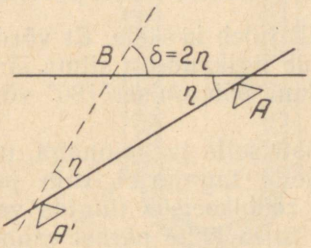
a) Pikksilma optilise telje ja vesiloodi telje rööbikuks seadmine. Kui alustame pikksilma ja vesiloodi telgede rööbikuks seadmist, selgitame kõigepealt, missuguses suunas tuleb pöörata vesiloodi kallutavat kruvi ja pikksilma kallutavat kruvi, et nihutada mulli soovitavas suunas. Rööbikuse kontrolliks tuleb vesilood pikksilma kallutavast kruvist loodi pöörata. Tekkinud olukorda esitab joonis 16. Pikksilma telje asendit märgib AA' ja vesiloodi telje asendit AB. Nendevaheline nurk on tähistatud tähega η. Nüüd tõstame pikksilma pesast välja, pöörame teda 180° võrra ja asetame tagasi. Pikksilma telje asend jääb endiseks, vesiloodi telg aga läheb asendisse $A'B$. Nurk δ vesiloodi telje endise ja uue asendi vahel on kolmnurga $AA'B$ välisnurk ja võrdub tuntud geomeetrialause põhjal selle kolmnurga nurgaga B mitte kõrvu olevate sisenurkade summaga. Seega $\delta = 2\eta$. Kui me pöörame vesiloodi teda kallutavast kruvist $\frac{\delta}{2} = \eta$ võrra, siis muutub vesiloodi telg rööbikuks pikksilma teljega. Pöörame pikksilma kallutavast kruvist ülejäänud poole nurgast δ; siis on pikksilm ja vesilood loodis.

Kui vesiloodi mull ei ole loodi otsale liiga lähedal, siis toimub kaldenurga δ poolitamine mulli nihkumise järgi (mulli nihkumine on sel juhul võrdeline pöördenurgaga). Kui mull on aga vastu loodi otsa surutud, siis pöörame vesiloodi või pikksilma kruvist mulli loodi keskele. Seejuures loeme tehtud pöörete arvu (tihti on see murdosa täispöördest). Pöörates sama kruvi poole pöörete arvu võrra tagasi, võime kindlad olla, et oleme selle kruvi abil küllaldase täpsusega poole kaldest vähendanud. Teisest kruvist pöörame vesiloodi mulli uuesti keskele. Et nurga pooleksjagamine toimub ligikaudselt, tuleb seda võtet korrata seni, kuni pikksilma 180-kraadisel ümberasetamisel vesiloodi mull jääb täpselt keskele.

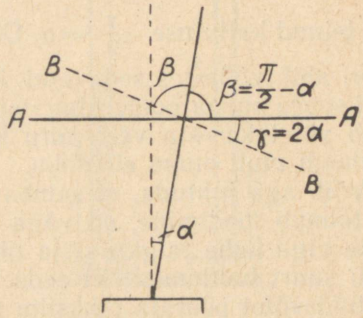
b) Katetomeetri samba vertikaalseks seadmine. Kui asume katetomeetri samba vertikaalseks seadmisele, siis teeme seda kõigepealt ligikaudselt silmaga, kontrollides katetomeetri samba rööbikust ruumi akna või ukseraami äärega. Selleks on otstarbekohane projekteerida katetomeetri sammas uksele või aknale kahe jalgkruvi suunas. Kui näeme, et sammas ei ole rööbik vertikaaljoonega, siis reguleerime teda vaatesuunast kõr-

vale jääva jalgkruviga. Sama teeme ka kahe teise jalgkruvi suunas. Nüüd võib hakata tööle pikksilma vesiloodiga.

Kõigepealt teeme kindlaks, missuguses suunas tuleb pöörata katetomeetri jalgkruvi või pikksilma kruvi, et nihutada loodi mulli soovitavas suunas. Pöörame vesiloodi rööbiti kahe jalgkruviga ja reguleerime ta horisontaalseks. Vastavat olukorda kujutab ske-



Joon. 16. Pikksilma optilise telje ja vesiloodi telje rööbikuks seadmise skeem.



Joon. 17. Katetomeetri vertikaalseisu seadmise skeem.

maatiliselt seis AA joonisel 17. Nurk katetomeetri samba ja vertikaalsuuna vahel joonise tasapinnas (s. o. vertikaaltasapinnas, mis läbib kaht jalgkruvi) on α. Horisontaalne pikksilm moodustab sambaga nurga $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$.

Pöörame pikksilma samba telje ümber 180° võrra. Nurk β läheb nüüd sambast vasakule poole. Pikksilma uut seisu tähistab joonisel BB. Et leida nurka γ, mille moodustab lood oma esialgse asendiga, võime kirjutada:

$$\gamma + \beta + \beta = \pi = \gamma + 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right),$$

millest

$$\gamma = 2\alpha.$$

Siit aga järeldub katetomeetri vertikaalseks seadmise viis. Kui me jalgkruvidest kallutame sammast $\frac{\gamma}{2} = \alpha$ võrra, siis võtab sammas vertikaalse asendi. Kui kallutame niisama suure nurga võrra vesiloodi samba suhtes, muutub lood horisontaalseks.

Kuidas teha kindlaks samba ja loodi kallutust $\frac{\gamma}{2}$ võrra? Kui seisus BB vesiloodi mull on loodi otsa juurest veidi eemal, siis võime nurga jagamist toimetada silmaga vesiloodi mulli nihkumise järgi. Mulli nihkumise võime lugeda võrdeliseks nurgaga. On aga mull täiesti vastu loodi otsa surutud, siis pöörame üht

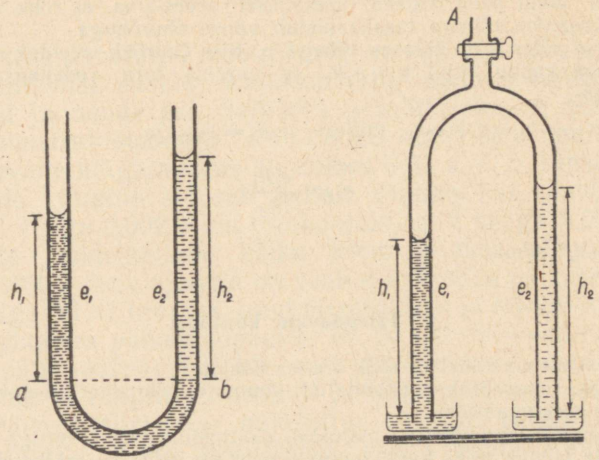
jalgkruvi nii kaua, kuni lood muutub horisontaalseks. Seejuures loendame jalgkruvi pöörete arvu. Olgu see näiteks n. Seega nurgale γ vastab n kruvipööret ja nurgale $\frac{\gamma}{2}$ vastab $\frac{n}{2}$ pööret. Nüüd pöörame samast kruvist $\frac{n}{2}$ pööret tagasi. Sellega oleme jalgkruvi abil teinud kallutuse $\frac{\gamma}{2} = \alpha$. Ülejäänud kallutuse teeme pikksilma kruvi abil, pöörates seda seni, kuni mull tuleb keskele. Et võrdlemisi suure nurga pooleksjagamine toimub ligikaudselt silma järgi, tuleb võtet korrata veel mitu korda, kuni pööramisel 180° võrra vesiloodi mull enam ei nihku.

Võib aga juhtuda, et samba kalle risti selle tasapinnaga, milles toimub loodimine, on väga suur. Selle tagajärjel võib juba väike viga kahe jalgkruvi ja pikksilma rööbikseisus tingida vesiloodi suurt kaldumist. Et seda vältida, tuleb kohe pärast esimest loodimisvõtet pöörata pikksilm risti nende kahe jalgkruviga, mille järgi toimub loodimine, ja pöörata kolmandast jalgkruvist vesiloodi mull keskele. Nüüd võib loodimist jätkata, mis läheb juba palju edukamalt. Kui riist on antud tasapinnas loodis, siis on ka vesilood sambaga risti. Edasi pöörame pikksilma jälle risti loodimistasapinnale ja pöörame kolmandast jalgkruvist vesiloodi mulli keskele. Nüüd peaks vesilood igas suunas loodis olema. Kui mõnes suunas vesiloodi mull ei ole ikka veel keskel, siis tuleb kõik loodimisvõtted uuesti läbi teha. Et kaldenurk on nüüd väike, siis väheneb viga kiiresti.

c) Pikksilma fookustamine. Kõigepealt tuleb okulaari nihutamisega saavutada seda, et niitrist oleks teravalt näha. Edasi suuname pikksilma mõõdetavale kehale ja, muutes pikksilma pikkust, fookustame, nii et eseme kujutis oleks teravalt näha. Nüüd, vaadates pikksilma, võngutame kergelt pead. Kui paneme seejuures tähele, et niitrist nihkub eseme kujutise suhtes, siis on tegemist nn. parallaksiveaga, mis tuleb kõrvaldada. Viga on tingitud sellest, et niitrist ei asu täpselt kujutise kohal. Parallaksivea kõrvaldame samm-sammult, proovimise teel. Nihutame veidi okulaari, aga mitte nii palju, et niitristi kujutis läheks ebateravaks, fookustame uuesti esemele ja proovime parallaksivea olemasolu. Nii toimime seni, kuni silma nihkumisel pikksilma taga niitrist enam ei nihku kujutise suhtes.

5. Töö käik

Ühendatud anumais ja seega ka U-torus seisab vedeliku vaba pind ühel ja samal rõhtsal tasemel. Kui aga valame ühte torru ühte ja teise teist vedelikku ja kui need vedelikud ei segune, siis saame torudes erineva kõrgusega tasemed (joon. 18, vasakul). Tasakaalu korral saame vedelikusammaste kõrgustest arvutada



Joon. 18. Vedelike tasakaal U-torus.

nende vedelike erikaalude suhte, sest kokkupuutetasemele (*ab*) avaldavad mõlemad sambad võrdset rõhku.

Olgu h_1 ühe vedelikusamba kõrgus vedelike kokkupuutetasemest (*ab*) ja h_2 teise vedelikusamba kõrgus samast tasemest. Toru kõveruses allpool taset *ab* asetsev osa koosneb ühest ja samast vedelikust ning on seetõttu tasakaalus.

Rõhud tasemele *ab* on võrdsed, mille põhjal võime kirjutada $h_1e_1 = h_2e_2$, kus e_1 ja e_2 tähendavad vastavate vedelike erikaale. Sellest järeldub, et

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{h_2}{h_1}, \tag{1}$$

s. o. vedelikusammaste kõrgused kokkupuutetasemest on pöördvõrdelised nende vedelike erikaaludega.

Olgu ühe vedeliku erikaal teada. Siis saame sammaste kõrgustest arvutada teise vedeliku erikaalu järgmiselt:

$$e_2 = \frac{e_1h_1}{h_2}. \tag{2}$$

Juhul, kui vedelikud on segunevad, kasutame teistsuguse kujuga katseseadist (joon. 18, paremal). Vedelikusambad saame tekitada abitoru *A* kaudu torus õhku hõrendades (kas pumbaga või suuga imedes). Sammaste kõrgused h_1 ja h_2 vedeliku pinnast vastavas anumas mõõdame kas katetomeetriga või mõõtskaaladega. Kasutades valemit (2), arvutame otsitava erikaalu.

Viimasel juhul peab valemi tuletamisel arvestama, et rõhk toru ülaosas koos vedelikusamba rõhuga tasakaalustub välise õhurõhuga.

Tähistame rõhu toru ülaosas tähega p. Siis õhurõhk avaldub vasaku toru vedelikusamba kaudu kujul $p + e_1h_1$ ja parema toru vedelikusamba kaudu kujul $p + e_2h_2$.

Seega $p + e_1h_1 = p + e_2h_2$, millest $e_1h_1 = e_2h_2$ ja

$$e_2 = \frac{e_1h_1}{h_2}$$

nagu esimeselgi juhul.

6. Täiendavaid küsimusi

1. Millest oleneb vedeliku rõhk anuma põhjale?
2. Kuidas rakendatakse ühendatud anumate põhimõtet veenivoo kõrguse määramiseks reservuaarides?
3. Kas õhurõhu muutumine mõjustab vaatlustulemusi U-toruga töötamisel?
4. Kas ja kuidas võiks kapillaarsus mõjustada erikaalu määramist U-torus?
5. Kas vedelike nivood anumais (joon. 18, paremal) peavad olema samal rõhttasemel?
6. Kui suure täpsusega on võimalik määrata erikaalu U-toru meetodil?

7. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 138.

31. AJA MÕÕTMINE

Aega mõõdetakse perioodiliste protsesside abil, nagu pendli võnkumine, helihargi võnkumine, elektriahelate võnkumine, vedeliku tilkumine jne. Aja mõõtmisel nõutav täpsus ja mõõdetavate intervallide pikkus võib olla väga mitmekesine ning vastavalt sellele kasutatakse ka väga mitmekesiseid meetodeid ja abinõusid aja mõõtmiseks. Selgituseks toome mõned näited.

Kui meil on vaja keeta muna poolpehmeks, siis piisab selleks liivakella täpsusest, kui aga on vaja ilmutada fotoplaat näiteks 2 minuti jooksul täielikus pimeduses, siis võime reguleerida veekraani tilkuma ja loendada tilkade arvu minutis, mis annabki meile aja mõõdu; loendamisega ei tohi ainult palju eksida.

Kui on vaja määrata keha langemise aeg, siis tuleb kasutada sekundimõõtjat. Kui aga on vajalik väga suur täpsus või kui langemise aeg on alla 1 sekundi, siis peame kasutama kronograafi ja langemise alguse ning lõpu momentide elektrilist registreerimist.

Aja mõõtmisel on meil tegemist põhiliselt kolme juhuga: 1) on vaja määrata sündmuse moment, näiteks tähe läbiminek meridiaanist, 2) on vaja määrata kahe sündmuse vaheline ajavahemik, näiteks mõne protsessi kestus, ja 3) määrata mõne perioodilise nähtuse perioodi kestus.

32. PENDELKELLAD

Kõikideks nimetatud mõõtmisteks on vaja ajanäitajat, mis käiks täpselt ühteviisi aastast aastasse ning näitaks tunde, minuteid, sekundeid ja nende osi. Selliseks ajanäitajaks oli pikemat aega erilise konstruktsiooniga astronoomiline pendelkell, mille päevane käigumuutus on umbes 0,01 s, s. o. täpsus ligi 10^{-7}. Signaalide võtmine selliselt kellalt toimub kas elavhõbeda-kontakti abil veaga 0,002 s või fotokontakti abil veaga 0,001 s. Astronoomiliste pendelkellade käiku kontrollitakse Maa pöörlemise järgi, mistõttu meie ajaühik on seotud keskmise päikeseööpäevaga, mis on jagatud 24 tunniks, tund 60 minutiks ja minut 60 sekundiks, nii et keskmises päikeseööpäevas on $24 \cdot 60 \cdot 60 = 86\,400$ sekundit. Tõeline päikeseööpäev ei ole alati ühepikkune, sest Maa tiirleb ümber Päikese elliptilisel orbiidil ja Kepleri II seaduse järgi Maa ümber Päikese tiirlemise nurkkiirus muutub perioodiliselt. Küllalt konstantne on aga täheööpäev, s. o. vahemik sama tähe kahe kulminatsiooni (meridiaanist läbimineku) vahel, mis on võrdne 86 164,100 sekundiga. Olgu siiski märgitud, et ka see suurus on keskväärtus pikema aja kohta.

33. KVARTSKELLAD

Koos raadiotehnika arenemisega kasvasid nõudmised raadiojaamade sageduse (lainepikkuse) stabiilsuse suhtes. Seoses sellega on välja töötatud terve rida sageduse stabiliseerimise võtteid. Nende võtete väljatöötamise käigus selgusid kvartsikristallide täiesti erakordsed füüsikalised omadused. Kvartsikristallide elastsuskonstandid ja tihedused muutuvad temperatuuriga väga vähe. Asetades kvartsikristalli elektrilise võnkeahela kondensaatori plaatide vahele, saame teda elektriliste võnkumistega (piesoelektrilise pöördefekti tõttu) ergutada mehaanilisele võnkumisele. Kvartsi sisehõõrdumine on äärmiselt väike (10^{-4} hõbeda või volframi sisehõõrdumisest) ja võrdub umbes 10^{-12} puaasiga. Tänu sellele on kvartsplaadi resonantsikõver äärmiselt terav, mistõttu kogu elektriline seade on ülitundlik sageduse kõrvalekaldumistele kvartsikristalli omavõnkesagedusest.

Kui asetada kvartsikristall koos elektrilise võnkeahelaga termostaati, siis annab selline ostsillaator väga stabiilse sagedusega võnkumisi. Tema sagedus on tavaliselt 10^5—10^6 Hz ümber. Seda sagedust vähendatakse vastava elektroonilise aparatuuri abil ja kui tema suurusjärk on 10^2 Hz, võib sellise vooluga käitada sünkroonmootorit ja sünkroonmootoriga omakorda ajanäitajat.

Selline on kvartskella ehituse põhimõte.

Kvartskella käigu täpsus on ligi 10^{-8} s, s. o. viga on kümme korda väiksem kui pendelkellal. See täpsus ületab astronoomilise

aja määramise täpsuse. Seepärast ei kontrollita kvartskelli astronoomiliste vaatlustega, vaid neid kontrollitakse omavahel. Ajateenistuslaboratooriumis on kvartskelli vähemalt neli. Et kvartskella ostsillaator annab harmoonilisi võnkumisi, siis on ta ühtlasi sageduse normaaliks.

Seoses ultrakõrgsagedustehnika arenemisega osutus käesoleva sajandi neljakümnendate aastate lõpul võimalikuks kvartsikristalli võnkumist kontrollida gaasi (NH_3) molekulide atomaarsete võnkumistega, mis on teatavates tingimustes veelgi konstantsema sagedusega kui kvartsikristalli võnkumine. Katselistes aparatuurides on saavutatud sageduse konstantsus kuni 10^{-9}.

34. AJATEENISTUS

Rahvusvaheline ajateenistus on tihedalt seotud raadiotehnika arenemisega. Juba käesoleva sajandi kahekümnendate aastate alguses hakkasid rahvusvahelise ajateenistuse laboratooriumid järjekindlalt välja saatma aja võrdlemise signaale, mis «ajanooniuse» abil võimaldavad kronomeetrite võrdlemist 0,01 s täpsusega. Neid signaale kasutavad ka astronoomilised ja geograafilised ekspeditsioonid, geodeedid, laevad merel jne.

Rahvusvahelise ajateenistuse võrku kuulub viis NSV Liidu ajateenistuslaboratooriumi: «Ленинград», «Москва астрономическая», «Москва геодезическая», «Харьков» ja «Ташкентская астрономическая обсерватория». Peale ajasignaalide saadab rida laboratooriume järjekindlalt välja ka standardset sagedust kas 440 Hz või 1000 Hz.

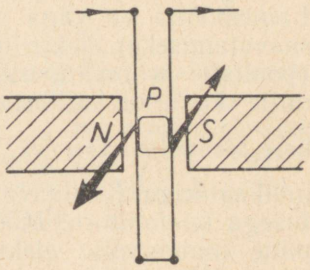
35. AJA MÕÕTMINE KONKREETSETEL JUHTUDEL

Füüsikalistel ja tehnilistel mõõtmistel on tavaliselt tegemist ajavahemiku või sageduse määramisega. Sageli piisab 1%-lisest täpsusest. Seega võime mõne minuti pikkuse ajavahemiku mõõtmiseks kasutada sekundinäitajaga tasku- või käekella. Tehtav absoluutne viga on seejuures ca 1 s.

Kui ajavahemiku pikkus väljendub kümnetes sekundites, siis peame sama suhtelise täpsuse saamiseks kasutama juba 0,1-sekundilist stopperit. Seejuures tuleb silmas pidada, et inimese enda reageerimisaeg kõigub samuti kümnendike sekundite piirides. On olemas stoppereid ka 0,01 s täpsusega, kuid neid on mõtet rakendada ainult rütmiliselt toimuvate protsesside mõõtmisel. Juhuslikult toimuvaid protsesse ei suuda inimene 0,01 s täpsusega jälgida. Kui on vaja saavutada suuremat täpsust või mõõta ajavahemikke alla ühe sekundi, tuleb kasutada kronoskoopi, kronograafi, silmusostsillograafi või koguni elektronostsillograafi. Kõikidel nendel riistadel on ühine põhimõte: registreeritakse tuntud sagedusega võnkumine ja selle kõrvale uuritava nähtuse ajamärgid.

Kronoskoobis registreeritakse etaloonsagedus ja uuritava nähtuse ajamärgid mehaaniliselt kas tahmatud või õhukese vahakihiga kaetud pinnale, mis liigub täpselt tuntud seaduse järgi. Enamikul riistadel on see liikumine ühtlane: silindri ühtlane pöörlemine või lindi ühtlane edasinihkumine. Mõnedes riistades langeb registreeriv pind vabalt, s. o. liigub ühtlaselt kiirenevalt. Kronograafi võime kasutada siis, kui võime jätta arvestamata märkiva süsteemi inertsi.

Silmusostsillograaf kujutab endast erilist peegelgalvanomeetrit väga lühikese omavõnkeperioodiga (kuni 10^{-4} s). Silmusostsillograafi skeem on toodud joonisel 19. Tugevas magnetiväljas on pingutatud kaks traati, mis on lülitatud järjestikku. Traatide vahel asub väike kerge peegel *P*. Voolu läbiminekul mõjub ühele traadile tung, mis lükkab teda ettepoole, teisele aga vastassuunaline tung, mistõttu peegel pöördub. Ostsillograaf koosneb mitmest silmusest (NSV Liidu tööstus toodab kompaktset, kohvrisse monteeritud 8 silmusega ostsillograafi); silmuste peegleid valgustatakse ühisest valgusallikast ja vastavate optiliste süsteemide abil juhitakse peegeldunud kiired ühisele filmile või valgustundliku paberi ribale. Ühele silmusele juhitakse täpselt kaliibritud sagedusega voolu. Nähtuse registreerimine toimub siin elektrilisel teel. Riist võimaldab ajavahemike määramist kuni 10^{-4} s täpsusega. Kui on vaja mõõta palju lühemaid ajavahemikke, siis ei saa seda riista kasutada, sest tema pöörduva süsteemi inerts osutub liialt suureks.



Joon. 19. Silmusostsillograafi skeem.

Väga kiirete nähtuste jälgimiseks ja mõõtmiseks kasutatakse elektronkiire-ostsillograafi, eriti kiirete nähtuste jälgimiseks aga kõrgepinge-elektronostsillograafi, kus elektrone kiirendatakse pingega kuni 100 kV. Viimasel ajal ehitatakse mitme kiirega ostsillograafe, mis võimaldavad samaaegselt jälgida ja võrrelda kahe ja rohkema nähtuse käiku. Nende riistadega on võimalik jälgida ja mõõta nähtusi, mis kulgevad ajavahemikes 10^{-6}—10^{-8} s (ЖЭТФ, 23, lk. 709, 1952).

36. SAGEDUSE MÕÕTMINE

Kui võnkumise sagedus ei ole eriti suur, siis võime sekundimõõtja abil määrata mitme perioodi kestuse ning sellest arvutada perioodi ja sageduse. Perioodi mõõtmisel võime saavutada suure relatiivse täpsuse ka siis, kui aja mõõtmise absoluutne viga on suur, näiteks 1 s. Selleks peame loendama perioodide arvu küllalt

pika ajavahemiku vältel. Relatiivne viga väheneb siis pöördvõrdeliselt jälgimise ajavahemiku pikkusega. Selle poolest erineb perioodi määramine kindla (mittekorduva) ajavahemiku mõõtmisest.

Sageduste korral kuni 10^4 Hz võime kasutada *silmusostsillograafi*, kusjuures mehaanilised võnkumised muudame elektrilisteks võnkumisteks näiteks mikrofoni abil ja registreerime nad filmilindile koos täpse kellaaja märkimisega. Filmilt määrame võngete arvu kahe ajamärgi vahel (seda saab teha 0,1—0,01 võnke täpsusega). Võngete arvu jagatis ajamärkide vahemikuga annabki sageduse.

Sageduse kiireks mõõtmiseks kasutame nn. *lainemõõtjat*. Lainemõõtja on väga väikese kustumisega (resonantsi teravuse saavutamiseks) elektriline võnkering, mis koosneb induktiivsusest (poolist) ja mahtuvusest. Mahtuvuseks on pöördkondensaator, mille skaala on kaliibritud sagedustes (või elektromagnetiliste lainete pikkustes, $\lambda = \frac{c}{f}$). Võnkering on varustatud vahelduva pinge indikaatoriga. Kuuldavate sageduste korral on selleks suure takistusega telefonitoru. Mõõtmine toimub sel teel, et uuritav võnkumine muudetakse elektrivõnkumiseks, millega siis ergutatakse lainemõõtja võnkeahelat. Kondensaatori pööramisega saavutatakse resonants, s. o. pingeindikaatori maksimaalne signaal. Et resonantsi korral on sagedused võrdsed, siis loeme mõõdetava sageduse pöördkondensaatori seisust. Mõõtmise täpsus on ligikaudu 1%.

Täpsemaid tulemusi annab antud sageduse võrdlemine sageduse etalooniga tuiklemissageduse määramise teel.

Viimastel aastatel toodab meie tööstus elektroonilist aparatuuri, mis loendab kuni 10^6 võnget sekundis. Sellist riista võib kasutada sageduste otseseks lugemiseks või tuiklemissageduse määramiseks.

37. MASSIDE MÕÕTMINE

Masside mõõtmine toimub kehade raskuste võrdlemise teel kaalude abil. Täpsemateks kaaludeks, millega saab kaaluda raskusi kuni 200 G, on analüütilised kaalud (leidub ka analüütilisi kaale, mis võimaldavad kaaluda raskusi kuni 1 kG). Laboratooriumis olevate kaaludega saab kaaluda 0,1 mG täpsusega, s. o. 10^{-6} täpsusega. Eriti hoolsalt valmistatud kaaludega ja väga täpse metoodika rakendamisel õnnestub riiklikke kilogrammi etaloone võrrelda isegi 10^{-8} täpsusega. Kuid ka täpsuse 10^{-5} saamiseks on vaja oskust ja suurt hoolt, mida õpitaksegi praktikumis. Masside mõõtmine on üks täpsemaid mõõtmisi ja selle õppimisele tuleb erilist rõhku panna.

38. ANALÜÜTILISED KAALUD JA NENDE NULLTÄPI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Analüütiliste kaalude ehitusega, korrasolekuga ning käsitsemisega tutvumine. Nulltäpi määramine.

2. Töövahendid

Analüütilised kaalud.

3. Töö käik

a) Kaalumise põhimõte. Kaalusid kasutatakse kehade massi ja raskustungi suuruse määramiseks.

Olgu antud kaks keha massidega m_1 ja m_2 ning raskustega vastavalt P_1 ja P_2. Kui kaalumine toimub ühes ja samas kohas, siis on mõlema keha puhul raskuskiirendus g sama ja me võime Newtoni II seaduse põhjal kirjutada:

$$P_1 = m_1 g,$$
$$P_2 = m_2 g.$$

Jagades näiteks esimese võrduse teisega ja taandades g-ga, saame:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

Siit näeme, et ühes ja samas kohas suhtuvad kehade raskused samuti kui nende kehade massid.

Järelikult võime kehade raskuste suhet määrata nende kehade masside suhte abil ja ümberpöördult. Sel alusel toimubki kehade masside määramine kaalumise abil. Et kaaluühiku (kilogramm-tung — kG, gramm-tung — G) ja massiühiku (kilogramm-mass — kg, gramm-mass — g) määramisel on lähtutud ühest ja samast konkreetsest kehast (rahvusvahelise kilogrammi etaloonist), siis praktiliselt väljenduvad keha mass ja kaal ühe ja sama arvuga: keha, mille mass on näiteks 5 g, kaalub 5 G jne.[1]

Tuleb siiski silmas pidada, et raskuskiirenduse (g) suurus oleneb kohast, kus selle mõõtmine toimub. Nii näiteks on raskuskiirenduse suurus Tartus 981,79, Moskvas 981,56 ja Pariisis 980,94 $\frac{cm}{s^2}$. Seega oleneb kohast ka keha kaal, sest kaal $P = mg$.

[1] Kilogramm-tungi nimetatakse ka kilopondiks ja gramm-tungi pondiks (vt. § 7).

Standardraskuskiirenduseks loetakse kokkuleppeliselt $g_n =$ $= 980{,}665 \frac{cm}{s^2}$. Kaaluühikud (G, kG) on määratud standardraskuskiirenduse alusel. Järelikult standardraskuskiirendusest erineva kiirendusega kohtades ei ole keha kaal ja mass arvuliselt võrdsed. Keha mass aga on konstantne, määramiskohast olenematu suurus. Seetõttu on kaaluvihid kindla massiga kehad ja kangkaaludega määratakse tegelikult kehade massi.

Et aga näiteks Tartus erineb raskuskiirendus standardraskuskiirendusest ainult 0,1% võrra, siis praktiliselt võime lugeda keha kaalu arvuliselt võrdseks tema massiga.

b) Kangkaalude ehitus ja korrasolek. Kangkaaludeks on võrdõlgne kang, mis kõvast ainest prisma abil toetub kõvast ainest alusele. Kangi otstes ripuvad samuti prismade abil kaalu- ehk vaekausid.

Mispärast toimub toetumine prismade abil?

Enne tööleasumist tuleb kaalud loodi seada, kasutades selleks kaalude toetuskruvisid. Loomulikult ei tohi töötaja ise seejuures toetuda kaalude aluslauale, sest sellega muudaks ta kaalude loodisolekut.

Kaalud seatakse loodi kas raskus- või vesiloodi abil. Esimesel juhul peab raskusloodi niidi siht läbima mõnda kaalude tugisambaga kindlalt ühendatud punkti. Vesiloodi puhul peab mull asetsema loodi keskel.

Et mitte asjata nürida toetusprismade teravaid servi ja kaitsta kaalukangi ohtlikult tugeva võnkumise eest, tõstetakse kaalukang erilise seadise — areteerija — abil pisut üles ja lastakse tagasi toetusalusele ainult siis, kui seda kaalumiseks on vaja. Areteerimine ise toimub kaalude aluslaua keskel asetseva nupu abil, mida tuleb ettevaatlikult ja aeglaselt pöörata. Kasutamata, tühjalt seistes peavad kaalud alati olema areteeritud.

Kaalusid tuleb käsitseda väga ettevaatlikult, hoidudes järskudest liigutustest ja põrutustest. Kui kaalukang või vaekausid ühel või teisel põhjusel siiski on hakanud liialt võnkuma, tuleb võnkumise kiiremaks summutamiseks kaalud kohe mittejärsu liigutusega areteerida.

Vaekausside võnkumise (õõtsumise) summutamiseks kasutatakse erilist seadist — summutajat, milleks on tavaliselt väikesed harjakesed. Kui vaekausside võnkumine on kustunud, võib kaalud uuesti vabastada.

Kokkuvõttes on kaalude korrasoleku ning hooldamise üldised nõuded järgmised:

1) Kaalud peavad olema puhtad tolmust ja muust prügist; samuti tuleb hoiduda neid kätega puudutamast.

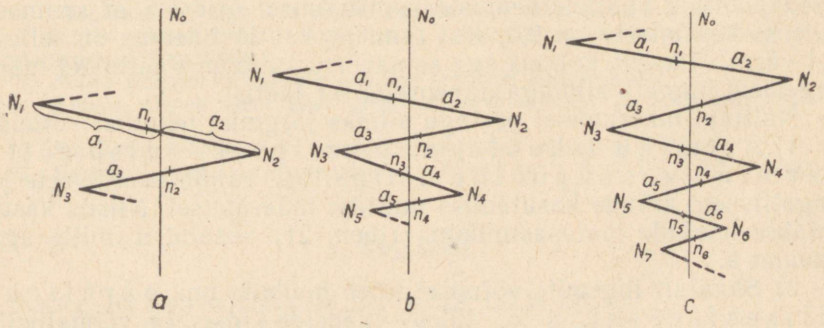
2) Kaalud peavad olema loodis (õhumull vesiloodi keskel või raskusloodi teravik aluse teravikuga vastakuti).

3) Areteerijast vabastatud kaalukang peab võnkuma vabalt ja võnkeamplituudid peavad kustuma küllalt aeglaselt. Seejuures peab osuti ots tasakaaluasendis asetsema skaala keskkohas. Kui erinevus on üle ühe jaotise, tuleb osuti tasakaalu- ehk nullasendit kaalukangi otstes olevate mutrite ettevaatliku nihutamise teel reguleerida. Selleks tuleb pöörduda juhendava õppejõu poole.

c) Nulltäpi määramine. Kaalukang on tasakaaluasendis püsivas tasakaalus, s. o. kaalukangi raskuspunkt asetseb sel juhul otse toetuspunkti all. Sellele vastavat osuti otsa asendit skaalal nimetatakse nulltäpiks. Seega on nulltäpp koormamata kaalude tasakaalutäpiks.

Hõõrdumise tõttu aga ei jää osuti ots tasakaaluasendis alati seisma just nulltäpile. Ka võtab võnkumise sumbumine tublisti aega. Seepärast on täpsem ja kiirem määrata osuti otsa asend skaalal tasakaaluasendis ehk nulltäpp osuti otsa võnkeamplituudide abil. Selleks lastakse kaalud areteerijast vabastamise teel sobiva hälbega ettevaatlikult võnkuma. Võnkeamplituudid vähenevad järjest: võnkumine on sumbuv ehk kustuv (joon. 20). Kitsamas ajavahemikus ja aeglase sumbumise puhul võime üksteisele järgnevate amplituudide kahanemisi pidada võrdseiks. Kui võtaksime nulltäpiks kahe esimese amplituudi aritmeetilise keskmise, s. o. $\frac{a_1+a_2}{2}$, siis asetaksime nulltäpi (n_1) tema õigest asendist vasakule, sest $a_1 > a_2$. Kui aga võtaksime nulltäpiks amplituudide a_2 ja a_3 aritmeetilise keskmise, s. o. $\frac{a_2+a_3}{2}$, siis asetaksime nulltäpi (n_2) tema õigest asendist paremale, sest $a_2 > a_3$. Nulltäpile lähema väärtuse saame, kui võtame neist mõlemast aritmeetilise keskmise, s. o.

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



Joon. 20. Kaaluosuti võnkeamplituudide sumbumine.

Samale tulemusele jõuame, võttes aritmeetilise keskmise vasakpoolsetest amplituudidest a_1 ja a_3 ning siis sellest, s. o. $\frac{a_1+a_3}{2}$, ja parempoolsest amplituudist a_2 veel uuesti aritmeetilise keskmise; tõepoolest:

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

Suurema täpsuse saavutamiseks ei piirduta ainult ühe täisvõnkega, vaid võetakse neid 2, 3 jne. Nii saame kahe täisvõnke puhul 5 erinevat amplituudi ehk 5 pöördetäppi (N_1, N_2, N_3, N_4 ja N_5), 3 täisvõnke puhul 7 jne.

Harilikult piirdutakse kahe täisvõnkega ehk 5 pöördetäpiga (joon. 20, *b*). Sel juhul asetsevad 3 neist (N_1, N_3, N_5) ühel pool ja 2 teisel pool nulltäppi. Nagu joonisel 20 esitatud skeemidest selgub, tuleb nulltäpi määramiseks kasutada täisarvu täisvõnkeid, sest ainult sel juhul saame mõlemal pool nulltäppi sama arvu nulltäpi ligikaudseid väärtusi n_1, n_2, ...

Näitena võtame kaks täisvõnget, s. o. 5 pöördetäppi, ja kirjutame vaatlusandmed üles järgmiselt:

	Vasak:	Parem:
	8,9	11,2
	9,0	11,1
	9,1	
Keskmine:	9,0	11,15

Neist aritmeetiline keskmine

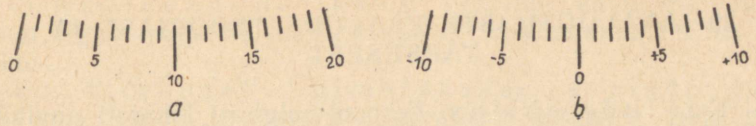
$$N_0=\frac{9{,}0+11{,}2}{2}=10{,}1.$$

Aritmeetilist keskmist tuleb õppida tabama n.-ö. silmaga, ilma üksikvaatluste summat leidmata. Antud juhul näiteks nähtub vasakpoolsete vaatlustulemuste silmitsemisel otseselt, et aritmeetiliseks keskmiseks on 9,0, sest esimene vaatlustulemus on sellest 0,1 võrra väiksem, kolmas aga samavõrra suurem. Vaatlustel tuleb lugemeid hinnata silmaga, täpsusega 0,1 jaotist.

Nulltäpi määramisel peetagu silmas järgmisi tehnilisi võtteid:

1) Astmiku (skaala) nullkriipsuks tuleb võtta äärmine vasakpoolne kriips. See väldib positiivsete ja negatiivsete arvude kasutamise nulltäpi määramisel. Niisiis kasutatakse kaalude jaotusastmikuna (joon. 21) skaalat *a*, mitte aga skaalat *b*.

2) Skaalalt lugemite võtmisel tuleb hoiduda nn. parallaktilisest veast, s. o. tuleb vaadelda otse ja võimalikult



Joon. 21. Kaalude jaotusastmikud.

samast pea asendist. Selleks tuleb istuda korralikult otse kaalu ette ja kaalumise vältel mitte muuta keha ega pea asendit. Vaatlused teha ühe ja sama silmaga.

3) Võnkumiste amplituud ei tohi olla liiga suur: mitte üle 5 jaotise, soovitatav 3—4 jaotise piirides. Kui kaalud on ebasoovitavalt tugevasti võnkuma hakanud, tuleb nad areteerida ja siis ettevaatlikult uuesti käima lasta.

4) Kui võnked ei kahane enam-vähem ühtlaselt, on midagi korrast ära ja tööga tuleb uuesti otsast alata, tähelepanelikult arvestades kõiki vigade võimalusi.

5) Ei tohi toetuda lauale, millel asetsevad kaalud, veel enam kaaludele endile, sest see viiks kaalud loodist ära ja nulltäpi asend muutuks.

6) Kaalukasti uksed peavad vaatluste ajal olema suletud, sest vastasel korral võib kaalumist segada tuuletõmbus (vaekausside õõtsumine).

7) Esimest 3—4 võnget pärast areteerija vabastamist mitte lugeda.

Eespool antud juhendite kohaselt määrata nulltäpp vähemalt kolmel korral ning võtta saadud tulemustest aritmeetiline keskmine.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Milleks kasutatakse kaalusid?
2. Defineerida massi põhiühik (kg) ja sellest tuletatud ühikud (g, mg, t).
3. Kuidas saab väljendada massi nn. tehnilistes massiühikutes?
4. Missugused on üleminekukoefitsiendid: kg $\rightleftarrows$ mg, g $\rightleftarrows$ t, t $\rightleftarrows$ mg jt.?
5. Mispärast võetakse kaalumisel pöördetäppe ikka paaritu arv?
6. Millest oleneb keha raskuskiirendus? Missugune kiirendus loetakse nn. standardraskuskiirenduseks?
7. Milles seisneb vedrukaalu põhiline erinevus kangkaalust?
8. Kuidas oleneb keha kaal geograafilisest laiusest ja kõrgusest merepinnast?
9. Mispärast keha kaal ja mass on praktiliselt arvuliselt võrdsed?
10. Vastata järgmistele küsimustele: 1 mtü = ? kg; 1 t = ? kg; 1 kg = ? μg.

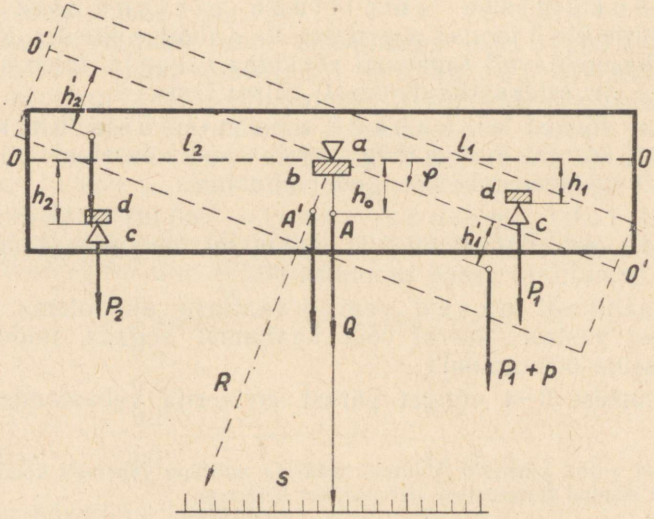
5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 103 ja 104.
Putilov, Füüsika I, § 33.

39. ANALÜÜTILISTE KAALUDE TEOORIAST JA TÄPSUSEST

a) K a a l u d e e h i t u s. Eespool selgitati lühidalt analüütiliste kaalude konstruktsiooni ja käsitsemist. Nüüd tutvume nende konstruktsiooniga ja teooriaga lähemalt.

Nagu juba mainitud, on analüütilised kaalud v õ r d õ l g s e d k a n g k a a l u d (joon. 22). Kangi keskel asuv toetusprisma (*a*) on valmistatud väga kõvast materjalist, tavaliselt ahhaadist või karastatud terasest. See prisma toetub oma terava servaga alus-



Joon. 22. Analüütiliste kaalude skeem.

plaadile (*b*), mis on valmistatud samuti väga kõvast materjalist. Selle prisma serval lasubki kaalukangi ja tema küljes olevate vaekausside raskus. Kangi otstes on ahhaatprismad (*c*), millele toetuvad kausside ülesriputusmehhanismide ahhaatplaadid (*d*). Kangi õla pikkus võrdub seega keskmise ja äärmise prisma servade vahelise kaugusega. Võrdõlgsel kaalul peavad need kaugused väga suure täpsusega võrdsed olema. Nagu hiljem näeme, ei ole täpseks kaalumiseks vajalikku võrdõlgsust praktiliselt võimalik saavutada. Samuti on vajalik, et kõigi kolme prisma servad asuksid ühes tasapinnas, sest siis ei oleneks kaalude tundlikkus koormisest, mida aga samuti ei ole võimalik praktiliselt saavutada. Seepärast tuleb kaalumisel kasutada sellist metoodikat, mis väldib mainitud puuduste tagajärjel tekkivaid vigu.

Otsmiste prismade asendit saab reguleerida vastavate kruvide abil, kuid reguleerimiseks on vaja erilisi abinõusid ja oskust, mistõttu ei tohi kunagi puudutada prismade kinnituskruvisid.

b) Kaalude tundlikkus. Täpsetelt kaaludelt nõutakse kangi õlgade pikkuste suurt stabiilsust ja võimalikult suurt tundlikkust.

Tundlikkuseks nimetatakse kaalude tasakaaluasendi muutust (tavaliselt jaotistes, mida näitab kangi osuti) ühe kaalukausi koormamisel milligrammise raskusega.

Tuletame kaalude tundlikkuse avaldise eeldusel, et prismade servad ei asu samas tasapinnas. Kui koormatud kaalude tasakaaluasend langeb ühte koormamata kaalude tasakaaluasendiga, siis on koormiste momentide summa null ja võime kirjutada (joon. 22):

$$P_1 l_1 - P_2 l_2 = 0, \text{ millest } P_1 = \frac{l_2}{l_1} P_2 = H P_2. \qquad (1)$$

(Kellaosuti suunas pööravad momendid loeme positiivseteks.)

Kui suurendame koormist P_1 väikese lisakoormise p võrra, siis pöördub kaalukang veidi kellaosuti suunas. Tema raskuskese (A) tõuseb veidi üles vasakule, mistõttu tekib tasakaalustav moment. Kui kaalude uus tasakaaluasend moodustab esialgsega nurga φ, siis võime jooniselt 22 üles kirjutada mõjuvate momentide summa, mis tasakaalu tõttu on võrdne nulliga:

$$(l_1 \cos\varphi - h_1 \sin\varphi)\ (P_1 + p) - (l_2 \cos\varphi + h_2 \sin\varphi)\ P_2 - \\ - h_0 Q \sin\varphi = 0, \qquad (2)$$

kus Q — kangi kaal,

h_0 — kangi raskuskeskme ja toetuspunkti vaheline kaugus,

h_1 ja h_2 — kausside toetuspunktide kaugused joonest, mis läbib kangi toetuspunkti ja on risti h_0-ga,

l_1 ja l_2 — õlgade pikkused.

Avame sulud ja grupeerime liikmed ümber:

$$(l_1 P_1 - l_2 P_2) \cos\varphi - (h_1 P_1 + h_2 P_2) \sin\varphi + l_1 p \cos\varphi + p h_1 \sin\varphi - \\ - h_0 Q \sin\varphi = 0. \qquad (3)$$

Avaldise esimene liige on võrrandi (1) kohaselt null.

Et $p \ll P_1$ ja $h_1 \ll l_1$, siis võime liikme $p h_1 \sin\varphi$ teiste liikmete kõrval tähele panemata jätta. Jagame kogu võrrandi $\cos\varphi$-ga ja lahendame ta $\tan\varphi$ suhtes:

$$\tan\varphi = \frac{l_1 p}{h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_0 Q}. \qquad (4)$$

Kui korrutame selle võrrandi mõlemaid pooli kangi osuti pikkusega R, siis saame osuti tasakaalutäpi nihke s, mis tekkis ülekoormise p mõjul:

$$s = R \tan\varphi.$$

Jagades võrrandi mõlemad pooled lisakoormise suurusega p,

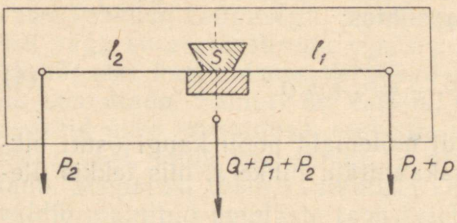
saame koormatud kaalude tundlikkuse. Pidades veel silmas, et $P_1 \approx P_2 \approx P$, võime kirjutada, et $h_1P_1 + h_2P_2 \approx P(h_1 + h_2)$.

Siis saame tundlikkuse avaldise lõplikul kujul:

$$\tau = \frac{s}{p} = \frac{R \tan \varphi}{p} = \frac{Rl_1}{P(h_1 + h_2) + h_0Q}. \qquad (5)$$

Viimasest avaldisest võime välja lugeda, et kui $h_1 + h_2 \neq 0$, siis tundlikkus oleneb kaalude koormisest. Kui h_1 ja h_2 on joonest OO (mis läbib keskmise prisma teraviku) allpool, siis on $P(h_1 + h_2)$ positiivne ja seega koormise suurenemisel tundlikkus väheneb — tasakaal on stabiilne. Selline nähtus on tingitud kangi läbipaindumisest. Kui otsmised prismad asetsevad ülalpool joont OO, siis on liige $P(h_1 + h_2)$ negatiivne, koormise suurenemisel tundlikkus suureneb ja kaalude tasakaal võib muutuda labiilseks. Seetõttu ei asetata otsmisi prismasid kunagi joonest OO kõrgemale. Kui $h_1 + h_2 = 0$, s. t. kõigi kolme prisma servad asuvad ühes tasapinnas, siis tundlikkus ei olene koormisest, vaid on määratud kangi õla pikkusega, kangi raskusega ning toetuspunkti ja kangi raskuskeskme vahelise kaugusega. Kui kaalude õlad on pikad, on tundlikkus suur. Pealegi ei mõju suure õla pikkuse väikesed muutused nii tugevasti õlgade suhte väärtusele. Sellest lähtudes ehitatigi vanasti täpsed kaalud pikkade õlgadega. Vene suur keemik ja metroloog D. I. Mendelejev aga näitas oma töös «О наивыгоднейшей длине коромысла точных весов», et kangi pikkuse suurenemisel kasvab tema kaal kiiremini kui pikkus, kui tahetakse säilitada kangi jäikus, ja seega tundlikkus kangi pikenemisel väheneb. Pika kangiga kaalud võnguvad väga aeglaselt, pika perioodiga, mis toob juurde uusi mõõtmisvigu. Tänapäeval ehitatavate täpsuskaalude õlgade pikkused ei ületa 10—12 cm. Et iga reaalse kangi puhul esineb läbipaindumine, siis peame alati silmas pidama, et tundlikkus on koormise funktsioon ja teda tuleb iga kord täpsel kaalumisel määrata.

c) Kaalude tundlikkuse piir. Kaalukangi õlgade suhte stabiilsus. Kaalukangi keskel asub raske mutter, mille ülespoole keeramisel kangi raskuskese tõuseb ülespoole, raskuskeskme ja toetuspunkti vaheline kaugus h_0 väheneb ning tundlikkus suureneb. Seejuures kasvab aga kaalukangi võnkeperiood, mis toob kaasa uusi mõõtmisvigu. Pealegi on kangi toetusprisma serv ikkagi lõpliku laiusega, mistõttu kaalud ei reageeri momentidele, mis on väiksemad kui prisma servas tekkiv moment. Prisma serv ei või olla liiga kitsas,



Joon. 23. Kaalude tundlikkuse piiri määramine.

sest siis oleks kaalu kandevõime liiga väike. Prisma kitsal toetuspinnal tekkisid kaalude koormamisel rõhud, mis ületavad prisma ja plaadi materjali tugevuse.

Et selles küsimuses selgemat pilti saada, oletame, et kangi toetusprisma on trapetsikujuline (joon. 23).

Tasakaalu korral mõjuvate tungide resultant läbib prisma keskkoha. Ühe õla ülekoormamisel kaalukang ei pöördu, kui on täidetud tingimus:

$$(Q + P_1 + P_2)\,\frac{s}{2} \geqslant pl,$$

kus Q — kangi kaal,
$P_1 + P_2$ — koormiste kaal,
s — prisma toetuspinna laius,
p — ülekoormis,
l — õla pikkus.

Kui tahame, et minimaalne ülekoormis, mis paneks kaalukangi liikuma, oleks 0,01 mG, kui kogukoormis on $P_1 + P_2 = 400$ G, kangi kaal 100 G ja õla pikkus 10 cm, siis prisma toetuspinna laius ei tohi ületada

$$s = \frac{2lp}{Q + P_1 + P_2} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-5}}{500}\ \text{cm} = 0{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{cm} = 4\ \text{m}\mu.$$

Kui prisma pikkus $d = 3$ cm, siis rõhk toetuspinnale oleks antud juhul

$$\frac{Q + P_1 + P_2}{d \cdot s} = \frac{0{,}5}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-7}} = 4{,}2 \cdot 10^5\ \text{kG/cm}^2.$$

Sellisele rõhule ei pea materjal vastu.

Tegelikult kujutab prisma serv endast s i l i n d r i l i s t p i n d a raadiusega 1—3μ, mis kaalukangi võnkumisel veereb mööda alusplaati. Alusplaat ja prisma serv on seejuures deformeeritud. Prisma serva veeremise tõttu nihkub kangi toetuspunkt ühele ja teisele poole, mille tagajärjel muutub kangi õlgade suhe. Kui tahame kaaluda 10^{-6} täpsusega, siis peab ka kaalukangi õlgade suhe niisama suure täpsusega konstantne olema. Kui kangi pikkus on 10 cm, siis peab kangi õla pikkus 0,1μ täpsusega konstantne olema!

Kangi õlgade pikkus muutub kahel põhjusel: kõigepealt ebaühtlase soojenemise tagajärjel. Kangi õlgade temperatuuride vahe muutumisele 0,05° C võrra vastab õlgade suhte muutumine 10^{-6} võrra.

Seega, kui tahame kaaluda 10^{-6} täpsusega, peame hoolitsema, et kaalukangi õlgade temperatuuride vahe ei muutuks kaalumise vältel rohkem kui 0,05° C võrra.

Teine põhjus, mis muudab kaalukangi õlgade suhet, on kangi tasakaaluasendi muutumine: kaalukangi kaldumisel veereb prisma

silindrikujuline serv mööda alusplaati. Kui serva silindri raadius on 1 μ, siis vastab kaldenurgale 4,5° kangi õlgade suhte muutumine 10^{-6} võrra. Kui raadius on 3μ, siis tekib suhte niisama suur muutumine juba 1,5°-se nurga puhul. Seega tasakaaluasendid peavad täpsel kaalumisel jääma nende nurkade piiridesse. Kui kangi osuti pikkus on 200 mm, siis vastavad need nurgad hälvetele skaalal 15 mm ja 5 mm.

Need nurgad on küllalt suured. Seetõttu on viimasel ajal konstrueeritud nii õhksummutite kui ka elektromagnetiliste summutitega kaale, mida tuleb vihtidega koormata ainult täpsuseni 10 mG. Kui selliselt koormatud kaal prismadele lasta, jääb ta tasakaaluasendisse seisma ning siis võime suurendatult projekteeritud skaalalt ära lugeda milligrammid ja kümnendikud milligrammid.

Metroloogilistel kaalumistel (etaloonide võrdlemisel) saavutatakse täpsus 10^{-8}. Selleks kasutatakse eriti hästi valmistatud kaalusid. Kõik eeltoodud piirid tuleb sel juhul jagada veel sajaga, s. t. kaalukangi õlgade temperatuuride vahe muutumine kaalumise vältel peab olema alla 1/2000° C ja tasakaaluasendi muutumine mitte üle 0,045°, mis vastab 0,15 millimeetrile skaalal.

40. KAALUDE TUNDLIKKUSE JA KERGE KEHA KAALU MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Kaalude tundlikkuse määramine. Kerge keha kaalu määramine.

2. Töövahendid

Analüütilised kaalud ja kerge keha (annab praktikumi juhendaja).

3. Töö käik

a) Kaalude tundlikkus. Kaalumise täpsus oleneb kaalude tundlikkusest, mida iseloomustab osuti (rao) tasakaaluasendist kõrvalekaldumise määr kaalukausi lisakoormamisel 1 mg võrra.

Osuti kõrvalekaldumist tasakaaluasendist määratakse harilikult skaala jaotiste arvuga, mille võrra osuti ots skaalal edasi nihkub. Selleks võiks kasutada ka osuti pöördenurka (φ), mis võrdub kaalukangi pöördenurgaga. Et aga skaala jaotisi on lihtsam hinnata kui pöördenurka, siis määratakse praktikas kaalude tundlikkust skaala jaotiste arvuga, mille võrra osuti ots nihkub edasi 1 mg suuruse lisakoormise puhul.

Nihkugu tasakaaluasendis olev osuti lisakoormise p mg mõjul skaalal edasi s jaotise võrra. Siis kaalude tundlikkus

$$\tau = \frac{s}{p}\,\frac{\text{jaotis}}{\text{mg}}. \qquad (1)$$

Teiselt poolt on tundlikkus määratud kaalu konstruktsiooni parameetritega. Kui kaalukangi ja kaalukausside toetuspunktid asetsevad ühel ja samal sirgel ning kaalukang on võrdõlgne, siis

$$\tau = \frac{Rl}{Qh_0}, \qquad (2)$$

kus R on osuti pikkus, l kaalukangi õla pikkus, Q kaalukangi raskus ja h_0 kaalukangi raskuspunkti kaugus toetuspunktist [vt. valem (5), lk. 82]. Praktiliseks kasutamiseks on valem (1) palju mugavam.

Kaalude tundlikkuse pöördväärtust $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ nimetatakse r e d u k t s i o o n i- ehk t a a n d a m i s t e g u r i k s. Reduktsioonitegur näitab, kui suure lisakoormise mõjul nihkub tasakaalustatud osuti skaalal edasi ühe jaotise võrra. Reduktsiooniteguri tähiseks on tundlikkuse tähise pöördväärtus, s. o. $\frac{\text{mg}}{\text{jaotis}}$.

b) R a t s u r i k a s u t a m i n e. Eelöeldust selgub, et kaalude tundlikkuse määramiseks peaksime võtma mõnemilligrammise koormise, määrama sellele vastava osuti hälbe suuruse skaalal ja sellest arvutama ühele milligrammile vastava hälbe jaotiste arvu, millega hindamegi tundlikkust.



Joon. 24. Ratsur.

Harilikult on kõige väiksemaks vihiks 10 mg, mida ei saa tundlikkuse määramiseks kasutada, sest see annaks kaugele väljapoole skaalat ulatuva hälbe. Väiksemaid vihte aga ei ole. Nende asemel kasutatakse nn. r a t s u r i t, milleks on hargina kõveraks käänatud traaditükk raskusega 10 mG. Kaalukang või sellega ühendatud varb on jaotatud kümneks võrdseks osaks ning jaotuskohtadesse on tehtud ratsuri jaoks kriipsud või sälgud. Ratsuri vastavale kohale asetamine toimub erilise liikuva konksukese abil. Kui asetame ratsuri 10. sälgule, mis asetseb kaalukausi toetumiskohal, siis mõjub ta kaalukangi sellele poolele täies suuruses, s. o. 10 mG tugevuselt. Vastav pöördemoment on sel juhul $10 \cdot 10$ ehk 100. Kui aga asetame ratsuri 5. sälgule, siis mõõtub vastav pöördemoment arvuga $10 \cdot 5$ ehk 50, mis on üheväärne 5-milligrammise vihi asetamisega selle poole vaekausile, sest ka $5 \cdot 10$ on 50. Teame ju, et tungide mõju on üheväärne, kui nende tungide pöördemomendid on võrdsed. Selliselt edasi arutledes näeme, et 10-milligrammise ratsuri asetamine esimesele sälgule on seesama mis kaalukausi koormamine vihiga 1 mg, ratsuri asetamine teisele sälgule seesama mis koormamine vihiga 2 mg jne.

Mõnikord on varb, millele ratsur asetatakse, jaotatud teisiti kui eespool kirjeldatud. Seepärast tuleb enne kaalumisele asumist alati selgitada, kuidas antud kaalud on ehitatud, ja toimida

vastavalt ratsuri kasutamise põhimõtteile, mis on toodud eespool.

c) Tundlikkuse määramine koormamata kaalude puhul. Selleks määrame kaalude nulltäpi, s. o. koormamata kaalude tasakaalutäpi. Olgu see N_0. Nüüd moodustame ratsuri vastava asetamisega paraja koormise p. Seejuures peab osuti jääma skaala piiridesse, mitte üle 5 jaotise kaugusele skaala keskkohast. Samal viisil kui määrasime nulltäpi, määrame ka vastava tasakaalutäpi. Olgu see N. Kui p-milligrammise koormise mõjul tasakaalutäpp nihkub $N - N_0$ jaotist, siis 1-milligrammise koormise mõjul nihkub tasakaalutäpp $\frac{N-N_0}{p}$ jaotist, sest väikeste koormiste puhul on nulltäpi nihkumine võrdeline koormise suurusega. Järelikult tundlikkus $\tau_0 = \frac{N-N_0}{p}$ ja reduktsioonitegur $\frac{1}{\tau_0} = \frac{p}{N-N_0}$.

Kui näiteks $N_0 = 10{,}2$, $N = 12{,}6$ ja $p = 4$ mg, siis sel juhul tundlikkus $\tau_0 = \frac{12{,}6-10{,}2}{4} = 0{,}6 \frac{\text{jaotis}}{\text{mg}}$ ja reduktsioonitegur $\frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{0{,}6} = 1{,}7 \frac{\text{mg}}{\text{jaotis}}$.

Kui ratsur on asetatud kaalukangi paremale poolele, siis tasakaalutäpp N nihkub vasakule ja $N < N_0$. Sel juhul määrame tasakaalutäpi nihke $N_0 - N$ abil, sest muidu saaksime negatiivse tundlikkuse, samuti reduktsiooniteguri. Tundlikkuse definitsiooni kohaselt aga pole oluline, missuguses suunas tasakaalutäpi nihkumine toimub.

Määrata kaalude tundlikkus ratsuri kolme erineva asetuse puhul ja võtta saadud tulemustest aritmeetiline keskmine.

d) Kerge keha kaalu määramine. Teades kaalude tasakaalutäpi nihkumise suurust 1-milligrammise koormise mõjul, s. o. tundlikkust, saame selle abil hõlpsasti määrata mõnemilligrammise keha kaalu. Selleks määrame antud kerge kehaga koormatud kaalude tasakaalutäpi. Olgu see N, nulltäpp N_0 ning tundlikkus τ_0. Neist andmeist saame arvutada keha kaalu järgmiselt:

1-milligrammise koormise mõjul nihkub tasakaalutäpp τ_0 jaotist,

x „ „ „ „ „ $N - N_0$ „

Et tasakaalutäpi nihkumine on antud juhul võrdeline koormisega, siis

$$\frac{1}{x} = \frac{\tau_0}{N-N_0}, \text{ millest } x = \frac{N-N_0}{\tau_0}.$$

Kui näiteks $\tau_0 = 0{,}6$, $N_0 = 9{,}8$ ja $N = 12{,}5$, siis

$$x = \frac{12{,}5 - 9{,}8}{0{,}6} = 4{,}5 \text{ mg}.$$

Kontrolliks on soovitatav määrata N_0 teistkordselt.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Mis iseloomustab kaalude tundlikkust?
2. Mille poolest erineb pöördenurga tangensi abil määratud tundlikkus osuti otsa nihkumise abil määratud tundlikkusest?
3. Millest oleneb kaalude tundlikkus?
4. Kuidas oleneb kaalude tundlikkus kaalude koormatusest?
5. Mida nimetatakse reduktsiooni- ehk taandamisteguriks?
6. Missugused on tundlikkuse ja reduktsiooniteguri nimetused?
7. Milles seisneb staatiline ja milles dünaamiline tungi mõõtmine?
8. Defineerida gramm-raskus ja düün (kG, njuuton, megadüün).
9. Kuidas toimub üleminek tehnilistelt tungiühikutelt (G. kG) absoluutsetele (düün, njuuton) ja ümberpöördult?
10. Vastata järgmistele küsimustele: 1 G = ? dn; 75 kG = ? Mdn; 1 N = ? G.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 103 ja 104.
Putilov, Füüsika I, § 33.

41. KEHA TÕELISE KAALU MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Vihtide käsitsemise oskuse omandamine. Keha kaalumine õhus. Keha tõelise kaalu arvutamine.

2. Töövahendid

Analüütilised kaalud, vihid ja kaalutav keha (praktikumi juhendajalt).

3. Vihid

Vihtide massid on kaliibritud rahvusvahelise kilogrammi alusel. Rahvusvahelise kilogramm-massi etalooniks on Rahvusvahelises Kaalude ja Mõõtude Kojas Sèvres'is Pariisi lähedal säilitatav plaatina ja iriidiumi sulamist silinder, mille läbimõõt võrdub kõrgusega: $d = h = 39$ mm. Silindri servad on kergelt ümardatud, nii et tema ruumala on 46,4 cm^3. Etalooni materjal on keemiliselt inertne, suure tihedusega ja küllaldase kõvadusega, mis tagab tema vähest kulumist.

1889. aastal valmistas Rahvusvaheline Mõõdukomitee 42 samasugust etalooni, mis loositi välja meetrikonventsioonile alla kirjutanud riikide vahel, kusjuures Venemaa sai etaloonid numbri-

tega «12» ja «26». NSV Liidu riiklikuks kilogrammi etalooniks on etaloon nr. 12, mida säilitatakse kvartsplaadil kahe klaaskupli all. Rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt võrreldakse riiklikke etaloone prototüübiga üks kord 25 aasta tagant. 1889. aasta võrdlusandmetel kaalus etaloon nr. 12 1 kg + 0,068 mg ± 0,002 mg. Esimese maailmasõja tõttu järgmine võrdlus hilines ja teostati alles 1936. aastal. Tulemuseks oli 1 kg + 0,040 mg. Vahe 0,028 mg on arvatavasti tingitud mitte massi tegelikust vähenemisest, vaid kaalumistehnika ja parandustegurite metoodika arenemisest.

Etalooni «26» kasutatakse kui riikliku etalooni «12» koopiat. Nende etaloonidega võrreldakse NSV Liidu Mõõdukomitee tööetaloonid ja alles tööetaloonidega kontrollitakse käibel olevaid vihte.

Kõiki NSV Liidus kasutatavaid vihte kontrollitakse Mõõdukomitee asutuste poolt üks kord kahe aasta tagant. Kontrollitud tehnilistele vihtidele lüüakse kontrollimisaasta tempel, kuna täpseks kaalumiseks kasutatavatele vihtidele antakse kaasa pass, milles on märgitud iga vihi parandus.

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

10 mg	20 mg	20 mg	50 mg
0,1 g	0,2 g	0,2 g	0,5 g
1 g	2 g	2 g	5 g
10 g	20 g	20 g	50 g
100 g	200 g	200 g	500 g
1 kg	2 kg	2 kg	5 kg

1. Vaadelda lähemalt eelmist tabelit ja veenduda, et selline vihtide valik võimaldab moodustada vihtide igasuguse suurusega rühmitusi täpsusega kuni 10 mg.

2. Harjutada kiiresti valima sobivaid vihte järgmiste masside moodustamiseks: 2,75 kg; 0,91 g; 356,84 g; 0,0723 kg.

Näide: 37,680 g = 20 g + 10 g + 5 g + 2 g + 0,5 g + 0,1 g + 50 mg + + 20 mg + 10 mg.

4. Töö käik

a) Vihtide käsitsemine. Kaalumisel võrdleme antud keha kaalu vihtide kaaluga, kusjuures kaalud on vahendiks, mille abil see võrdlemine toimub. Vihtide käsitsemisel peetagu meeles:

1) Vihid peavad olema karpi asetatud alati normaalses suuruse järjekorras. Kui see nõnda ei ole, siis enne tööle asumist teha seda!

2) Vihte ei tohi tõsta sõrmedega, vaid ainult näpitsaga (pintsetiga).

3) Vihte ei tohi kunagi asetada töölauale, vaid karbist otse vaekausile ja sealt tagasi karpi oma kohale.

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

5) Vihte võib asetada vaekausile ja sealt ära võtta ainult siis, kui kaalud on areteeritud.

b) Keha kaalu määramine õhus. Kaalumine nagu kogu meie tegevus toimub õhuga täidetud ruumis. Seepärast oleme keha tõelise kaalu määramisel sunnitud määrama esiteks selle keha kaalu õhus ning saadud tulemusest juba matemaatilisel teel arvutama tema tõelise kaalu, s. o. keha kaalu tühjas ruumis.

Keha kaalumine õhus toimub järgmiselt:

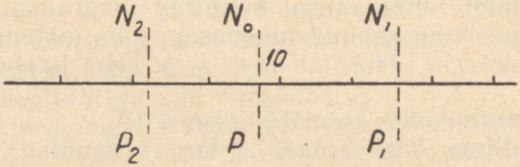
1) Kontrollime, kas kaalud on korras (puhtad, loodis jne.), ja määrame koormamata kaalude tasakaalu- ehk nulltäpi. Olgu see näiteks $N_0 = 9{,}8$.

2) Et kiirendada sobivate vihtide valikut, on kasulik määrata antud keha kaal lihtsate kaalude abil vähemalt 1-grammise täpsusega. Olgu see näiteks 85 g. Nüüd areteerime kaalud ja asetame kaalutava keha vasakule vaekausile, kuna paremale vaekausile asetame vihid. Kui eelkaalumine on toimetatud õigesti, siis võime õigesti asetada vaekausile ka täisgrammide arvule vastava hulga vihte (85 g). Areteerija ettevaatlik osaline vabastamine näitab kohe, kas võetud vihte on palju või vähe. Kui vasak vaekauss langeb alla ja 1-grammine lisakoormis paremal kaalub ta üles, siis on kaalumise käik õige ja tuleb asuda murrulise osa esimese kümnendkoha — kümnendike grammide — arvu määramisele.

Seda tehakse katsetamise teel alati suurematest vihtidest järjest väiksemate suunas. Kui näiteks asetame vaekausile 0,5 g ja areteerija ettevaatlikul osalisel vabastamisel parem pool vajub alla, siis on 0,5 g palju. Võttes aga suuruselt järgmise väiksema vihi — 0,2 g —, näeme, et parempoolne vaekauss ei vaju enam alla. Järelikult 0,2 g on vähe. Nüüd lisandame vaekausile veel 0,2 g. Kui vaekauss langeb alla, siis on 0,2 + 0,2, s. o. 0,4 g, palju. 0,1 g, s. o. kokku 0,3 g lisandamisel aga ei lange vaekauss alla. Järelikult on kümnendike arv 3 ja me võime asuda järgmise kümnendkoha — sajandike grammide — määramisele, mis toimub samasugusel viisil kui kümnendike määraminegi. Olgu sajandike arv 4. Siis oleme saanud antud keha kaalu jaoks arvu 85,34 g, mis määrab selle 0,01-grammise täpsusega.

Kui tahame edasi leida ka kolmanda kümnendkoha, siis kasutame vastavate vihtide puudumise tõttu ratsurit, asetades selle nõnda, et osuti võnkumise tasakaalutäpp N_1 asetseks võimalikult astmiku keskkoha (N_0) läheduses. Seejuures peab tasakaalutäpi määramine toimuma samal viisil kui nulltäpi määramine. Olgu parempoolse vaekausi koormis $P_1 = 85{,}346$ G ja tasakaalutäpi asend $N_1 = 11{,}6$. Et koormamata kaalude tasakaalutäpi asendiks on $N_0 = 9{,}8$, vihtidega $P_1 = 85{,}346$ G koormatud kaalude tasakaalutäpi asendiks aga $N_1 = 11{,}6$, siis on selge, et $P_1 < P$, kus P on antud keha kaal õhus.

Milligrammide õige arvu määramisel kasutame sama võtet kui kerge keha kaalumisel. Selleks suurendame ratsuri edasinihutamisega parempoolse vaekausi koormist mõne, näiteks 3 milli-



Joon. 25. Tasakaalutäpi nihkumine kaalumisel.

grammi võrra nõnda, et uus tasakaalutäpp N_2 nihkuks teisele poole koormamata kaalude nulltäppi N_0. Kui mõlemad tasakaalutäpid N_1 ja N_2 asetseksid ühel pool nulltäppi N_0, siis peaksime paranduse (x) arvutamiseks kasutama interpolatsiooni asemel ekstrapolatsiooni, mis pole lubatav.

Olgu tasakaalutäpile N_2 vastav vaekausi koormis $P_2 = 85{,}349$. Keha õige kaal õhus P peab siis asetsema P_1 ja P_2 vahel, s. o. $P_1 < P < P_2$. Milligrammide õige arvu määramiseks vajaliku paranduse arvutame eelmistest andmetest järgmiselt, kui $N_2 = 8{,}2$.

Koormise suurenemine $P_2 - P_1 = 85{,}349$ G $- 85{,}346$ G $= 3$ mG võrra nihutas tasakaalutäppi vasakule $N_1 - N_2 = 11{,}6 - 8{,}2 = 3{,}4$ jaotise võrra.

Siin nihkus tasakaalutäpp juba üle nulltäpi N_0. Meil aga on tarvis teada, missugune P_1-le lisandatud koormis x nihutaks tasakaalutäpi N_1-lt just N_0-le, sest siis $P = P_1 + x$.

Seniste andmete põhjal võime kirjutada:

3 mG mõjul nihkub tasakaalutäpp $N_1 - N_2$ jaotist,
x „ „ „ „ $N_1 - N_0$ „

Et tasakaalutäpi edasinihkumine on võrdeline koormise suurenemisega, siis saame eelmise põhjal võrduse

$$\frac{3}{x} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 - N_0},$$

millest

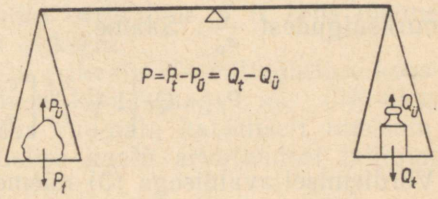
$$x = \frac{3 \cdot (N_1 - N_0)}{N_1 - N_2} = \frac{3 \cdot (11{,}6 - 9{,}8)}{11{,}6 - 8{,}2} = \frac{3 \cdot 1{,}8}{3{,}4} = 1{,}6 \text{ mG}.$$

Järelikult $P = P_1 + x = 85{,}346$ G $+ 1{,}6$ mG $= 85{,}3476$ G.

Samale tulemusele jõuame lähtudes koormisest P_2, mis on suurem kui P. Sel juhul tuleb leida koormise vähendamise määr, mis vastab tasakaalutäpi nihkumisele $N_0 - N_2$ jaotise võrra paremale, ja see P_2-st lahutada.

Saadud tulemuse kontrollimiseks on tarvilik kaalumise lõpetamisel uuesti kontrollida nulltäppi. Kui see erineb endisest vähe, siis tuleb võtta N_0 väärtuseks nende aritmeetiline keskmine. Kui erinevus on tunduv (üle 0,2 jaotise), tuleb kogu kaalumist korrata.

c) Keha tõelise kaalu arvutamine. Olles määranud keha kaalu õhus P, arvutame sellest keha tõelise kaalu P_t, s. o. keha kaalu tühjas ruumis. Olgu vihtide tõeline kaal Q_t (see ongi neile peale märgitud).



Joon. 26. Õhu üleslükke mõju kaalumisel.

Arhimedese seaduse põhjal kaalub iga keha üleslükke tõttu õhus nii palju vähem, kui palju kaalub õhk selle keha ruumala suuruses. Olgu keha üleslüke $P_ü$ ja vihtide üleslüke vastavalt $Q_ü$. Vaekausile mõjub tõelise kaalu (tung Maa poole) ja üleslükke vahe (joon. 26).

Kui kaalud on tasakaalus, siis $P_t - P_ü = Q_t - Q_ü$, millest

$$P_t = Q_t + P_ü - Q_ü. \qquad (1)$$

Vaatleme massiivset, s. o. ainega ühtlaselt ja umbselt täidetud tühikuteta keha.

Olgu õhu erikaal $e_õ$, kaalutava keha ruumala V_k ja erikaal e_k ning vihtide ruumala V_v ja erikaal e_v. Siis erikaalu valemi $\left(e = \frac{P}{V}\right)$ põhjal

$$P_ü = e_õ V_k = e_õ \frac{P_t}{e_k}$$

ja

$$Q_ü = e_õ V_v = e_õ \frac{Q_t}{e_v}.$$

Asendades valemis (1) $P_ü$ ja $Q_ü$ eelmiste avaldistega, saame:

$$P_t = Q_t + e_\delta \left(\frac{P_t}{e_k} - \frac{Q_t}{e_v} \right). \qquad (2)$$

Teiselt poolt võime kirjutada:

$$P_t = Q_t + p = Q_t \left(1 + \frac{p}{Q_t} \right), \qquad (3)$$

kus p on üleslüketest tingitud parandus.

Asetame selle avaldise võrrandisse (2) sulgudes oleva P_t asemele. Saame:

$$P_t = Q_t + e_\delta \left[\frac{Q_t}{e_k} \left(1 + \frac{p}{Q_t} \right) - \frac{Q_t}{e_v} \right]. \qquad (4)$$

Võrrandi paremal poolel toome kogu avaldisest välja Q_t ja nurksulgudest $\frac{1}{e_v}$. Saame:

$$P_t = Q_t \left\{ 1 + \frac{e_\delta}{e_v} \left[\frac{e_v}{e_k} \left(1 + \frac{p}{Q_t} \right) - 1 \right] \right\}.$$

Võrdlemisel avaldisega (3) näeme, et

$$\frac{e_\delta}{e_v} \left[\frac{e_v}{e_k} \left(1 + \frac{p}{Q_t} \right) - 1 \right] = \frac{p}{Q_t},$$

mis on väike suurus, sest $\frac{e_\delta}{e_v}$ suurusjärguks on vaskvihtide korral 10^{-4}. Et seda suurust hinnata, jätame ümarsulgudes $\frac{p}{Q_t}$ ühe kõrval tähele panemata. Siis saame:

$$\frac{p}{Q_t} = \frac{e_\delta}{e_v} \left(\frac{e_v}{e_k} - 1 \right).$$

Võtame äärmised juhud. Erikaal on kõige suurem iriidiumil (22,5) ja kõige väiksem korgil (0,2). Esimesel juhul $\frac{p}{Q_t} = -9 \cdot 10^{-5}$ ja teisel juhul $\frac{p}{Q_t} = 5{,}3 \cdot 10^{-3}$. Seega $\frac{p}{Q_t}$ ärajätmine valemi (4) ümarsulgudest annab kaalu arvutamisel vea esimesel juhul $-5 \cdot 10^{-9}$ ja teisel juhul $3 \cdot 10^{-5}$.

Kui kaalutava keha erikaal on üks, siis on valemi viga vaskvihtide kasutamisel 10^{-6}. Seega kui kaalumise täpsus on 10^{-6}, siis kõikide kehade korral, mille erikaal on ühest suurem, võime üleslükke paranduse arvutamiseks kasutada lihtsamat valemit

$$P_t = Q_t \left[1 + e_\delta \left(\frac{1}{e_k} - \frac{1}{e_v} \right) \right]. \qquad (5)$$

Jagades kogu võrrandi raskuskiirendusega ja pidades silmas, et erikaal võrdub tiheduse ja raskuskiirenduse korrutisega, saame:

$$m_k = m_v \left[1 + \varrho \left(\frac{1}{\varrho_k} - \frac{1}{\varrho_v}\right)\right], \qquad (6)$$

kus m_k — kaalutava keha tõeline mass,
m_v — vihtide tõeline mass (mis on vihtidele märgitud),
ϱ — õhu tihedus,
ϱ_k — kaalutava keha tihedus,
ϱ_v — vihtide tihedus.

Valemist (6) näeme, et kui keha tihedus on vihtide tihedusest väiksem, siis parandus on positiivne, s. o. keha tõeline mass on vihtide tõelisest massist suurem. Kui aga keha tihedus on vihtide tihedusest suurem, siis on parandus negatiivne, s. o. keha tõeline mass on vihtide tõelisest massist väiksem.

Kui meil on tegemist tundmatu erikaalu või mitteühtlase koostisega kehaga, näiteks seest õõnsa klaaskehaga, siis üleslükke arvutamiseks määrame selle keha ruumala katseliselt ülevooluanuma või mensuuri abil ja tõelise kaalu arvutamisel lähtume kohe valemist (1).

Kui kaalumine toimub täpsusega 10^{-5}, siis kehade kaalumisel, millede tihedus on üle nelja, tuleb paranduse arvutamiseks õhu tihedus võtta kahe koha täpsusega. Väiksemate tihedustega kehade korral tuleb õhu tihedus võtta kolme koha täpsusega ja niisama suure täpsusega ka keha ja vihtide tihedus. Tavalistel tingimustel (temperatuur $t = 18°$ C ja õhurõhk $b = 760$ tr) $\varrho = 1{,}207 \cdot 10^{-3}$ g/cm³; kui $b = 750$ tr, siis $\varrho = 1{,}191 \cdot 10^{-3}$ g/cm³.

Kui kaalumine toimub täpsusega 10^{-8}, siis peavad keha ja vihtide tihedused teada olema täpsusega 10^{-5}. Niisama suure täpsusega peab teada olema ka õhu tihedus.

Õhu tiheduse arvutame valemist

$$\varrho = \varrho_0 \cdot \frac{b\left[1 - \frac{d}{760}(1 - \varrho_a)\right]}{760\,(1 + 0{,}0036712\,t)},$$

kus $\varrho_0 = 1{,}29312 \cdot 10^{-3}$ g/cm³ on õhu tihedus normaaltingimustel süsihappegaasi normaalse sisalduse puhul (0,05%),
b — baromeetri seis torrides,
d — veeauru osarõhk torrides,
$\varrho_a = 0{,}63$ — veeauru suhteline tihedus,
t — õhu temperatuur.

Õhu tiheduse määramiseks mainitud täpsusega tuleb õhurõhku mõõta 0,01 torri täpsusega ja temperatuuri samuti 0,01° C täpsusega.

Kui aga peame silmas, et hapniku hulk õhus võib kõikuda 23,05% ja 23,2% vahel, mis põhjustab erikaalu muutuse 10^{-4}, ja

et hoopis suurem viga tekib süsihappegaasi sisalduse muutustest, siis selgub, kuivõrd suurte raskustega on seotud täpne metroloogiline kaalumine, kui võrreldavad kehad on erinevate erikaaludega. Kõikide nimetatud vigade vältimiseks püütakse kaalumist toimetada vaakuumis. Õhu üleslükke vigade vältimiseks piisab juba 10^{-2}-torrisest vaakuumist. Kaalumisel vaakuumis tekivad aga uued raskused kehade pindadel adsorbeerunud niiskuse ja gaasidega.

5. Täpse kaalumise meetoditest

Kaalude õlgade pikkuste suhe ei võrdu kunagi täpselt ühega, mistõttu täpsel kaalumisel tuleb see suhe kas elimineerida või määrata.

a) Tareerimise meetodil (mida nimetatakse ka Borda meetodiks) elimineeritakse õlgade suhe. Kaalutav keha asetatakse kaalukausile, tasakaalustatakse tavalisel viisil taaraga, s.o. liivaga või mõne muu püsiva kaaluga ainega, ja määratakse tasakaaluasend N_0. Siis võetakse keha maha ja samale kausile asetatakse vihid, nii et saavutatakse uuesti tasakaaluasend. Seejuures määratakse tundlikkus ja taandatakse vihtide hulk arvutuse teel N_0-le. Kui tähistame taara kaalu T-ga, keha kaalu P-ga, vihtide kaalu P_1-ga ja õlgade suhte H-ga, võime kirjutada esimese ja teise kaalumise jaoks:

$$\begin{aligned} P &= HT \\ P_1 &= HT \end{aligned}$$

$$\frac{P}{P_1} = 1 \text{ ehk } P = P_1.$$

Kahe kaalumise vahel võib H muutuda temperatuuri muutumise tõttu. Seepärast teostatakse väga täpsel kaalumisel mõne aja pärast uus kaalumine vastupidises järjekorras: esialgu võrreldakse taaraga vihid ja hiljem kaalutav keha. Siis on paisumise mõju vastupidine ning esimese ja teise kaalumise keskmine annab õige väärtuse.

b) Kahekordse kaalumise meetodil ehk Gaussi meetodil elimineeritakse samuti õlgade suhe, kuid saadud andmetest on võimalik õlgade suhet ka suure täpsusega arvutada.

Asetame keha vasakule kausile ja tasakaalustame paremal kausil vihtidega. Selle kaalumise jaoks võime kirjutada tasakaalutingimuse

$$lP = (l + \Delta l)\ P_1, \qquad \text{(a)}$$

kus l ja $l + \Delta l$ on vastavad kaalude õlgade pikkused, P keha kaal ja P_1 vihtide kaal.

Tõstame keha paremale kausile ja vihid vasakule. Endise tasakaaluasendi saavutamiseks tuleb vihtide hulka muuta. Märgime

seda $P_2 = P_1 + p$. Teise kaalumise tasakaaluvõrrand on

$$l\,(P_1 + p) = (l + \Delta l)\,P. \qquad \text{(b)}$$

Võrrandi (a) jagamisel võrrandiga (b) taanduvad õlgade pikkused ja me saame:

$$\frac{P}{P_2} = \frac{P_1}{P};\quad P^2 = P_1P_2 = P_1\,(P_1 + p) = P_1^2\left(1 + \frac{p}{P_1}\right),\ \text{millest}$$

$$P = \sqrt{P_1P_2} = P_1\sqrt{1 + \frac{p}{P_1}}.$$

Et $p \ll P_1$, siis

$$P \approx P_1\left(1 + \frac{p}{2P_1}\right) = P_1 + \frac{p}{2} = \frac{2P_1 + p}{2} = \frac{P_1 + P_2}{2},$$

s. t. geomeetrilise keskmise asemel võime võtta aritmeetilise keskmise.

Kui korrutame võrrandi (a) võrrandiga (b), siis taandub P ja saame:

$$l^2\,(P_1 + p) = (l + \Delta l)^2\,P_1.$$

Jagades selle võrrandi l^2 ja P_1-ga, saame:

$$1 + \frac{p}{P_1} = 1 + 2\frac{\Delta l}{l} + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2.$$

Et Δl on l-ga võrreldes väike, siis võime $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2$ ära jätta: $\frac{\Delta l}{l} =$

$= {}^1/_2\frac{p}{P_1}$, millest $\Delta l = {}^1/_2\frac{p}{P_1}\,l$ ja $H = \frac{l + \Delta l}{l} = 1 + \frac{p}{2P_1}$.

See arv iseloomustab kaalude võrdõlgsust, s. t. kaalude korrasolekut.

c) Vene suur keemik ja metroloog D. I. Mendelejev töötas välja täpse kaalumise meetodi, mille puhul kaalu tundlikkus jääb muutumatuks. Mendelejev lähtus oma meetodi ülesehitamisel Borda meetodist. Meetod seisab selles, et ühele kaalukausile asetatakse vihtide hulk, mis vastab kaalu maksimaalsele kandevõimele. Teisele kausile pannakse taara, mis tasakaalustab vihid. Kaalutav keha asetatakse samale kaalukausile, kus on vihid, sealt vastavat hulka vihte ära võttes. Meetod on eriti mugav vihtide komplektide kontrollimisel.

Hiljuti hakkas NSV Liidu ja välismaa tööstus välja laskma poolautomaatseid analüütilisi kaale, mille tasakaalustamine toimub vihtide mahavõtmisega vastava seadeldise abil. See tähendab, et moodsad kaalud töötavad Mendelejevi meetodil.

6. Täiendavaid küsimusi

1. Näidata, et valemite (5) ja (6) mõlemad pooled omavad sama dimensiooni.
2. Missugustel tingimustel võrdub keha tõeline kaal vihtide tõelise kaaluga?
3. Missugustel tingimustel on võrdkaalulised kehad ka võrdmassilised?
4. Miks peavad tasakaalutäpid N_1 ja N_2 kaalumisel asetsema teine teisel pool nulltäppi (N_0)?
5. Miks praktikas (kauplustes, apteekides) tegelikult ei arvestata kehade tõelist kaalu?
6. Kuidas oleneb keha kaal õhus õhurõhust?
7. Kui palju kaalub õhk inimese keha (75 kG) ruumala suuruses?

42. RUUMALA, TIHEDUS, SUHTELINE KAAL, ERIKAAL JA MAHUKAAL

Korrapäraste kehade ruumalasid saame leida nende kehade lineaarsete mõõtmete määramise teel. Risttahuka ruumala leidmiseks näiteks peame mõõtma tema pikkuse (l), laiuse (s) ja kõrguse (h); siis ruumala $V = lsh$. Silindri korral peame mõõtma raadiuse (r) ja kõrguse (h); siis ruumala $V = \pi r^2 h$, jne.

Kui võtame kuubi, millel $l = s = h$, või silindri, millel $r = h$, ja arvutame relatiivse vea eeltoodud valemite alusel, siis leiame, et ruumala relatiivne viga on kolm korda suurem pikkuse mõõtmise relatiivsest veast. See ei ole kuigi suur täpsuse kahanemine. Kuid see oleks nii ainult ideaalse geomeetrilise keha korral. Korrapärase keha valmistamisel aga tekivad omakorda vead. Kuubi tahud ei tule päris tasased ja nurgad tahkude vahel jäävad erinevaks täisnurgast. Silindrilise pinna raadius tuleb ebaühtlane ja otsmised tasapinnad ei ole täpselt risti silindri teljega. Kõigi nende asjaolude tõttu on korrapärase keha valmistamine äärmiselt keerukas ülesanne. Suhteliselt kõige kergem on valmistada korrapärast kuupi. Parimad kuubid valmistatakse kvartskristallist. Nende tahud poleeritakse ning tahkude tasapinnalisust ja rööbikust kontrollitakse interferentsimeetoditega. Ka tahkudevahelist kaugust mõõdetakse interferentsimeetoditega. Samuti mõõdetakse väga suure täpsusega tahkudevahelisi nurki. Sellise töö tulemusena saadakse keha, mille mahu mõõtmise relatiivne viga ei ületa 10^{-6}. Analoogiline töö tehti esimese «arhiivkilogrammi» valmistamisel, mille mass pidi olema võrdne ühe kuupdetsimeetri vee massiga temperatuuril 4° C. Tol ajal interferentsimeetodeid ei tuntud ja hilisemad täpsemad mõõtmised näitasid, et temperatuuril 4° C on ühe kilogrammi vee ruumala 1,000028 dm^3. Seda ruumala nimetatakse liitriks. Et liitri ja kuupdetsimeetri ruumalade suhteline erinevus on väike ($3 \cdot 10^{-5}$), siis loeme nad igapäevases elus võrdseteks. Täpsetel mõõtmistel peame aga seda vahet silmas pidama.

Kehade ruumala täpse mõõtmisega on tihedalt seotud suhtelise kaalu ja tiheduse mõisted.

Suhteliseks kaaluks nimetatakse keha kaalu

P_k suhet niisuguse veehulga kaalusse P_v, mille ruumala temperatuuril 4° C võrdub keha ruumalaga:

$$\gamma = \frac{P_k}{P_v}. \qquad (1)$$

Tiheduseks nimetatakse aine ruumalaühiku massi:

$$\varrho = \frac{m}{V}\ \mathrm{g\,cm^{-3}}. \qquad (2)$$

Et ühe kilogrammi vee ruumala temperatuuril 4° C on 1,000028 dm³, siis vee tihedus temperatuuril 4° C on

$$\varrho_v = \frac{1000{,}000}{1000{,}028} = 0{,}999972\ \mathrm{g/cm^3}.$$

Korrapäratu keha ruumala on võimalik suure täpsusega määrata kaalumise teel õhus ja tuntud tihedusega vedelikus.

Kaalukaotus vees on Arhimedese seaduse järgi võrdne keha poolt välja tõrjutud veehulga kaaluga: $P_k - P_k' = P_v$. Et 1 g vee ruumala temperatuuril 4° C on 1 milliliiter (0,001 l), siis keha kaalukaotus grammides 4° C vees on arvuliselt võrdne keha ruumalaga milliliitrites. Et saada ruumala kuupsentimeetrites, peame ruumala milliliitrites korrutama milliliitri suurusega, mis on avaldatud kuupsentimeetrites. 1 ml = 1,000028 cm³ ja

$$V = (P_k - P_k')\ 1{,}000028\ \mathrm{cm^3}.$$

Siit järeldub ka, et hüdrostaatilisel kaalumisel (vt. § 43) saadav jagatis (keha kaal jagatud keha kaalukaotusega vees) on suhteline kaal. Korrutades suhtelise kaalu vee tihedusega vastaval temperatuuril, saame keha tiheduse: $\varrho = \gamma\varrho_v = \frac{m_k g}{m_v g} \cdot \frac{m_v}{V_t} = \frac{m_k}{V_t}$, kus V_t on keha poolt välja tõrjutud veehulga ruumala temperatuuril t.

Tehnikas kasutatakse veel erikaalu ja mahukaalu mõisteid.

Erikaal on tiheda (mullide ja õõnsusteta) aine ühe ruumalaühiku kaal. Et kaal oleneb kohast, siis ka erikaal muutub kohast kohta umbes tuhandiku piirides ega kuulu seega konstantide hulka, mis iseloomustavad täpselt keha füüsikalisi omadusi. Standardraskuskiirenduse kasutamisel aga muutub ka erikaal konstantseks suuruseks.

Praktikas on sageli tarvis arvutada ruumala, mille võtavad enda alla heinad, õled, kartulid, juurvili, liiv jne., kui on teada nende kaal, või ümberpöördult — tuntud ruumala järgi nende kaal. Selleks võetakse kasutusele mahukaalu mõiste. Mahukaal on 1 cm³ või 1 m³ materjali kaal, kui aine ei täida ruumi täiesti pidevalt, vaid esineb teradena, mille vahel on tühimikud.

Materjali mahukaal on seetõttu väiksem kui erikaal. Nii näiteks liivatera erikaal kõigub 2,7 ja 3,7 vahel, liiva mahukaal aga 1,5 ja 2,8 vahel. Heina mahukaal on 50—80 kG/m³, juurvilja mahukaal 600—750 kG/m³.

43. TAHKE KEHA ERIKAALU MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Keha kaalu määramine õhus ja vees ning nende andmete põhjal keha erikaalu arvutamine.

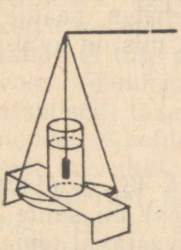
2. Töövahendid

Analüütilised kaalud, tahke keha, vihid, «sild» ja veeanum.

3. Töö käik

a) Keha kaalu määramine õhus (P) toimub eelmises töös (§ 41) antud juhiste alusel täpsusega kuni 0,1 mG.

b) Keha kaalu määramine vees (P_v). Selleks asetame üle vaekausi nn. «silla» ja paigutame sellele anuma destilleeritud veega (joon. 27). Kaalutava keha riputame peenikese traadi abil vaekausi konksu otsa ja laseme ettevaatlikult vette nõnda, et ta vees olles ei puudutaks anuma seina ega veepinda. Kui keha külge on jäänud õhumulle, tuleb need kõrvaldada kas keha liigutamisega vees või vastava pulgakese abil.



Joon. 27. Keha kaalumine vees.

Üleslükke tõttu kaalub keha vees vähem kui õhus. Kaalumine ise toimub samuti nagu õhus kaaluminegi. Ainult võnkumine sumbub vee sisehõõrdumise ja pindpinevuse tõttu kiiresti.

c) Erikaalu arvutamine. Saadud andmete (P ja P_v) põhjal arvutame keha erikaalu kui ühe ruumalaühiku kaalu.

Et keha kaal vees P_v on väiksem keha kaalust õhus $P—P_v$ grammi võrra, siis uuritava keha ruumala on $P — P_v$ cm³ ja erikaal

$$e = \frac{P}{P - P_v}.$$

d) Paranduse d. Täpsema resultaadi saavutamiseks peame arvestama ka kinnitusvahendi (traadi) kaalu, samuti tegema paranduse temperatuuri suhtes. On ju 1 cm³ võrdne 1 g vee ruumalaga ainult 4° C puhul. Seepärast ka väljatõrjutud vee kaal grammides on arvuliselt võrdne sama veehulga ruumalaga kuupsentimeetreis ainult 4° C puhul.

Olgu keha kaal õhus P ja õhu kaal keha ruumala suuruses (üleslüke) $P_õ$; siis Arhimedese seaduse põhjal keha tõeline kaal $P_t = P + P_õ$.

Samuti väljatõrjutud vee tõeline kaal

$$Q_t = P_t - P_v = P + P_{\tilde{o}} - P_v.$$

Keha poolt välja tõrjutud vee ruumala on $\frac{Q_t}{e_v} = \frac{P + P_{\tilde{o}} - P_v}{e_v}$, kus e_v on vee erikaal kaalumise temperatuuril ($t°$ C).

Jagades keha tõelise kaalu tema ruumalaga $\left(\frac{Q_t}{e_v}\right)$, leiame keha erikaalu:

$$e = \frac{(P + P_{\tilde{o}})\, e_v}{\underbrace{P - P_v}_{p} + P_{\tilde{o}}} = \frac{(P + P_{\tilde{o}})\, e_v}{p + P_{\tilde{o}}}. \qquad (1)$$

Õhu üleslükke $P_{\tilde{o}}$ leidmiseks korrutame keha ruumala $\frac{Q_t}{e_v}$ õhu erikaaluga $e_{\tilde{o}}$:

$$P_{\tilde{o}} = \frac{Q_t}{e_v}\, e_{\tilde{o}} = \frac{(p + P_{\tilde{o}})\, e_{\tilde{o}}}{e_v}, \text{ millest } P_{\tilde{o}} = \frac{p e_{\tilde{o}}}{e_v - e_{\tilde{o}}}.$$

Asetame valemis (1) $P_{\tilde{o}}$ asemele saadud väärtuse:

$$e = \frac{P + \frac{p e_{\tilde{o}}}{e_v - e_{\tilde{o}}}}{p + \frac{p e_{\tilde{o}}}{e_v - e_{\tilde{o}}}} \cdot e_v = \frac{P e_v - P e_{\tilde{o}} + p e_{\tilde{o}}}{p e_v - p e_{\tilde{o}} + p e_{\tilde{o}}} \cdot e_v =$$

$$= \frac{P e_v^2}{p e_v} - \frac{P e_{\tilde{o}} e_v}{p e_v} + \frac{p e_{\tilde{o}} e_v}{p e_v} = \frac{P e_v}{p} - \frac{P e_{\tilde{o}}}{p} + e_{\tilde{o}} =$$

$$= \frac{P}{p}(e_v - e_{\tilde{o}}) + e_{\tilde{o}} = \frac{P}{P - P_v}(e_v - e_{\tilde{o}}) + e_{\tilde{o}}.$$

Vee erikaalu kaalumistemperatuuril (e_v) leiame vastavatest tabelitest. Õhu erikaaluks toatemperatuuril võime võtta ümmarguselt 0,0012.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Defineerida tihedus ja erikaal üldjuhul.
2. Missugustes ühikutes mõõtub tihedus ja erikaal cgs-, mks- ning mkGs-süsteemis?
3. Väljendada vee, õhu, raua ja elavhõbeda tihedus ning erikaal cgs-, mks- ja mkGs-süsteemis.
4. Miks on praktikas kasutatavad erikaaluühikud $\frac{G}{cm^3}$, $\frac{kG}{dm^3}$ ja $\frac{T}{m^3}$ suuruselt võrdsed?
5. Tuletada tiheduse ja erikaalu dimensioonivalemid.
6. Näidata, missugune kolmest süsteemipärasest erikaaluühikust — $\frac{dn}{cm^3}$, $\frac{N}{m^3}$ ja $\frac{kG}{m^3}$ — on kõige suurem.

7. Väljendada erikaaluühik $1\frac{\mu G}{\mu^3}$ cgs-süsteemi erikaaluühikutes.
8. Kuidas oleneb keha erikaal (tihedus) temperatuurist?
9. Sõnastada Arhimedese printsiip.

44. VEDELIKU ERIKAALU MÄÄRAMINE AREOMEETRI JA MOHRI KAALUDEGA

1. Tööülesanne

Areomeetrite ja Mohri kaalude ehituse ja kasutamisega tutvumine. Antud vedeliku erikaalu määramine areomeetri ja Mohri kaaludega.

2. Töövahendid

Mitmesugused areomeetrid, Mohri kaalud koos lisaosadega, sügavad klaasanumad uuritavate vedelike jaoks, uuritavad vedelikud ja termomeeter.

3. Töö käik

a) Vedeliku erikaalu saab määrata vedelikku asetatud tahke keha kaalukaotuse põhjal. Väikese täpsusega ja kiireks erikaalu määramiseks kasutatakse areomeetreid. Areomeeter on suletud klaastoru, mille alumine osa on täidetud seatina või elavhõbedaga (mispärast?) ja ülemine osa varustatud skaalaga. Vedelikku asetatud areomeeter jääb püsti ujuma, vajudes nii sügavale, et väljatõrjutud vedeliku kaal võrdub areomeetri kaaluga.

Kergemas vedelikus vajub areomeeter sügavamale, raskemas aga jääb pinnale lähemale.

Areomeetri skaala on ehitatud nii, et parajasti vedeliku pinna tasemel asetsev jaotis näitabki otsitavat erikaalu.

Sageli, eriti tehnikas, on aga kasutatavad skaalad kaliibritud nn. Baumé kraadides, mille puhul skaala jaotus on ühtlane.

Tarvitatavama Baumé skaala kraadide (Bé°) seos erikaaluga on järgmine:

kui vedeliku erikaal $e > 1$, siis

$$e = \frac{144{,}30}{144{,}30 - \text{Bé}^\circ} \text{ ja Bé}^\circ = 144{,}30 - \frac{144{,}30}{e};$$

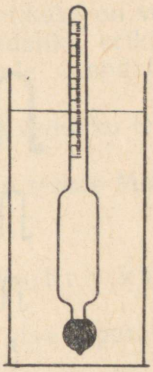
kui $e < 1$, siis

$$e = \frac{144{,}30}{144{,}30 + \text{Bé}^\circ} \text{ ja Bé}^\circ = \frac{144{,}30}{e} - 144{,}30.$$

Baumé skaala nullpunktiks on valitud areomeetri seis puhtas vees. 10°Bé vastab areomeetri seisule 10-protsendilises keedusoola-

lahuses. Skaalat jätkatakse ühtlaste jaotustega ülespoole nulli ja allapoole 10°.

Eriotstarbeiks ehitatud areomeetreil on ka skaala vastavalt jaotatud. Nii oleneb alkoholi ja vee segu erikaal vee ja alkoholi suhtelisest hulgast segus. Seega võib segu alkoholisisalduse mõõtmiseks kasutada areomeetrit, mille skaalale on kantud alkoholi ruumala või kaalu protsendid segus. Sel juhul nimetatakse areomeetrit alkoholomeetriks. Suhkrulahuse kontsentratsiooni mõõtmiseks kasutatavate areomeetrite skaalad kaliibritakse suhkru protsentides, piima rasvasisalduse mõõtmiseks kasutatavate areomeetrite skaalad rasva protsentides jne.



Joon. 28. Areomeeter mõõdetavas vedelikus.

Tuleb silmas pidada, et areomeeter on vastava vedeliku omaduste määramiseks korrektsioonideta kasutatav ainult areomeetrile märgitud temperatuuril.

Tegelikuks mõõtmiseks valame vedeliku küllalt sügavasse läbipaistvasse anumasse ja asetame puhta ning kuiva areomeetri vedelikku ujuma. Jälgime, et areomeetri vedelikus oleva osa külge ei jääks õhumulle ja vedelikust välja ulatuva osa külge vedelikupiisku.

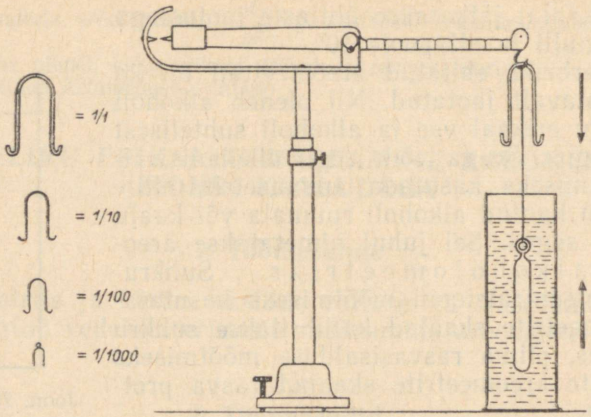
Kui need tingimused on täidetud, loeme skaalalt vedeliku pinna alt areomeetri näidu, vaadates nii, et vedelikurõngas toru ümber taandub peaaegu sirgeks kriipsuks.

b) Mohri kaalude peamiseks osaks on kaalukang, mille ühes otsas on teravikuga lõppev koormis ja teises otsas ripub seda tasakaalustav keha, nn. sukelduja.

Riist tuleb lauale seada nõnda, et alusel olev reguleerimiskruvi asetseks kaalukangi võnkumistasandis. Seejärel tuleb reguleerimiskruvi abil seada kangi teraviku ots vastakuti alusega ühenduses oleva teravikuga, kui nendevaheline erinevus on väike (mõni mm). Kui erinevus tasakaaluolekust on suur, tuleb pöörduda praktikumi juhendaja poole.

Kaalukangi teiseks pooleks on ühtlane varb, mis on jaotatud kümneks võrdseks osaks. Jaotuskohtadele asetatakse tasakaalustamiseks ratsurid, mis on suuruselt kolme liiki: kõige suurema kaal (neid on 2) võrdub ligikaudselt vee kaaluga sukelduja ruumala suuruses, järgmine on sellest kümme korda kergem ja veel järgmine on eelmisest 10 ehk esimesest 100 korda kergem. Täpsemate kaalude puhul kasutatakse veel ratsureid, mis on kõige raskemast 1000 korda kergemad. Seega suhtuvad ratsurite kaalud nagu 1 : 10 : 100 : 1000.

Võtame suurima ratsuri kaalu uueks tungiühikuks ja väljendame sukelduja tasakaalustamisel esinevad tungid nendes nn. ratsuriühikutes (rü). Seega suurima ratsuri kaal on 1 rü. Kui



Joon. 29. Mohri kaalud.

aga asetame suurima ratsuri näiteks kaalukangi seitsmendale jaotisele, siis on tema mõju tungimomendi mõiste põhjal samaväärne 0,7 rü mõjuga kangi kümnendale jaotisele ($1 \cdot 7 = 0{,}7 \cdot 10$). Kümnendikratsuri mõju kangi kolmandale jaotisele on vastavalt samaväärne 0,03 rü mõjuga kümnendale jaotisele jne.

Sel viisil on hõlpus kõigi tasakaalustamisel kangi jaotistele asetatavate ratsurite mõju taandada kümnendale jaotisele, mille otsas ripub sukelduja. Kui oleme ratsuritega tasakaalustanud üleslükke, siis oleme sellega mõõtnud ka üleslükke suuruse R ratsuriühikutes.

Vaatame nüüd, kuidas on võimalik kasutada Mohri kaalusid vedelike erikaalude ja tiheduste võrdlemiseks.

Olgu sukelduja ruumala V, esimese vedeliku erikaal e, tihedus ϱ ja üleslüke U, teise vedeliku erikaal vastavalt e_1, tihedus ϱ_1 ja üleslüke U_1. Kaalukangi tasakaalu korral võrdub nende vedelike üleslüke ratsurite kogumõjuga kümnendale jaotisele, mida tähistame vastavalt tähtedega R ja R_1.

Et vedeliku üleslüke võrdub erikaalu ja sukelduja ruumala korrutisega, siis

$$\frac{R}{R_1} = \frac{U}{U_1} = \frac{eV}{e_1 V} = \frac{e}{e_1},$$

millest

$$e = e_1 \frac{R}{R_1} = \frac{e_1}{R_1} R. \qquad (1)$$

Tegurit $\frac{e_1}{R_1} = k$ nimetatakse Mohri kaalude korrektsioonitegu r i k s. On korrektsioonitegur (k) ühe vedeliku suhtes määratud, saame kõigi teiste vedelike erikaalu määrata valemist

$$e = kR, \qquad (2)$$

kus R on vastav ratsurite lugem, mis on taandatud kümnendale jaotisele. Kui $R_1 = U_1 = 1$ rü ja $e_1 = 1$ (teiseks vedelikuks on vesi temperatuuril +4° C), siis $e = R$, s. o. esimese vedeliku erikaal võrdub arvuliselt kaalukangi kümnendale jaotisele taandatud ratsurite lugemiga.

Täpsemate mõõtmiste puhul peame arvestama ka vedeliku temperatuuri, sest erikaal oleneb temperatuurist.

Et ainete erikaalud on võrdelised tihedustega, siis saame Mohri kaaludega määrata ka vedelike tihedust $\left(\varrho = \frac{e}{g}\right)$.

c) Vedeliku erikaalu määramine Mohri kaaludega toimub järgmiselt.

Kõigepealt seatakse kaalud peenikese traadi otsa riputatud sukeldujaga tasakaalu õhus.

Siis lastakse sukelduja destilleeritud vette ja üleslükke tasakaalustamiseks asetatakse suurim ratsur otsmisele jaotisele. Kui sukelduja ruumala on õigesti valitud, siis peaksid kaalud olema tasakaalus. Juhul aga, kui kümnendale jaotisele asetatud suurim ratsur ei tasakaalusta vette lastud sukelduja üleslüket, tasakaalustatakse ratsurite vastava asetamisega sukelduja üleslüke ja registreeritakse ratsurite asetusele vastav arv.

Edasi lastakse sukelduja määratavasse vedelikku, tasakaalustatakse kaalud ratsuritega ja registreeritakse jälle ratsurite asetusele vastav arv. Kasutades saadud andmeid, arvutatakse valemi (1) põhjal otsitav erikaal.

Tõestada, et sel viisil saadud tulemus ühtib tulemusega, mis saadakse juhul, kui suurima ratsuri kaal võrdub sukelduja üleslükkega vees!

Ratsurite käsitsemine on analoogiline vihtide käsitsemisega kaalumisel. Kui antud vedeliku erikaal on suurem kui 1, siis asetame ühe suurima ratsuri kangi otsmisele jaotisele ja seejärel proovime, kuhu sobib teine suurim ratsur. Kui näiteks selle ratsuri seitsmendale jaotisele asetamisel langeb kaalukang alla, kuuendale jaotisele asetamisel aga tõuseb üles, siis oleme kindlad, et otsitavas erikaalu väärtuses on 6 kümnendikku.

Nüüd võtame järgmise väiksema ratsuri ja toimime temaga samuti nagu suurima ratsuriga. Saame otsitava arvu sajandikud. Kolmas ratsur annab tuhandikud.

Kui antud vedeliku erikaal on väiksem kui 1, jääb suurima ratsuri asetamine otsmisele jaotisele ära, muus osas aga on menetlus endine.

Sukelduja külge jäänud õhumullikesed kõrvaldame vastava pulgakese abil või sukelduja liigutamisega vedelikus.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas kontrollida, kas ratsurite kaalusuhted (1 : 10 : 100) on õiged?
2. Defineerida pöördemoment ja sõnastada momentide lause.
3. Missuguse täpsusega (absoluutne ja relatiivne viga) on võimalik määrata erikaalu Mohri kaaludel?

4. Näidata, et ainete erikaalude suhted võrduvad nende tiheduste suhtega.
5. Kuidas teha erikaalu määramisel parandust olenevalt temperatuurist?
6. Näidata, et valemi (2) parem pool omab erikaalu nimetust.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 140.
Putilov, Füüsika I, § 55.

45. ÕHURÕHU MÕÕTMINE BAROMEETRI ABIL

1. Tööülesanne

Baromeetri ehitusega tutvumine. Õhurõhu suuruse määramine elavhõbedasamba millimeetrites (torrides) ühes parandustega.

2. Töövahendid

Elavhõbebaromeeter ja termomeeter.

3. Töö käik

a) Üldine tutvumine riistaga (baromeetri toru, skaala, noonius, lugemi-mikroskoop, valgustusseade, termomeeter).
b) Noonius, selle nihutamine (üldine ja mikromeetriline) ning lugemi täpsus.
c) Skaala nihutamine ja kinnitamine ning nullpunkti paigaleseadmine.
d) Lugemi-mikroskoobi teravuse reguleerimine. Silmas pidada, et kujutised on ümber pööratud!
e) Baromeetri toru vertikaalasendi kontrollimine loodi abil.
f) Lugemi-mikroskoobi niitide lõikepunkti nihutamine puuteasendisse elavhõbeda meniskiga ja skaalalt vastava lugemi määramine. Seejuures hinnatakse täismillimeetrite arv kuni nooniuse nullini otseselt silmaga ja millimeetri osade arv nooniuse abil.
g) Noonius ära liigutada, nullpunkti kontrollida ja uuesti vaadelda. Teha kokku 3 sellist vaatlust ja määrata kõigi nende vaatluste aritmeetiline keskmine. Tulemused paigutada tabelisse järgmiselt:

Vaatluse nr.	mm Hg	Temperatuur
1.	.....	.....
2.	.....	.....
3.	.....	.....
Keskmine	.....	.....

h) Keskmise vaatlustulemuse redutseerimine temperatuurile 0° C, s. o. parandus elavhõbeda ja skaala paisumise suhtes.

Baromeetriga mõõdame õhurõhu suurust. Elavhõbedasamba kõrguse abil rõhku hinnates peame aga silmas pidama, et ühe ja sama kõrgusega elavhõbedasamba raskus ei ole alati ühesugune. Oleneb ju keha raskus (tung Maa poole) koha geograafilisest laiusest ja kõrgusest merepinnast. Samuti oleneb elavhõbedasamba raskus ning mõõtühikute pikkus skaalal nende temperatuurist.

Neil põhjustel tuleb kõik vaatlustulemused võrreldavuse otstarbel redutseerida (taandada) nn. normaaltingimustele. Baromeetrivaatluste puhul loetakse normaaltingimusteks geograafiline laius 45° N, kõrgus merepinnast 0 m ja temperatuur 0° C.

Samas kohas toimetatud vaatluste tulemuste võrdlemisel kaob vajadus teha parandust geograafilise laiuse ja kõrguse suhtes merepinnast, küll aga on vajalik parandus temperatuuri suhtes.

Parandusi kapillaarsuse ja elavhõbedaauru rõhu suhtes Torricelli tühjuses nende väiksuse tõttu ei arvestata.

Olgu elavhõbedasamba alus 1 cm^2, kõrgus 0° C puhul H_0, t° C puhul H_t ja ruumpaisumiskoefitsient $\gamma = 0{,}000182$. Siis nende sammaste ruumalad V_0 ja V_t võrduvad arvuliselt sammaste kõrgustega. Seetõttu

$$\frac{H_t}{H_0} = \frac{V_t}{V_0} = \frac{V_0(1+\gamma t)}{V_0} = 1 + \gamma t,$$

millest

$$H_0 = \frac{H_t}{1+\gamma t} \approx H_t(1-\gamma t) = \underline{H_t - \gamma t H_t}.$$

Siit näeme, et elavhõbeda temperatuurist tingitud paranduseks on $\gamma t H_t$, mis tuleb lahutada mõõtmistulemusena saadud elavhõbedasamba kõrgusest H_t.

Olgu skaala joonpaisumiskoefitsient α, mis näiteks valgevase puhul on 0,000019. Kui skaala jaotusühik on õige 0° C puhul, siis t° C puhul on ta juba pisut pikem. Pikema ühikuga mõõtes aga saame mõõtmistulemusena arvu, mis on õigest arvust väiksem. Seepärast tuleb teha parandus ja arvutada, missuguse elavhõbedasamba kõrguse lugemi saaksime, kui skaala temperatuur oleks vaatluste toimetamise ajal 0° C. Et 0° C puhul õigel pikkusühikul on t° C puhul pikkus $1 + \alpha t$ ning et ühe ja sama pikkuse mõõtmisel on lugemi suurus pöördvõrdeline ühiku suurusega, siis

$$\frac{H_t}{H_0} = \frac{1}{1+\alpha t}, \text{ millest } H_0 = H_t(1+\alpha t) = \underline{H_t + \alpha t H_t}.$$

Mõlemat parandust arvestades saame temperatuuriparanduse jaoks valemi

$$H_0 = H_t - \gamma t H_t + \alpha t H_t = H_t - (\gamma - \alpha) t H_t.$$

Saadud valemi abil arvutada oma vaatluste (H_t) põhjal H_0!

4. Täiendavaid küsimusi

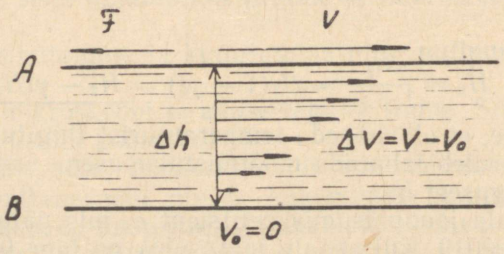
1. Mis vahe on rõhumise ja rõhu vahel?
2. Defineerida rõhuühikud $\frac{dn}{cm^2}$, torr, füüsikaline ja tehniline atmosfäär, baar, millibaar. Missugused on nende tähised?
3. Kuidas toimetada ümberarvutusi torr $\rightleftarrows \frac{dn}{cm^2}$, at $\rightleftarrows$ At, mb $\rightleftarrows$ mm Hg?
4. Miks kasutatakse baromeetris vedelikuna elavhõbedat?
5. Kuidas oleneb keha raskus koha geograafilisest laiusest ja kõrgusest merepinnast?
6. Miks on aneroidbaromeetri karbist õhk osaliselt välja pumbatud?

5. Kirjandust

L a n g jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 143 ja 144.

46. SISEHÕÕRDUMINE

Kui üks tahke keha liigub mööda teise tahke keha pinda, siis tekib seda liikumist takistav h õ õ r d u m i s t u n g. Analoogiline nähtus esineb ka vedelikes ja gaasides, kui üks vedeliku või gaasi kiht liigub sama aine teise kihi suhtes (joon. 30). Vedelikukihi



Joon. 30. Skeem sisehõõrdumistungi mõiste selgitamiseks.

takistavat mõju temaga kokku puutuva teise vedelikukihi liikumisele nimetataksegi antud vedeliku s i s e h õ õ r d u m i s e k s ehk v i s k o o s s u s e k s (püdeluseks). Sama kehtib ka gaaside kohta.

Olgu näiteks rööpsete plaatide A ja B (joon. 30) vahe täidetud mingi vedelikuga, mis märgab neid plaate. Liikugu plaat A noolte suunas kiirusega v, kuna plaat B on paigal ($v_0 = 0$). Adhesiooni tõttu plaatide külge kleepunud vedelikukihid liiguvad sama kiirusega kui vastavad plaadid. Seega plaadi A küljes olev vedelikukiht liigub kiirusega v. Sisehõõrdumise mõjul tõmbab ta endaga kaasa naaberkihti, see järgmist jne. kuni plaadini B. Plaadi B

küljes olev vedelikukiht on paigal nagu plaat isegi. Vedelikukihtide kiirused vähenevad seejuures võrdeliselt kaugusega plaadist A. Seda kiiruse suuruse muutumist iseloomustab nn. kiiruse suuruse gradient, s. o. kiiruse suuruse muutus 1 pikkusühiku kohta, kusjuures pikkust tuleb mõõta risti kiiruse sihiga. Antud juhul on kiiruse gradiendi suuruseks $\frac{\Delta v}{\Delta h}$.

Vedeliku sisehõõrdumise mõjul on plaadi A liikumine pidurdatud: me ütleme, et plaadile on rakendatud sisehõõrdumistung F. Kui tahame, et plaat liiguks konstantse kiirusega v, siis peame temale rakendama sisehõõrdumistungile võrdvastupidise tungi.

Katsed näitavad, et sisehõõrdumistungi suurus oleneb vedeliku ainest ja temperatuurist. Seda iseloomustab nn. sisehõõrdumiskoefitsient η. Peale selle on sisehõõrdumistungi suurus võrdeline liikuva kihi pinna suurusega S ja kiiruse gradiendiga $\frac{\Delta v}{\Delta h}$. Matemaatiliselt väljendab seda Newtoni valem

$$F = \eta S \frac{\Delta v}{\Delta h}. \qquad (1)$$

Üldjuhul, kui vedelikukihtide kiirus ei muutu ühtlaselt, ei ole kiiruse gradient konstantne. Sel juhul väljendub kiiruse gradiendi suurus vastavate diferentsiaalide kaudu $\left(\frac{dv}{dh}\right)$ ja valem (1) omandab kuju

$$F = \eta S \frac{dv}{dh}. \qquad (2)$$

Newtoni valemist järeldub, et kui näiteks $S = 1\ \text{cm}^2$, $\Delta v = v - v_0 = 1\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ ja $\Delta h = 1$ cm, siis $F = \eta$, s. o. sisehõõrdumiskoefitsient η võrdub arvuliselt tungi suurusega, mis on vajalik vedelikukihi 1 cm^2 suuruse pinna liikumas hoidmiseks teise, temaga paralleelse ja temast 1 cm kaugusel oleva vedelikukihi pinna suhtes kiiruste vahega $1\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

Valemist (1) saame ka sisehõõrdumiskoefitsiendi η mõõtühiku ja selle tähise. Kui $F = 1$, $S = 1$, $\Delta v = 1$ ja $\Delta h = 1$, siis ka $\eta = 1$. cgs-süsteemis $F = 1$ dn, $S = 1\ \text{cm}^2$, $\Delta v = 1\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ ja $\Delta h = 1$ cm. Sellele vastavaks sisehõõrdumiskoefitsiendi mõõtühikuks on 1 puaas. Seega sisehõõrdumiskoefitsient on 1 puaas (P), kui tung 1 dn suudab hoida vedelikukihi 1 cm^2 suurust pinda liikumas teise, temaga paralleelse ja temast 1 cm kaugusel oleva vedelikukihi pinna suhtes konstantse kiiruste vahega $1\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

Paigutades sisehõõrdumiskoefitsiendi ühiku puaasi tähise asemele x, saame valemis (1) esinevate suuruste mõõtühikute tähiste vahel seose

$$\mathrm{dn} = x \cdot \mathrm{cm}^2 \cdot \left(\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}} : \mathrm{cm}\right),$$

millest

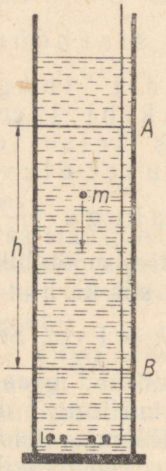
$$x = \frac{\mathrm{dn} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{cm}^2} = \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}} = \underline{\mathrm{g\,cm^{-1}\,s^{-1}}}.$$

Kirjeldatud sisehõõrdumist ehk viskoossust nimetatakse dünaamiliseks viskoossuseks. Dünaamilise viskoossuse suhet vedeliku tihedusega nimetatakse kinemaatiliseks viskoossuseks. Kinemaatilise viskoossuse mõõtühiku tähise saame, kui jagame sisehõõrdumiskoefitsiendi mõõtühiku tähise tiheduse mõõtühiku tähisega. Seega cgs-süsteemis on kinemaatilise viskoossuse ühiku stouksi (St) tähiseks $\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}} : \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3} = \mathrm{cm}^2\ \mathrm{s}^{-1}$, mks-süsteemis vastavalt $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$.

47. VEDELIKU SISEHÕÕRDUMISKOEFITSIENDI MÄÄRAMINE STOKES'I MEETODIL

1. Tööülesanne

Sisehõõrdumise mõiste selgitamine. Glütseriini sisehõõrdumiskoefitsiendi määramine Stokes'i meetodil.



Joon. 31. Kuuli langemine vedelikus.

2. Töövahendid

Kõrge klaasanum vedelikuga (glütseriin), sekundomeeter, teraskuulikesed ja mikromeeter.

3. Töö käik

Võtame glütseriiniga täidetud kõrge klaassilindri (joon. 31). Laseme väikese teraskuulikese vedelikku. Vedelik märgab kuuli ja kuuli langemisel toimub kuuli külge kleepunud õhukese vedelikukihi liikumine sama vedeliku suhtes, mitte aga kuuli pinna liikumine selle vedeliku suhtes. Algul langeb kuulike kiirenevalt, kuid varsti muutub liikumine ühtlaseks. Seda põhjustab asjaolu, et vedeliku takistus langeva kuuli liikumisele suureneb ühes kuuli liikumiskiiruse suurenemisega. Seetõttu saabub moment, kus vedeliku takistus võrdub kuuli raskusega,

s. o. kuulisse mõjuvate tungide resultant on null ning kuul liigub edasi ühtlaselt. Olgu kuuli raadius r, ühtlase liikumise kiirus v ja vedeliku sisehõõrdumiskoefitsient η. Keskkonna takistust F_1 kuuli liikumisele vedelikus väljendab siis nn. Stokes'i valem

$$F_1 = 6\pi r v \eta. \qquad (1)$$

Kuulisse mõjub ülalt alla tema raskus düünides $P = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \delta g$, kus δ on kuuli tihedus, r kuuli raadius ja g raskuskiirendus. Sellest tuleb lahutada vedeliku (käesoleval korral glütseriini) üleslüke Arhimedese seaduse alusel $\frac{4}{3}\pi r^3 \varrho g$, kus ϱ on vedeliku tihedus. Järelikult ülalt alla mõjub tung

$$F_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \delta g - \frac{4}{3}\pi r^3 \varrho g = \underline{\frac{4}{3}\pi r^3 (\delta - \varrho) g}. \qquad (2)$$

Et kuuli ühtlase liikumise korral $F_1 = F_2$, siis, võrrandades valemid (1) ja (2), võime kirjutada:

$$6\pi r v \eta = \frac{4}{3}\pi r^3 (\delta - \varrho) g,$$

millest

$$\eta = \underline{\frac{2r^2 (\delta - \varrho) g}{9v}}. \qquad (3)$$

Valemist (3) järeldub η määramise viis r, δ, ϱ, g ja v kaudu. δ, ϱ ja g leiame tabelitest, r määrame mikromeetriga ja v otseselt katsest saadud langemistee h ja vastava aja t kaudu.

Katse teostamisel märgime ühtlase langemise vahemiku h nõnda, et selle vahemiku ülemisel piiril oleks kuulikese kiirus juba jääv. Ülemisel piiril sekundomeetrit käima lastes ja alumisel peatades saame ajavahemiku t, millest $v = \frac{h}{t}$.

Ühtlase langemise kiirus määrata aritmeetilise keskmisena vähemalt kolmest vaatlusest. Allalangenud kuulid välja võtta magnetiga või sõela ülestõstmisega. Töö lõpul kõik kuulikesed välja võtta, puhastada ja karpi panna. Kontrollida, kas kõik on alles.

Asetades valemisse (3) vastavad arvsuurused, arvutame η väärtuse. Missugustes ühikutes tuleb väljendada r, δ, ϱ, g ja v, et saada η puaasides?

4. Täiendavaid küsimusi

1. Millest oleneb rõhk vedeliku sees?
2. Miks peab eelmises katses kasutatav anum olema kõrge ja küllalt suure läbimõõduga?

3. Kas oleks võimalik korraldada eelmist katset nõnda, et kuulikesel lastakse liikuda alt üles (põhjast pinnale)?
4. Tuletada sisehõõrdumiskoefitsiendi ühiku nimetus mks-süsteemis.
5. Mitu korda on mks-süsteemi sisehõõrdumiskoefitsiendi ühik suurem vastavast cgs-süsteemi ühikust?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 154 ja 155.
Putilov, Füüsika I, §§ 59 ja 64.

48. VEDELIKU SISEHÕÕRDUMISKOEFITSIENDI MÄÄRAMINE POISEUILLE' MEETODIL

1. Tööülesanne

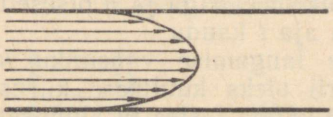
Tutvumine vedeliku voolamisega torus ja selle olenevusega sisehõõrdumiskoefitsiendist. Sisehõõrdumiskoefitsiendi määramine.

2. Töövahendid

Kapillaartoru, mis on ühendatud temast kõrgemal asetseva vedelikureservuaariga, sekundomeeter, mensuur, mõõtjoonel, uuritav vedelik ja termomeeter.

3. Töö käik

a) Sisehõõrdumise mõiste on selgitatud paragrahvis 46.
b) Vedeliku voolamine torus ei toimu igas kohas ühesuguse kiirusega: kõige suurem on kiirus toru keskel, kõige väiksem toru seinte läheduses. Näitlikult kujutab seda joonis 32, kus voolamiskiirusi näitavad vastava pikkusega nooled. Toru seintega otseselt kokku puutuv kiht on paigal. Järgmine kiht libiseb mööda esimese kihi pinda jne. Kogu torus liikuvat vedelikku võime seega kujutleda koaksiaalsete (samateljeliste) silindriliste vedelikukihtidena, mis libisevad üksteise suhtes ja millede liikumist pidurdab sisehõõrdumine. Mida suurem on sisehõõrdumine, seda aeglasem on vedeliku voolamine torus. Peale selle oleneb vedeliku voolamiskiirus veel toru jämedusest, toru pikkusest ja rõhust, mille mõjul vedelik voolab.



Joon. 32. Vedeliku voolamise kiirus torus.

Matemaatilise seose nende suuruste vahel andis prantsuse arst Poiseuille valemiga

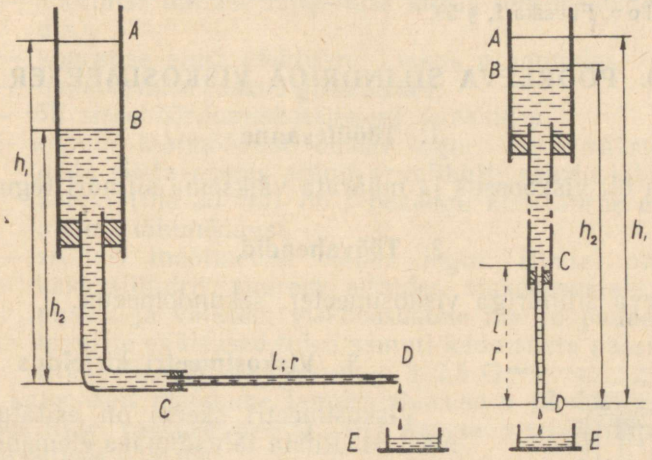
$$V = \frac{\pi p r^4 t}{8 l \eta}, \qquad (1)$$

kus V on torust pikkusega l cm ja raadiusega r cm t sekundi jooksul läbivoolanud vedeliku hulk kuupsentimeetrites, p rõhk düünides ruutsentimeetri kohta ja η sisehõõrdumiskoefitsient puaasides.

Valemist (1) on hõlpus määrata η, kui kõik teised suurused on teada:

$$\eta = \frac{\pi p r^4 t}{8 l V} \text{ puaasi.} \qquad (2)$$

c) Valemist (2) ja jooniselt 33 selgub katse käik näiteks vee sisehõõrdumiskoefitsiendi määramisel. Selleks valame katseriista anumasse vett kuni nivooni A. Veesamba rõhu mõjul hakkab vesi



Joon. 33. Seadised sisehõõrdumiskoefitsiendi määramiseks.

kapillaartoru lahtisest otsast D välja voolama (tilkuma). Vaatluse algul märgime nivoo A asendi ja sellele vastava ajamomendi. Laseme veel voolata seni, kuni nivoo langeb anumas näiteks B-ni. Siis registreerime jälle ajamomendi ja mõõdame mensuuriga anumasse E voolanud vee ruumala V.

Rõhu p määramiseks mõõdame nivoode A ja B kõrgused kapillaartoru otsa suhtes h_1 ja h_2 ning võtame neist aritmeetilise keskmise $h = \frac{h_1 + h_2}{2}$. Rõhk $p = h\varrho g \frac{\text{dn}}{\text{cm}^2}$, kui nivoo keskmine kõrgus on mõõdetud sentimeetrites, vedeliku tihedus ϱ ühikutes $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ja raskuskiirendus g ühikutes $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$. Et vee puhul $\varrho = 1$, siis $p = hg$. Kapillaartoru raadius on harilikult antud koos riistaga.

Asetades valemisse (2) vastavad arvud ja toimetades valemis näidatud tehted, saame η väärtuse puaasides. Et vedeliku sisehõõrdumine suurel määral oleneb temperatuurist, siis tuleb registreerida ka vedeliku temperatuur katse ajal.

Muuta vee temperatuur kõrgemaks või madalamaks ja korrata katset. Võrrelda saadud tulemusi.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Temperatuuri tõusmisel vedelike sisehõõrdumine väheneb, gaaside sisehõõrdumine aga suureneb. Kuidas seda seletada?
2. Kuidas saavutame valemi mõlema poole dimensiooni võrdsuse, kui määrame vee rõhu valemiga $p = hg$?
3. Miks kasutatakse vedeliku väljajuhtimiseks just kapillaartoru?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 154. ja 155.
Putilov, Füüsika I, § 59.

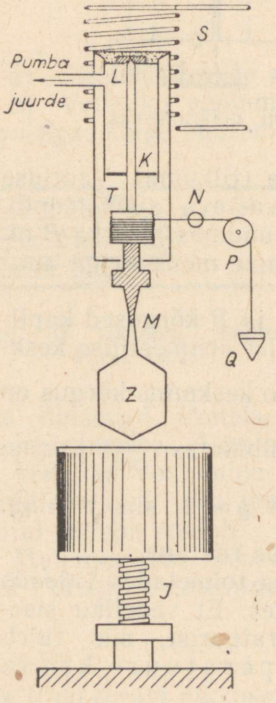
49. PÖÖRLEVA SILINDRIGA VISKOSIMEETER

1. Tööülesanne

Mõõta õli viskoossus ja määrata väiksema silindri tegur *k*.

2. Töövahendid

Pöörleva silindriga viskosimeeter, sekundomeeter.



Joon. 34. Pöörleva silindriga viskosimeetri skeem.

3. Viskosimeetri kirjeldus

Viskosimeetri skeem on esitatud joonisel 34. Riista tähtsaimaks elemendiks on silinder *Z*, mis saab pöörelda vertikaalse telje ümber. Telje laagriks *L* on kõvast mineraalist lihvitud koonus, millesse toetub telje otsa teravik. Silindri telg tõstetakse üles kas õhu hõrendamise teel kettast *K* ülalpool olevas ruumis või solenoidi *S* abil, lastes sellest läbi vastava tugevusega voolu, nii et telje teravik rõhuks laagrit minimaalse tungiga. Telje keskmises osas asub soontega silinder *T* niidi pealekerimiseks. Sellelt silindrilt tulev niit läbib pidurnäpitsa *N*, läheb üle ploki *P* ja on koormatud raskusega *Q*, mis paneb telje pöörlema. Raskus *Q* langeb ümmarguses rennis, millele on kantud skaala sentimeetrites. Mõõdetav õli asub silindrilises purgis, mida saab jalgkruvi *J* abil tõsta nii, et silinder *Z* oleks kuni märgini *M* vedelikus.

Kui vabastame näpitsa *N*, hakkab koormis langema ja paneb silindri pöörlema. Teatava pöörlemiskiiruse puhul tasakaalustab sisehõõrdumistung langeva koormise raskuse ja liikumine muutub

ühtlaseks. Laminaarse voolamise korral silindri ümber on koormise ühtlase langemise kiirus pöördvõrdeline sisehõõrdumiskoefitsiendiga, võrdeline koormise efektiivse raskusega, oleneb silindri Z mõõtmetest ja õlianuma läbimõõdust. Seega võime kirjutada:

$$v = \frac{fk}{\eta}(q + Q),$$

kus v — koormise ühtlase langemise kiirus sentimeetrites sekundis,
q — koormise aluse efektiivne raskus grammides,
Q — lisakoormise raskus grammides,
η — õli sissehõõrdumiskoefitsient puaasides,
f — anuma läbimõõdust olenev tegur, mille väärtus tuleb leida riista passis antud graafikult; suurte läbimõõtude korral (üle 30 cm) on f peaaegu konstantne ega olene anuma läbimõõdust,
k — silindri mõõtmetest olenev tegur. Riistal on kaasas kaks silindrit: suurem silinder viskoossustele alla 10 puaasi ja väiksem viskoossustele üle 10 puaasi. Nende tegurite väärtused tuleb samuti leida riista passist. Riista lisavihtide raskus on à 2,5 G.

Kui katseliselt mõõdame langemiskiiruse v ja määrame koormise efektiivse raskuse $q + Q$, siis saame sisehõõrdumiskoefitsiendi arvutada valemist

$$\eta = \frac{fk}{v}(q + Q) = fk\frac{t}{s}(q + Q),$$

kus s on koormise ühtlase langemise kõrgus ja t langemise aeg.

4. Töö käik

Riista alusel oleva vesiloodi abil seatakse riist loodi, s. o. silindri telg vertikaalseks ja samuti vertikaalseks ka langemisrenn, sest vastasel korral oleks takistatud nii silindri pöörlemine kui ka raskuse langemine rennis (kui raskus puutuks vastu renni seina).

Kontrollitakse silindri Z pinna puhtust, puhastades teda vajaduse korral paberi ja lapiga. Siis keeratakse silinder telje külge. Silindri ja tema teljega tuleb väga ettevaatlikult ja õrnalt ümber käia, et neid mitte painutada ja mitte vigastada õrna ning täpset laagrit.

Tõstes silindri telge ülespoole ja vajutades teda kergelt vastu laagrit, keritakse ettevaatlikult niit silindrile T ja lastakse näpits N kinni.

Nüüd tõstetakse õlianum jalgkruvi J abil üles, nii et õli pind

oleks 1—2 mm üle märgi *M*. Seejuures tuleb jälgida, et silindrilise nõu telg ühtiks aluse tsentriga. Selleks on alusel kontsentrilised ringid.

Järgmiseks lastakse käima õhupump või lülitatakse vool solenoidi ja tõstes kergelt ühe käega silindri telge, reguleeritakse teise käega voolu nii, et silinder vaevu püsiks üleval, s. o. et ta rõhuks laagrit minimaalse tungiga. Nüüd tuleb õli pinna kõrgus lõplikult reguleerida märgi *M* kõrgusele ja riist on mõõtmiseks valmis.

Mõõtmiseks võetakse sekundomeeter paremasse kätte. Vasaku käega päästetakse näpits *N* lahti. Lastakse koormisel langeda 10—15 cm. Sellel pikkusel muutub langemine ühtlaseks ja nüüd võib langemise kiirust määrama hakata. Langemisrennile on kantud skaala sentimeetrites. Mõõdame sekundomeetriga aja, mille vältel koormis langes skaala jaotisest «0» või «10» jaotiseni «100». Et täpselt määrata momente, millal koormis need jaotised läbib, peame parallaksivea vältimiseks hoidma silma renni vastava jaotise kohal.

Kui sekundomeeter on seisma pandud, peatame kohe ka silindri, vajutades näpitsa kinni. Järgmiseks kirjutame üles langemistee pikkuse ja vastava aja. Paneme sekundomeetri ära. Võtame ühe käega ettevaatlikult silindri teljest kinni, vabastame näpitsa ja kerime niidi uuesti üles. Peame jälgima, et üleskerimisel ja eriti langemisel koormis ei pendeldaks, mille tagajärjel ta võiks puutuda vastu renni. Kui koormis pärast üleskerimist pendeldab, tuleb ta ettevaatlikult seisma jätta. Samuti tuleb jälgida, et niit ei puutuks kusagile vastu ja jääks silindrile ühekordse kihina.

Nii teeme ühe ja sama lisakoormisega viis vaatlust. Nendest viiest vaatlusest leiame kiiruse keskmise väärtuse. Mõõtmisvea amplituud ei tohi ületada 1%.

Et koormise aluse efektiivne raskus q on teadmata (ta on laagri hõõrdumise võrra väiksem kui aluse kaal), siis paneme juurde uue lisakoormise ja määrame viie vaatluse alusel jälle langemiskiiruse. Nüüd on meil kaks võrrandit kahe tundmatuga η ja q ning neist võrranditest saame mõlemad tundmatud arvutada.

Tulemused protokollime järgmise tabeli kujul:

1. anuma läbimõõt $d = \ldots$ cm, $f = \ldots$,
2. suure silindri tegur $k = \ldots$,
3. vedeliku temperatuur $t^\circ\,\mathrm{C} = \ldots$ (toatemperatuur),
4. langemise kõrgus $h = a - b = \ldots$ cm.

Suurtel kiirustel aja määramise täpsus väheneb. Langemise kestus ei tohi olla palju alla 20 sekundi. Seetõttu on soovitatav suure silindri puhul lisakoormisi võtta mitte üle 5 g, väikese silindriga aga võib katset teostada ilma lisakoormiseta.

Vaatluse nr.	Suur silinder $Q_1 =$	Suur silinder $Q_2 =$	Väike silinder $Q_3 =$
	t	t	t
1	.....	.....	.....
2	.....	.....	.....
3	.....	.....	.....
4	.....	.....	.....
5	.....	.....	.....

5. Engleri viskosimeeter

Tehnikas kasutatakse õlide viskoossuse kiireks võrdlemiseks Engleri viskosimeetrit, mis kujutab endast lehtrikujulist anumat, mille põhjas on väljavoolutoru pikkusega 2,0 cm ja sisemise läbimõõduga 0,29 cm. Vedeliku algseis on 5,2 cm väljavoolutoru alumisest otsast lugedes ja lõppseis pärast 200 cm^3 vedeliku väljavoolamist 2,93 cm. Anuma seinad on kahekordsed, et vajaduse korral saaks anuma seinu ja seega ka mõõdetavat õli soojendada.

Engleri kraadid saadakse uuritava vedeliku väljavooluaja t jagatisena võrdse ruumala 20° C juures oleva vee väljavooluajaga t_0:

$$\eta = \frac{t}{t_0}\ ^\circ \text{Engleri.}$$

Et vee väljavoolamine Engleri viskosimeetrist on turbulentne, siis Engleri kraadid ei ole lineaarselt seotud puaasidega. Arvukad olemasolevad ümberarvutusvalemid on ligikaudsed.

6. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas toimub hõõrdumise vähendamine viskosimeetri laagris?
2. Miks anuma suurte läbimõõtude korral tulemus ei olene anuma läbimõõdust?
3. Missuguseid eeliseid pakub antud riist teiste tuntud meetoditega võrreldes?

50. TUULE KIIRUSE MÄÄRAMINE PRANDTLI TORUGA

1. Tööülesanne

Bernoulli seaduse rakendamine tuule kiiruse määramiseks Prandtli toruga.

2. Töövahendid

Prandtli toru manomeetriga ja tuuletekitaja.

Rõhu ja voolamiskiiruse kohta väikese viskoossusega keskkonnas on rakendatav Bernoulli seadus

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

kus p tähendab rõhku, v voolamiskiirust ja ϱ keskkonna tihedust. Kui voolamine puudub, siis $v = 0$ ja võrrandist järeldub, et rõhk p on sel juhul võrdne konstandiga. Seega tähendab konstant seisva keskkonna rõhku, mida tähistame p_0.

Siis on

$$p + \frac{\varrho v^2}{2} = p_0.$$

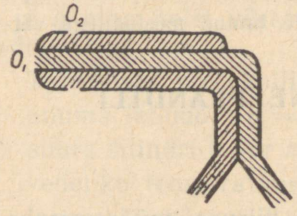
Kõik valemis esinevad liikmed on dimensioonilt rõhud ja neid nimetataksegi vastavalt iseloomule: p staatiliseks rõhuks, $\frac{\varrho v^2}{2}$ dünaamiliseks rõhuks ja p_0 kogurõhuks. Kui kogurõhk p_0 on konstantne, siis kiiruse suurenemisel väheneb staatiline rõhk p ja vastupidi.

Voolamiskiiruse määramiseks esitatud valemi põhjal on tarvis teada keskkonna tihedust ϱ ja dünaamilist rõhku. Viimane võrdub kogurõhu ja staatilise rõhu vahega: $p_0 - p = \frac{\varrho v^2}{2}$. Seega voolamiskiirus

$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\varrho}}. \qquad (1)$$

Kiiruse mõõtühikuks on cm/s, kui rõhku mõõdame ühikutes dn/cm^2 ja tihedust ühikutes g/cm^3.

Kogurõhu ja staatilise rõhu vahe mõõtmiseks saab kasutada Prandtli toru, mis koosneb kahest koaksiaalsest silindrilisest torust (joon. 35). Seesmisel torul on ava otsas, välimisel aga külgedel.



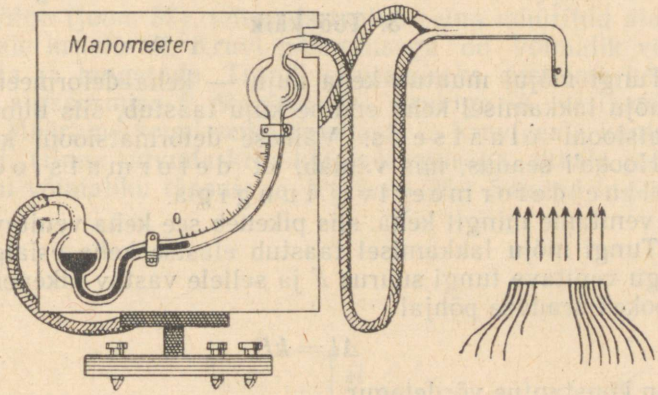
Joon. 35. Prandtli toru läbilõige.

Kui asetada toru otsaga vastu voolu, siis mõjub toru otsas olevale avale O_1 kogurõhk ja külgavale O_2 staatiline rõhk. Torude teised otsad ühendatakse vedelikmanomeetri vastavate otstega. Manomeeter mõõdab siis rõhkude p_0 ja p vahet, s. o. dünaamilist rõhku.

Et mõõdetavad rõhuvahed on võrdlemisi väikesed, siis suurema täpsuse saavutamiseks kasutatakse erikujulist manomeetrit, mis on täidetud väikese erikaaluga vedelikuga. Manomeetri skaala on toru erilise kuju tõttu ebaühtlane ja kaliib-

ritud tavaliselt veesamba millimeetreis. Mõõtmiseks tuleb manomeeter loodi seada ja vedeliku nivoo nullkriipsule reguleerida.

Uuritava õhuvoolu tekitamiseks kasutatakse laboratooriumis tuuletoru, mis koosneb plekksilindrist ja selles asetsevast elektrimootoriga käitatavast ventilaatorist. Õhuvoolu kiirus on reguleeritav mootori pöörlemiskiiruse muutmisega vooluahelasse lülitatud reostaadi abil.



Joon. 36. Tuule kiiruse mõõtmine Prandtli toru ja manomeetriga.

Mõõtmiseks asetame Prandtli toru paralleelselt õhuvooluga lahtise otsaga vastu voolu. Manomeetrilt loeme rõhu ja arvutame valemi (1) põhjal tuule kiiruse. Seejuures tuleb silmas pidada, et mõõtühikud oleksid vastavalt valitud.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas kirjeldatud meetod on rakendatav ka vedelike voolamiskiiruse mõõtmiseks?
2. Miks ei kasutata mõõtmisel elavhõbemanomeetrit?
3. Kuidas on võimalik Prandtli toru kasutada ainult staatilise rõhu ja kogurõhu mõõtmiseks?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 151 ja 152.
Putilov, Füüsika I, § 151.

51. TRAADI ELASTSUSMOODULI MÄÄRAMINE VENITUSEST

1. Tööülesanne

Tutvumine elastsuse seadustega ja traadi elastsusmooduli määramine.

2. Töövahendid

Uuritav traat, mis on riputatud seinas oleva konksu külge, ca 0,5 kG raskused kettad traadi venitamiseks, seadis traadi pikenemise määramiseks ja mikromeeter.

3. Töö käik

a) Tungi mõjul muutub keha kuju — keha deformeerub. Kui tungi mõju lakkamisel keha endine kuju taastub, siis nimetatakse deformatsiooni elastseks. Väikese deformatsiooni kohta on kehtiv Hooke'i seadus, mis väidab, et deformatsioon on võrdeline deformeeriva tungiga.

Kui venitame mingit keha, siis pikeneb see keha venitava tungi mõjul. Tungi mõju lakkamisel taastub elastse keha esialgne pikkus. Olgu venitava tungi suurus F ja sellele vastav pikenemine Δl. Siis Hooke'i seaduse põhjal

$$\Delta l = kF, \tag{1}$$

kus k on konstantne võrdetegur.

Võttes samast ainest mitmesuguse pikkusega ja ristlõikega kehi, näeme, et pikenemine Δl on võrdeline pikkusega l ja pöördvõrdeline ristlõikega S. Seega

$$\Delta l = \varepsilon \frac{l}{S} F, \tag{2}$$

kus ε on igale ainele iseloomulik elastsuskoefitsient. Tema pöördväärtust $\frac{1}{\varepsilon} = E$ nimetatakse Youngi mooduliks ehk elastsusmooduliks.

Lähtudes seosest (2), saame elastsusmooduli avaldada järgmiselt:

$$E = \frac{l}{\Delta l} \frac{F}{S}. \tag{3}$$

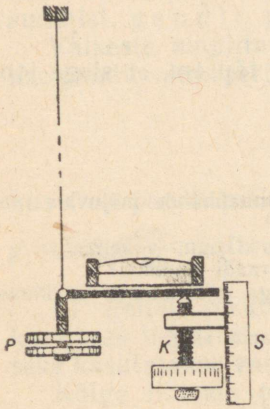
Mõõtes l ja Δl sentimeetreis, S ruutsentimeetreis ja F düünides, saame E ühikuks cgs-süsteemis dn/cm^2. Et kõikide ainete elastsusmoodulid osutuvad cgs-süsteemis väga suurteks arvudeks, siis mõõdetakse tehnikas tungi kilogrammides ja ristlõiget ruutmillimeetreis, saades mõõtühikuks kG/mm^2.

Elastsusmoodul iseloomustab ainet tungi mõjul tekkivate deformatsioonide suhtes. Mida suurem on aine elastsusmoodul, seda suuremat tungi on tarvis kindla suurusega deformatsiooni tekitamiseks võrdsete mõõtmetega kehade puhul.

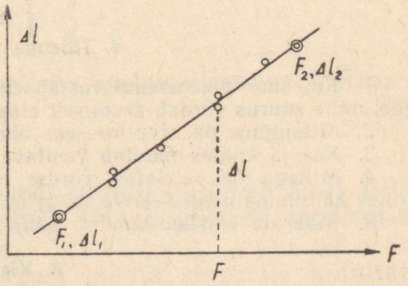
b) Elastsusmoodulit E on lihtne määrata traatide puhul. Nagu nähtub valemist (3), on selleks tarvis teada traadi pikkust l, ristlõiget S, venitavat tungi F ja pikenemist Δl.

Mõõtmiseks riputatakse uuritav ca 2—3 m pikkune traat kõr-

gele seina müüritud tugeva raudkonksu külge. Tugeva konksu ja kinnitusviisi puhul võime jätta arvestamata traadi ülemise otsa nihkumise venitava tungi mõjul ja mõõta ainult alumise otsa nihkumist. Traadi alumise otsa nihkumise, s. o. traadi pikenemise määramiseks tungi mõjul kasutame vesiloodi. Vesiloodi üks ots on liigendiga kinnitatud traadi alumises otsas rippuva koormisehoidja külge (joon. 37), teine ots toetub seina müüritud aluse küljes olevale kruvile K. Kruvi pööramisega on võimalik vesiloodi otsa tõsta ja langetada. Traadi sirutamiseks riputame koormisehoidjale algkoormise P. Reguleerime kruviga K vesiloodi mulli keskele. Määrame kruvi seisu skaala S ja kruvipeale kantud jaotiste abil. (Enne tutvuda kruvikäigu kõrgusega, skaala jaotistega ja lugemi võimaliku täpsusega. Vt. ka § 26.) Saadud lugem mää-



Joon. 37. Traadi elastsusmooduli määramise seadis.



Joon. 38. Traadi pikenemine tungi mõjul.

rab venitatava traadi algpikkuse. Koormist vihtide lisamisega järk-järgult suurendades reguleerime iga kord vesiloodi mulli keskele ja registreerime kruvi kõrguse. Siis eemaldame vihid vastupidises järjekorras ja registreerime kruvi kõrguse endisel viisil. Seejuures peavad võrdsete koormiste puhul kruvi asukohad koormise suurenemisel ja vähenemisel katsevigade piirides ühtima. Kui see pole nii, siis polnud traat algul küllalt sirutatud või ületas lõppkoormis traadi elastsuse piiri, mistõttu tekkis jääv deformatsioon. Viimasel juhul tuleb mõõtmist korrata väiksema lõppkoormisega.

Koormamiseks kasutatavate vihtide massid on kas antud või need tuleb määrata kaalumisega. Kui traadi pikkus pole antud, siis tuleb see mõõta mõõtpaelaga. Seejuures pole tarvis suuremat relatiivset täpsust kui teiste suuruste mõõtmisel. Traadi ristlõike S arvutamiseks mõõdame mikromeetriga tema läbimõõdu. Pikenemised Δl arvutame kruvi K kõrguste vahedest erinevatel koormistel.

Traadi pikenemise l koormise F mõjul esitame graafiliselt F ja Δl teljestikus (joon. 38). Hooke'i seaduse põhjal peavad leitud punktid graafikul asetsema ühel sirgel. Tegelikult aga esinevad väikesed kõrvalekaldumised ja sirge tuleb joonestada nii, et ta oleks kõikidele punktidele võimalikult lähedal. Elastsusmooduli E arvutamiseks võiksime kasutada ükskõik missugust vastavate väärtuste paari Δl ja F, kuid suurema täpsuse saavutamiseks valime graafikul kaks teineteisest võimalikult kaugel asetsevat punkti $(F_1, \Delta l_1)$ ja $(F_2, \Delta l_2)$ ning määrame neist suhte $\frac{F_2 - F_1}{\Delta l_2 - \Delta l_1}$. Saadud tulemuse asetame sellega võrdse suhte $\frac{F}{\Delta l}$ asemele valemisse (3) ning arvutame valemi

$$E = \frac{l}{S} \frac{F_2 - F_1}{\Delta l_2 - \Delta l_1}$$

põhjal elastsusmooduli. Tulemus on seetõttu täpsem, et sirge joonestamisel oleme arvestanud kõiki punkte.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kui suur pikenemine vastab ristlõike ühele pinnaühikule mõjuvale tungile, mille suurus võrdub arvuliselt elastsusmooduliga?
2. Missugune on arvuline seos ühikute dn/cm^2 ja kG/mm^2 vahel?
3. Kas ja kuidas muutub venitava tungi mõjul traadi ruumala?
4. Millega on seletatav võrdse elastsusmooduliga alumiiniumi ja klaasi erinev käitumine deformeeriva tungi mõjul?
5. Määrata elastsusmooduli põhjal katsealuse traadi aine.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 124.
Putilov, Füüsika I, § 49.

52. MATEMAATILISE PENDLI VÕNKUMISSEADUSTE KONTROLLIMINE JA RASKUSKIIRENDUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Matemaatilise pendli valemiga tutvumine, sellest valemist tulenevate seaduspärasuste katseline tõestamine ning raskuskiirenduse suuruse määramine.

2. Töövahendid

Pikkuse mõõtmise skaalaga varustatud kõrge statiiv pendlite riputamiseks, mitmesuguses suuruses raskeid kuulikesi, pendliniiti (peenikest traati), sekundomeeter (kell) ja muudetava võnketasandiga füüsikaline pendel.

a) Matemaatiliseks pendliks nimetatakse ainepunkti, mis on riputatud ideaalselt painduva, mitteveniva kaalutu niidi otsa ja võib raskustungi mõjul vabalt võnkuda vertikaaltasandis. Sellist matemaatilist pendlit pole võimalik tegelikult valmistada. Enam-vähem vastab neile tingimustele füüsikaline pendel, milleks on hästi peenikese niidi otsa riputatud väike raske kuulike.

Tasakaaluasendist välja viidud pendlikeha äärmise asendi kaugust tasakaaluasendist nimetatakse pendli amplituudiks, liikumist ühest äärmisest asendist teise ja tagasi pendli täisvõnkeks, sellele vastavat aega täisvõnke vältuseks ehk võnkeperioodiks (T) ning kinnituspunkti kaugust ainepunktist pendli pikkuseks (l).

Väikeste amplituudide puhul (kuni 5°) väljendab matemaatilise pendli võnkeperioodi T kaunis täpselt valem

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

kus l on pendli pikkus ja g katsekoha raskuskiirendus. Tartus on $g = 981{,}8 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$, Tallinnas $981{,}9 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$.

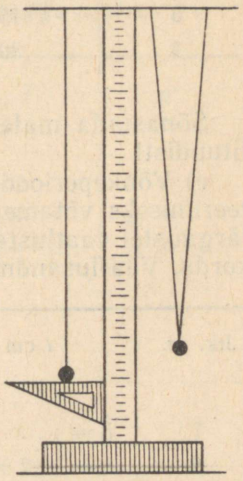
b) Pendli pikkust arvestatakse kinnituspunktist kuni pendli kuulikese tsentrini (raskuspunktini). Pendli pikkuse reguleerimiseks kasutatakse vastavat seadist.

Kõige lihtsam on pendli pikkust mõõta statiivile kinnitatud skaala abil, kasutades pendlikeha raskuspunkti kõrguse ülekandmiseks skaalale nurklauda (joon. 39).

Raskusi tekitab võnkumisaja algmomendi tabamine. Kõige sobivam on võtta algmomendiks tasakaaluasendi läbimise moment. Selleks fikseerime tasakaaluasendit läbiva sihi risti pendli võnkumistasandiga ja harjutame tabama momenti, millal pendli niit sellest sihist üle läheb.

c) Pendli valemis puudub mass — järelikult võnkeperiood ei olene pendlikeha massist. Selle seaduspärasuse demonstreerimiseks riputame niidi otsa mitmesuguse massiga pendlikehasid, reguleerime pendlite pikkused võrdseks ja määrame neile vastavad võnkeperioodid.

Vaatlusandmed paigutame tabelisse järgmiselt:



Joon. 39. Statiivile riputatud matemaatilised pendlid.

Jrk. nr.	Pendlikeha mass grammides	Vaadeldud perioodide arv	Kõigi perioodide kestus sekundites	Ühe perioodi kestus sekundites $\left(T=\frac{t}{N}\right)$
1	$m_1 = \ldots$	$N_1 = \ldots$	$t_1 = \ldots$	$T_1 = \ldots$
2	$m_2 = \ldots$	$N_2 = \ldots$	$t_2 = \ldots$	$T_2 = \ldots$
3	$m_3 = \ldots$	$N_3 = \ldots$	$t_3 = \ldots$	$T_3 = \ldots$

Perioodide arv N võtta iga vaatluse puhul erinev, kuid mitte väiksem kui 20!

Võrrelda saadud perioodide väärtusi ning sõnastada siin esinev seaduspärasus!

d) Võtame pendli pikkuseks umbes 120 cm. Siis vastab amplituudile 1° kaarepikkus $\sim$ 2 cm, amplituudile 2,5° 5 cm, amplituudile 5° 10 cm jne. Viime pendlikeha tasakaaluasendist eemale 5 cm võrra (vastavalt 10 cm, 15 cm ja 30 cm võrra). Vaatlusandmed paigutame tabelisse järgmiselt:

Jrk. nr.	Amplituud cm	N	t	T
1	5	$N_1 = \ldots$	$t_1 = \ldots$	$T_1 = \ldots$
2	10	$N_2 = \ldots$	$t_2 = \ldots$	$T_2 = \ldots$
3	15	$N_3 = \ldots$	$t_3 = \ldots$	$T_3 = \ldots$
4	30	$N_4 = \ldots$	$t_4 = \ldots$	$T_4 = \ldots$

Sõnastada matemaatilise pendli võnkeperioodi olenevus amplituudist!

e) Võnkeperioodi ja pendli pikkuse vahelise olenevuse demonstreerimiseks võtame esimesel vaatlusel võimalikult pika pendli ja järgmistel vaatlustel vähendame pendli pikkust vastavalt 2, 3 ja 4 korda. Vaatlusandmed paigutame tabelisse järgmiselt:

Jrk. nr.	l cm	N	t	T
1	$l_1 = \ldots\ldots$	$N_1 = \ldots$	$t_1 = \ldots$	$T_1 = \ldots$
2	$l_2 = l_1 : 2 = \ldots$	$N_2 = \ldots$	$t_2 = \ldots$	$T_2 = \ldots$
3	$l_3 = l_1 : 3 = \ldots$	$N_3 = \ldots$	$t_3 = \ldots$	$T_3 = \ldots$
4	$l_4 = l_1 : 4 = \ldots$	$N_4 = \ldots$	$t_4 = \ldots$	$T_4 = \ldots$

Saadud andmete põhjal määrata suhted:

$T_1 : T_2 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{l_1} : \sqrt{l_2} = \ldots\ldots$

$T_1 : T_3 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{l_1} : \sqrt{l_3} = \ldots\ldots$

$T_1 : T_4 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{l_1} : \sqrt{l_4} = \ldots\ldots$

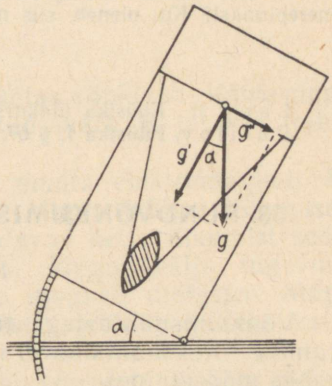
$T_2 : T_4 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{l_2} : \sqrt{l_4} = \ldots\ldots$

Suhete võrdlusest sõnastada võnkeperioodi olenevus pendli pikkusest!

f) Et katseliselt näidata võnkeperioodi olenevust raskuskiirendusest g, kasutame füüsikalist pendlit, mille võnkumistasandit on võimalik vertikaalasendist nurga α võrra kõrvale viia (joon. 40). Siis ei mõju pendli võnkumisel enam kogu raskuskiirendus g, vaid ainult raskuskiirenduse komponent $g' = g \cos \alpha$. Komponendi g'' mõju tasakaalustub pendli raami vastumõjuga. Nurka α vastavalt muutes saame jälgida T olenevust kiirendusest.

Määrame pendli võnkeperioodi algasendis ($\alpha = 0$) ja vähemalt kahe α väärtuse puhul ning neile vastavad g' väärtused valemist $g' = g \cos \alpha$.

Tulemused paigutame tabelisse järgmiselt:



Joon. 40. Muudetava võnketasandiga pendel.

Jrk. nr.	α	N	t	T	g'
1	$\alpha_1 = 0°$	$N_1 = \ldots$	$t_1 = \ldots$	$T_1 = \ldots$	$g_1' = \ldots$
2	$\alpha_2 = \ldots$	$N_2 = \ldots$	$t_2 = \ldots$	$T_2 = \ldots$	$g_2' = \ldots$
3	$\alpha_3 = \ldots$	$N_3 = \ldots$	$t_3 = \ldots$	$T_3 = \ldots$	$g_3' = \ldots$

Saadud andmete põhjal määrata suhted

$T_1 : T_2 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{g_2'} : \sqrt{g_1'} = \ldots\ldots$

$T_1 : T_3 = \ldots\ldots$ $\quad \sqrt{g_3'} : \sqrt{g_1'} = \ldots\ldots$

Suhete võrdlusest sõnastada võnkeperioodi olenevus raskuskiirendusest!

g) Raskuskiirenduse g suuruse võime arvutada pendli valemist

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

millest

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

Kasutades l ja T kohta punktis e saadud tulemusi, arvutada vastavad g väärtused ja võtta neist aritmeetiline keskmine!

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas pendli võnkeperiood oleneb geograafilisest laiusest ja kõrgusest merepinnast? Kui oleneb, siis mispärast ja kuidas?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 182.
Putilov, Füüsika I, § 67.

53. SUNDVÕNKUMISTE UURIMINE POHLI RIISTAGA

1. Tööülesanne

Võnkumisnähtustega tutvumine. Võnkumiste sumbuvuse määramine. Resonantsikõverate konstrueerimine. Võnkumiste faasinihke määramine.

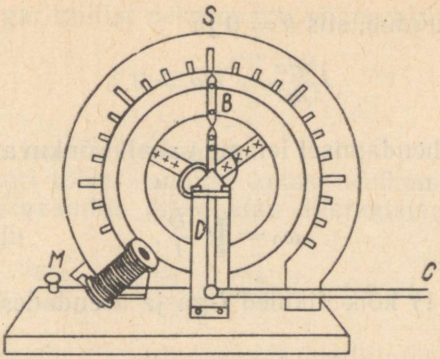
2. Töövahendid

Pohli riist (joon. 41), sekundomeeter, reguleeritava pöörlemiskiirusega mootor ja elektrivoolu allikad mootori käitamiseks ning summutaja magneti ergutamiseks.

3. Töö käik

a) 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 ehk lühemalt sundvõnkumistest.

Võnkumiste uurimiseks kasutatakse Pohli riista, mille võnkuva osa moodustab horisontaaltelje ümber pöörduv vaskketas. Ketta külge on kinnitatud spiraalvedru, mille teine ots on ühendatud kangiga D. Kangi D abil antakse kettale soovitav pöördemoment. Kangi teine ots on ühendatud varvaga C, mis omakorda on ühenduses elektrimootori ekstsentrikuga ja paneb mootori töötamisel kangi D otsa aeglaselt edasi-tagasi liikuma. Vedru kaudu



Joon. 41. Pohli riist võnkumiste uurimiseks.

kettale antavate tõugete mõjul hakkab ketas võnkuma. Võnkeamplituudi mõõtmiseks on kettale kinnitatud märk B ja selle taha skaala S.

Ketta võnkumiste sumbuvust saab muuta elektromagneti M abil, mille pooluste vahel liigub ketas. Magnetiväljas liikumisel tekivad kettas pöörisvoolud, mis pidurdavad ketta liikumist seda rohkem, mida tugevam on magnetiväli. Magnetivälja tugevust muudetakse voolutugevuse muutmisega magneti mähistes. Magneti puudumisel võib summutada ka mehaaniliselt, näiteks vatitükki kergelt ketta vastu surudes.

Tasakaalust välja viidud ketas hakkab võnkuma. Temale mõjub tasakaaluasendi poole pöörav, vedru elastsusest tingitud tungimoment $M = -D\alpha$, kus α on pöördenurk ja D võrdetegur. Suurust D nimetatakse keerdjäikuseks ja ta on võrdne momendiga, mis mõjub pöördenurga puhul 1 radiaan. Ketta võnkumist summutavad mehaaniline hõõrdumine ja magnetiväli. Takistav tung on võrdeline ketta nurkkiirusega. Seega takistav pöördemoment $M_1 = -h\omega$, kus h on hõõrdumiskoefitsient ja ω nurkkiirus.

Neist andmeist lähtudes võime kirjutada ketta liikumise põhivõrrandi

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -h\omega - D\alpha,$$

kus I tähendab ketta inertsimomenti ja $d^2\alpha/dt^2$ nurkkiirendust.

Viies kõik liikmed vasakule poole ja arvestades, et $\omega = d\alpha/dt$, saame

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + h\frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \qquad (1)$$

See on summutatult võnkuva ketta liikumise diferentsiaalvõrrand.

Kui summutus puudub, siis $h = 0$ ja

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + D\alpha = 0. \tag{2}$$

Selle võrrandi lahendamisel leiame vabalt võnkuva ketta omanurksageduse

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{I}}. \tag{3}$$

Jagades seoses (1) kõik liikmed I-ga ja asendades $D/I = \omega_0^2$ ning $h/2I = \beta$, saame

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta\frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2\alpha = 0. \tag{4}$$

Kui $\beta \geqslant \omega_0$, siis liigub ketas tasakaaluasendisse tagasi ilma võnkumiseta. Mida suurem on takistus, seda aeglasemalt toimub liikumine.

Kui $\beta < \omega_0$, siis hakkab ketas tasakaaluasendi ümber kahaneva amplituudiga võnkuma.

Võrrandi (4) lahendamisel leiame sumbuva võnkumise põhivõrrandi kujul

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta t}\sqrt{\frac{\beta^2+\omega^2}{\omega^2}}\sin\left(\omega t + \arctan\frac{\omega}{\beta}\right). \tag{5}$$

kus $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ tähendab sumbuva võnkumise nurksagedust. Sumbuva võnkumise nurksagedus on väiksem vaba võnkumise omanurksagedusest. Periood T on aga vastavalt pikem: $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ ehk seose (3) põhjal

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{I} - \beta^2}}. \tag{6}$$

Nagu nähtub seosest (5), määravad sumbuva võnkumise kaks tegurit: harmooniline võnkumine ja amplituudi eksponentsiaalne kahanemine. Kahe üksteisele järgneva samapoolse amplituudi α_n ja α_{n+1} suhe

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}} = e^{-\beta nT + \beta(n+1)T} = e^{\beta T} \tag{7}$$

on konstantne. Astmenäitajat $\beta T = \Lambda$ nimetatakse võnkumise logaritmiliseks dekremendiks. Suurust $e^{\Lambda} = k$ nimetatakse sumbuvussuhteks. Mõlemaid suurusi kasutatakse sumbuvate võnkumiste iseloomustamiseks.

Kasutades logaritmilist dekrementi, võime kirjutada

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{\Lambda^2}{4\pi^2}},$$

kus T_0 tähendab omavõnkeperioodi.

Pannes mootori tööle, sunnime ketast võnkuma mootori nurksagedusega ω. Võrrandile (4) vastav diferentsiaalvõrrand omandab sel juhul kuju

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2 \alpha = a \sin \omega t, \tag{8}$$

kus a tähendab sundiva tungimomendi amplituudi, mis on jagatud ketta inertsimomendiga I. Sundiva momendi amplituud on antud juhul võrdeline sundiva võnkumise amplituudiga.

Võrrandi lahendamisel leiame ketta võnkumise amplituudi

$$\alpha_m = \frac{a}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \tag{9}$$

faasinihke φ ketta võnkumise ja sundiva momendi vahel seosest

$$\tan \varphi = -\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \tag{10}$$

ja võnkumise hälbe

$$\alpha = \alpha_m \sin(\omega t + \varphi). \tag{11}$$

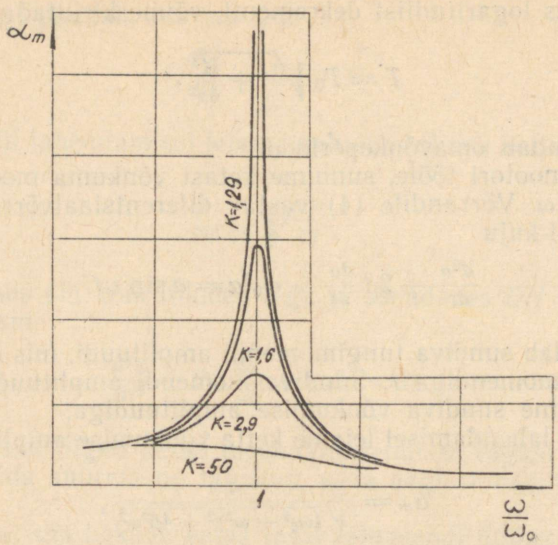
Seosest (9) nähtub, et väikese sumbuvuse puhul (β väike) α_m kasvab ω lähenemisel väärtusele ω_0 väga suureks. Seda nähtust nimetatakse resonantsiks. Resonantsi korral on $\omega = \omega_0$. Mida suurem on aga sumbuvus, seda väiksem on α_m.

Seosest (10) nähtub, et resonantsi puhul $\tan \varphi = -\infty$ ja seega $\varphi = -\frac{\pi}{2}$. See tähendab, et ketta võnkumine hilineb veerand perioodi võrra sundiva võnkumise suhtes.

b) Katsete sooritamisel tuleb esiteks määrata ketta omavõnkesagedus ja sumbuvussuhe. Selleks tõukame ketta võnkuma, jättes kangi D liikumatuks, määrame võnkeperioodi T_0 vähemalt viiest võnkest ning arvutame ω_0.

Sumbuvussuhte k määramiseks registreerime rea samasuunalisi amplituude, arvutame üksteisele järgnevate amplituudide suhted ning võtame neist aritmeetilise keskmise.

Nüüd paneme mootori aeglaselt käima, määrame ekstsentriku võnkesageduse, ootame ketta võngete stabiliseerumiseni ning määrame siis ketta võnkeamplituudi. Suurendades ekstsentriku pöörlemiskiirust, kordame eelmisega analoogilisi mõõtmisi järjest suurenevatel sagedustel. Eriti hoolikalt uurime nähtusi resonantsi piirkonnas. Siis suurendame ketta võnkumise sumbuvust, mää-



Joon. 42. Amplituudi sõltuvus nurksageduste suhtest.

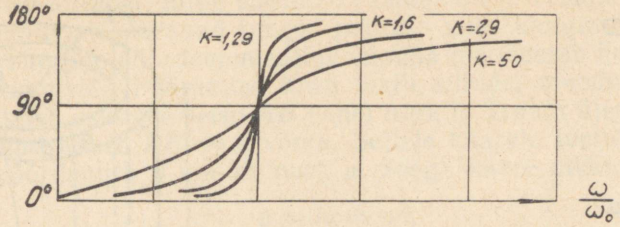
rame uue sumbuvussuhte ja logaritmilise dekremendi. Mõõtmisi teostada kokku neljal erineval sumbuvusel!

Katseandmete põhjal konstrueerime graafiku nurksageduste suhte ja amplituudi teljestikus. Saadud kõveraid nimetatakse ka resonantsikõverateks. Analüüsida valemi (9) põhjal katsetulemusi!

Ketta võnkumise ja sundiva võnkumise vahelise faasinihke määramiseks jälgime ketta külge kinnitatud märgi *B* ja kangi *D* otsa võnkumist skaala kohal. Otstarbekohane on fikseerida ketta asendeid siis, kui kangi otsa hälve on maksimaalne.

Faasinihke määramisel näeme, et sundiva võnkumise väikesel sagedusel ($\omega < \omega_0$) liiguvad kettal olev märk *B* ja kangi *D* ots ühesuunaliselt ja pöörduvad samal ajal ümber. Nende võnkefaaside vahe on null. Sundiva võnkumise sageduse suurenemisel jõuab sundija amplituud ketta amplituudist järjest rohkem ette. Resonantsi puhul on faasinihe 90°. Näiteks märk *B* läbib tasakaaluseisu siis, kui kangi *D* ots on äärmises seisus. Sundiva sageduse edasisel suurenemisel muutub faasinihe võrdseks 180 kraadiga. Märk *B* ja kangi *D* ots liiguvad siis vastassuundades ja läbivad samaaegselt tasakaaluseisu. Faasinihkel 90° antakse võnkuvale kettale kogu aeg energiat juurde. Sumbuvuse puudumisel peab ketta võnkeamplituud kasvama üle igasuguse piiri.

Vaatlusandmete põhjal konstrueerime graafiku nurksageduste suhte ja faasinihke teljestikus. Analüüsida katsetulemusi valemi (10) põhjal!



Joon. 43. Faasinihke sõltuvus nurksageduste suhtest.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Tuua näiteid resonantsi kasulikust ja kahjulikust mõjust.
2. Miks tuleb enne amplituudi määramist antud sundival sagedusel oodata võngete stabiliseerumist?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 189, 190 ja 191.
Putilov, Füüsika I, §§ 70 ja 71.

54. NIHKEMOODULI MÄÄRAMINE VÕNKUMISEST

1. Tööülesanne

Traadi nihkemooduli määramine elastsetest torsioonvõnkumistest.

2. Töövahendid

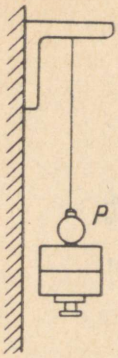
Kindlale toele riputatud uuritav traat, traadi otsa kinnitatavad silindrilised metallkettad, ketaste hoidja koos tema külge kinnitatud peeglikesega (joon. 44), mm-jaotistega mõõtjoonel, varbsirkel, mikromeeter, apteegikaalud ja sekundomeeter.

3. Töö teoreetilised alused

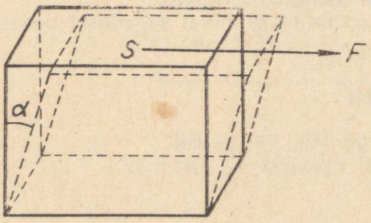
Olgu risttahukas põhjapindalaga S kinnitatud liikumatult alusele. Rakendame tema pealmisele pinnale pinnaga paralleelse tungi F, mis mõjub ühtlaselt igasse pinnaelemendisse. Siis mõjub igale ruutsentimeetrile tung

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

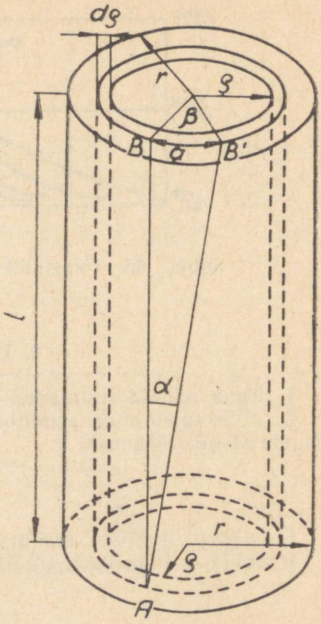
mida nimetatakse nihkepingeks. Tungi mõjul risttahukas deformeerub ja tema külgservad moodustavad oma esialgse sei-



Joon. 44. Nihkemooduli määramise seadise skeem.



Joon. 45. Nihkemooduli mõiste selgitus.



Joon. 46. Traadi direktsioonimomendi arvutamine.

suga nurga α (joon. 45). Hooke'i seaduse põhjal on α võrdeline pingega (kui α on väike). Kirjeldatud katseseadme puhul on α seega võrdeline mõjuva tungiga F, pöördvõrdeline pindalaga S ja oleneb veel risttahuka ainest:

$$\alpha = \frac{F}{GS}. \qquad (2)$$

Materjalist olenev suurus G on igale ainele iseloomulik konstant ja teda nimetatakse nihkemooduliks.

Et nurk α on dimensioonita suurus (nurk radiaanmõõdus), siis peab G dimensioon olema F/S, s. o. tung pinnaühikule. Tavaliselt mõõdetakse nihkemoodulit nagu elastsusmoodulitki ühikutes kG/mm^2 või dn/cm^2.

Kirjeldatud meetod pole nihkemooduli määramiseks tegelikult rakendatav. Selle asemel kasutame G määramiseks järgmist viisi.

Kinnitame paigale silindrilise traadi ühe otsa ja pöörame tema teist otsa ümber pikitelje (joon. 46). Siis pöörduvad kogu traadi ulatuses üksteise suhtes ka traadi ristlõikepinnad. Jaotame ümmarguse traadi, mille raadius on r ja pikkus l, õhukesiks koaksiaalseiks õõnessilindreiks seina paksusega $d\varrho$. Joonisel 46 on kujuta-

tud selline silinder, mille sisemine raadius on ϱ. Traadi pööratavas otsas mõjuvad pööravad tungid puutuja sihis kaugusel ϱ pöördeteljest. Tungide pöördemomentide summa moodustab kogu mõjuva pöördemomendi. Pööramise tõttu tekib silindri moodustaja seisu AB' ja tema esialgse seisu AB vahel nurk α. Traadi ülemine ots on pöördunud kaare $BB' = a$ võrra. Sellele kaarele toetub nii lõikepinna pöördenurk β kui ka nurk α. Seega kaare pikkus

$$a = l\alpha = \varrho\beta, \tag{3}$$

millest

$$\alpha = \frac{\varrho\beta}{l}. \tag{4}$$

Kui õõnessilindri ristlõikele

$$dS = 2\pi\varrho d\varrho \tag{5}$$

mõjub pöörav tung dF, siis, lähtudes seosest (2) kujul $F = \alpha GS$, leiame, et

$$dF = \alpha G dS. \tag{6}$$

Asetades α ja dS seoseist (4) ja (5) seosesse (6), saame:

$$dF = \frac{\varrho\beta G}{l} 2\pi\varrho d\varrho = 2\pi \frac{\beta}{l} G \varrho^2 d\varrho.$$

Tungi moment dM on tungi dF ja õla pikkuse ϱ korrutis:

$$dM = \varrho dF = 2\pi \frac{\beta}{l} G \varrho^3 d\varrho.$$

Traadi kogu ristlõikepinnale mõjuv tungimoment M on üksikutele pinnaelementidele dS mõjuvate tungimomentide summa. Selle tungimomendi leiame, integreerides piirides $\varrho = 0$ kuni $\varrho = r$:

$$M = \int_0^r dM = \int_0^r 2\pi \frac{\beta}{l} G\varrho^3 d\varrho = 2\pi \frac{\beta}{l} G \int_0^r \varrho^3 d\varrho,$$

$$M = \frac{\pi\beta G r^4}{2l} = D\beta; \quad D = \frac{\pi G r^4}{2l}. \tag{7}$$

Suurust D nimetatakse k e e r d j ä i k u s e k s ja ta on võrdne momendiga, mis pöörab traadi otsa ühe radiaani võrra. Nihkemooduli määramiseks peame leidma keerdjäikuse D, mida saame leida, mõõtes torsioonvõnkumisi.

Kui pöörame traadi otsas rippuvat ketast tema telje ümber väikese nurga võrra ja laseme ta lahti, siis hakkab ta võnkuma. Võnkumised on kustuvad ja nende kohta võime rakendada paragrah-

vis 53 esitatud võrrandeid. Süsteemi omavõnkeperioodi võime arvutada nimetatud paragrahvi võrrandi (6) põhjal. Kui sumbuvus on väike, siis võime kirjutada

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}, \tag{8}$$

millest keerdjäikus $D = \frac{4\pi^2 I}{T^2}$.

Ketaste inertsimomendi I võime arvutada. Samuti võime mõõta omavõnkeperioodi T. Edasi võime arvutada D ja valemist (7) saame nihkemooduli:

$$G = \frac{2lD}{\pi r^4} = \frac{8\pi^2 lI}{\pi r^4 T^2} = \frac{8\pi lI}{r^4 T^2}. \tag{9}$$

Viimases avaldises esineb ketaste süsteemi inertsimoment I. Et selle süsteemi kuju ei ole täiesti korrapärane, siis ei saa me tema inertsimomenti arvutada massi ja mõõtmete kaudu, vaid peame selle leidma katseliselt. Selleks lisame juurde ühe ketta, mille inertsimomendi I_1 saame arvutada:

$$I_1 = {}^1/_2 m(r_1^2 + r_2^2), \tag{10}$$

kus m — ketta mass,
r_1 — ketta välisraadius,
r_2 — ketta sisemise ava raadius.
Võrrandi (8) alusel võime kirjutada:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I + I_1}{D}}. \tag{8a}$$

Jagades võrrandi (8a) võrrandiga (8) ja lahendades saadud võrrandi I suhtes, saame:

$$I = I_1 \cdot \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} = {}^1/_2 m(r_1^2 + r_2^2) \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}. \tag{11}$$

Asetades selle väärtuse võrrandisse (9), saame:

$$G = \frac{8\pi lI_1}{r^4 (T_1^2 - T^2)} = \frac{4\pi lm(r_1^2 + r_2^2)}{r^4 (T_1^2 - T^2)}. \tag{12}$$

4. Töö käik

Valemist (12) selgub, et on vaja määrata torsioonvõnkumiste perioodid T ja T_1, traadi raadius r, traadi pikkus l, lisaketta raadiused r_1 ja r_2 ning lisaketta mass m.

Traadi raadiuse r mõõtmise relatiivne viga on suurim, mis-

tõttu mõõdame r mikromeetriga kolmest kohast (igast kahes ristsuunas).

Traadi pikkuse l mõõdame mõõdulindiga 1 mm täpsusega.

Ketta raadiused r_1 ja r_2 mõõdame varbsirkliga 0,1 mm täpsusega.

Võnkeperioodide määramiseks mõõdame iga kord 20—50 täisvõnke kestuse. Et võngete lugemise alg- ja lõppmomente saaks täpsemalt määrata, on kettale kinnitatud peegel. Peeglit valgustame lambiga ja seame ta nii, et tasakaaluasendi puhul satuks kiir täpselt seinal olevale märgile.

Katseandmed protokollime järgmise skeemi järgi:

Traadi raadiuse määramine

1)	Traadi läbimõõt ülalt	=	.....	mm
2)	„ „ keskelt	=	.....	mm
3)	„ „ alt	=	.....	mm
	Keskmine	=	.....	mm

Mikromeetri nulltäpi lugem = ... mm
Mikromeetri nulltäpi parandus = ± ..... mm
Traadi läbimõõt d = ... mm
„ raadius r = ... mm = ... cm

Pöördvõnkeperioodide T ja T_1 määramine

Aparatuur nr. . . . .

Võngete lugemise kestus	Põhiketas			Põhiketas + lisaketas		
	Täisvõngete arv	Aeg s	T s	Täisvõngete arv	Aeg s	T_1 s
4 min	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2 „	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	Keskmine: T = ... s			Keskmine: T_1 = ... s		

Nihkemooduli G määramine

Jrk. nr.	Suuruse nimetus	Sümbol	Arvuline väärtus ja ühik
1	Lisaketta raadius	r_1	..... cm
2	Lisaketta ava raadius	r_2	..... cm
3	Lisaketta mass	m	..... g

vis 53 e
arvutad
vus o

	...se nimetus	Sümbol	Arvuline väärtus ja ühik
	...ertsimoment $+r_2^2)$	I_1	..... g cm²
	...ertsimoment $I = I_1 \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}$	I	..... g cm²
6	Traadi pikkus	l	..... cm
7	Traadi raadius	r	..... cm
8	Nihkemoodul $G = \frac{8\pi lI}{r^4 T^2}$	G	..... $\frac{\text{dn}}{\text{cm}^2}$

5. Täiendavaid küsimusi

1. Kas on olemas teistsuguseid meetodeid ja võtteid nihkemooduli määramiseks?
2. Järjestada suuruse järjekorras kõikide mõõdetud suuruste relatiivsed vead.
3. Kas nihkemoodulit saaks arvutada teistest elastsuskonstantidest?
4. Kui suur on viga võngete arvu määramisel?

6. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 125.
Putilov, Füüsika I, § 49.

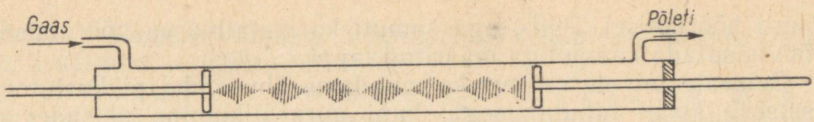
55. KUNDTI TORU

1. Tööülesanne

Seisvate helilainete tekitamine ning neile vastavate võnkesageduste määramine. Hääle levimiskiiruse määramine valgustusgaasis. Hääle levimiskiiruse määramine varvas. Varva elastsusmooduli määramine. c_p ja c_v suhte määramine.

2. Töövahendid

Kundti toru (joon. 47), lapp varva hõõrumiseks, mõõtjoonel, termomeeter, 2 kummitoru gaasi juhtimiseks ja gaasipõleti.



Joon. 47. Kundti toru pealtvaates.

3. Töö käik

a) Laine levimiskiirus v, lainepikkus λ ja võnkesagedus f on seotud valemiga

$$v = f\lambda. \tag{1}$$

Laine levimisel ühest keskkonnast teise ei muutu võnkesagedus, küll aga levimiskiirus ja lainepikkus. Seega kahe erineva keskkonna kohta võime kirjutada

$$v = \lambda f \text{ ja } v_1 = \lambda_1 f,$$

millest

$$\frac{v}{v_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1}. \tag{2}$$

Seose (2) põhjal on võimalik Kundti toruga määrata hääle levimiskiirust mitmesuguseis aineis.

Kundti toru peamise osa moodustab ca 1 m pikkune ja 3—5-sentimeetrise läbimõõduga klaastoru. Toru ühes otsas on piki toru edasi-tagasi nihutatav kork ja teises otsas heliallikana kasutatav varb. Varb on kinnitatud kas keskelt või $^1/_4$ ja $^3/_4$ kauguselt otsast. Kui hõõrume varba niiske lapiga, siis tekib temas suure sagedusega pikivõnkumine, mida kuuleme kõrge helina. Varva torus asetsevas otsas olev õhuke korgitükk paneb ka torus oleva õhu võnkuma. Tekitatud helilained peegelduvad toru teises otsas asetsevalt korgilt ning interfereeruvad tagasiteel varvast väljuvate uute lainetega.

Õhusamba teatava pikkuse puhul tekivad torus seisvad lained. Seejuures suureneb heli intensiivsus märgatavalt.

Tekkinud seisvate lainete nähtavaks tegemiseks kasutame toru põhja riputatud lükopoodiumi või peent korgipuru, mis laine sõlmedes jääb paigale, paisukohtades aga elavalt liigub.

Katse teostamiseks peame kasutama täiesti kuiva toru ja puru. Puru tuleb kasutada võimalikult vähe, sest siis on sõlmede ja paisude asukohad täpsemalt määratavad. Puru on soovitatav toru pööramisega veidi küljele viia, kust ta siis lainete mõjul paisukohtades põhja langeb.

Kui heli tekitamiseks kasutatav varb on klaasist või metallist, siis hakkab ta hõlpsasti võnkuma piiritusega niisutatud vatiga

pikuti hõõrumisel. Puit-, aga samuti ka metallvarva hõõrumiseks võib kasutada kampoliga määritud lappi.

Seisvate lainete saamiseks muudame õhusamba pikkust torus asetseva korgi nihutamisega, kuni puru liikumine paisudes on maksimaalse intensiivsusega. Lainepikkuse mõõtmiseks on sõlmi parem kasutada kui paise, sest sõlmede asukohad on täpsemalt määratavad. Katset kordame õhusammaste erinevatel pikkustel ja mõõdame iga kord kahe teineteisest võimalikult kaugel oleva, selgesti kindlaks määratava sõlme vahelise kauguse l mm täpsusega, millest arvutame lainepikkuse λ. (Iga mõõtmise vahel purukuhjatised hävitada!)

Heli võnkesageduse määramiseks arvutame katsetingimustele vastava hääle kiiruse. Hääle kiiruse olenevuse õhu temperatuurist annab seos

$$v_t = 33\,100\sqrt{1 + 0{,}004\ t}\ \text{cm/s}, \qquad (3)$$

kus t on õhu temperatuur ja 0,004 õhu paisumistegur. Olles määranud v_t ja λ, arvutame valemi (1) põhjal võnkesageduse f.

b) Hääle kiiruse määramine valgustusgaasis. Täites toru õhu asemel teiste gaasidega, saame eespool kirjeldatud viisil määrata hääle kiiruse ka neis gaasides.

Hääle kiiruse määramiseks valgustusgaasis juhime vastavate kraanide kaudu gaasi läbi Kundti toru. Väljavoolukraani otsa asetame gaasipõleti, et gaas ei rikuks õhku. Seejuures esinev gaasi aeglane voolamine torus ei mõjusta mõõtmistulemusi. Tuleb ainult oodata, kuni gaas on torust kogu õhu välja tõrjunud, ja alles siis asuda mõõtmisele.

Mõõtes lainepikkuse λ_1 valgustusgaasiga täidetud torus, leiame, et see on suurem kui õhus. Heli võnkesagedus on aga endine. Seega on hääle levimiskiirus valgustusgaasis suurem kui õhus. Seos (2) võimaldab otsitava kiiruse arvutamist.

c) Hääle kiiruse määramine varvas. Keskelt kinnitatud võnkuval varval tekivad otstes paisud ja kinnituskohas sõlmpunkt. Seega vastab varva kogupikkus heli poollaine pikkusele varvas. Kui varb on kinnitatud $^1/_4$ ja $^3/_4$ kauguselt otsast, siis on tema pikkus võrdne terve lainepikkusega, sest kinnituskohad on sõlmpunktid.

Kasutades seost (1), arvutame hääle kiiruse varvas.

d) Varva elastsusmooduli määramine. Hääle kiirus tahkes kehas sõltub keha elastsusmoodulist E ja tihedusest ϱ järgmise valemi kohaselt:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\varrho}}, \qquad (4)$$

millest

$$E = v^2\varrho.$$

Mõõtes v ühikutes cm/s ja ϱ ühikutes g/cm^3, saame E ühikutes

dn/cm^2. Ümberarvutuseks tehnilistesse ühikutesse peame meeles, et 1 kG/mm^2 = 0,981 · 10^8 dn/cm^2.

e) Gaasi erisoojuste c_p ja c_v suhte määramine. Valem (4) on kehtiv ka gaaside kohta, kusjuures elastsusmoodulit asendab gaasi rõhk p.

Helilainetest tingitud rõhumuutused tekitavad aga gaasis ka temperatuurimuutusi. Tihendustes tõuseb ja hõrendustes langeb temperatuur. Võngete suure sageduse tõttu jäävad temperatuurivahed püsima ja meil on tegemist nn. adiabaatilise protsessiga. Seepärast on rõhuvahed suuremad kui isotermilisel protsessil ja rõhu p asemele tuleb võtta korrutis $\varkappa p$, kus $\varkappa = c_p/c_v$, s. o. gaasi erisoojus jääval rõhul c_p, mis on jagatud gaasi erisoojusega jääval ruumalal c_v. Valemiga (4) analoogiline valem gaaside kohta on niisiis järgmine:

$$v = \sqrt{\frac{\varkappa p}{\varrho}}. \qquad (5)$$

Valem (5) võimaldab Kundti torus määratud hääle kiiruse v kaudu arvutada uuritava gaasi erisoojuste suhte $c_p/c_v = \varkappa$.

Tähendagu v, ϱ ja p vastavalt hääle kiirust, gaasi tihedust ja rõhku temperatuuril t, p_0 normaalrõhku (760 torri), ϱ_0 tihedust normaaltingimustel, s. o. 0° C ning 760-torrise rõhu puhul, ja γ gaasi paisumistegurit. Siis, kasutades ideaalse gaasi võrrandit kujul

$$\frac{p}{\varrho} = \frac{p_0}{\varrho_0}(1 + \gamma t),$$

saame, asetades selle valemisse (5):

$$v = \sqrt{\frac{\varkappa p_0 (1 + \gamma t)}{\varrho_0}},$$

millest leiame, et

$$\varkappa = \frac{v^2 \varrho_0}{p_0 (1 + \gamma t)}.$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas ja kuidas on võimalik Kundti toruga määrata hääle kiirust vedelikus?
2. Missuguse heli annab varb ristvõnkumisel, võrreldes pikivõnkumise heliga?
3. Missugustes toru kohtades on rõhu muutus maksimaalne?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 213.

III. MOLEKULAARNÄHTUSED. SOOJUS

56. TEMPERATUURI MÕÕTMINE

Keha soojusastet — temperatuuri — tajume oma meeltega, kuid see ei võimalda veel temperatuuri mõõtmist. Paneme aga tähele, et temperatuurist olenevad paljud füüsikalised suurused. Soojenemisel suureneb tahke keha pikkus, vedeliku ruumala, gaasi ruumala. Kui gaasi ruumala jääb muutumatuks, siis suureneb tema rõhk. Juhtme soojenemisel kasvab tema takistus, pooljuhi soojenemisel aga kahaneb takistus tugevasti. Termoelemendi jootekohtade temperatuuride vahe muutumisel muutub ka termopinge. Temperatuuridel üle 500° C kiirgavad kehad nähtavat valgust. Temperatuuri tõusmisel muutub valgus intensiivsemaks ja värvuselt punasest kollakaks kuni valgeks jne. Kõiki neid temperatuurist olenevaid suurusi nimetame *temperatuuri parameetriteks*. Parameetrite mõõtmise teel võime mõõta ka temperatuuri. Tekib ainult küsimus skaalade valikust, s. o. olenevuse valikust temperatuuri ja mõne tema parameetri vahel. Otstarbekohane on valida kõige lihtsam olenevus — lineaarne, nagu näiteks varda pikkuse olenevus temperatuurist kujul

$$l_t = l_0(1 + \alpha t),$$

kus l_t on varda pikkus temperatuuril t, l_0 varda pikkus temperatuuril $t = 0°$ C (kokkuleppel!) ja α paisumistegur, s. o. varda pikkusühiku suurenemine soojenemisel null kraadist ühe kraadini. Kogemus näitab, et kui me valime temperatuuri mõõtmise vardaks näiteks raudvarda, siis kõikide teiste ainete temperatuuriparameetrid ei olene temperatuurist lineaarselt. Seega selline temperatuuriskaala sõltub täielikult aine ja parameetri valikust. Kuid on olemas võimalus temperatuuri mõõta ka selliselt, et mõõtmistulemus ei olene mõõtmiseks kasutatava aine spetsiifilistest omadustest.

Termodünaamikas tõestatakse, et ideaalse soojusmasina termodünaamiline kasutegur $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ ei olene ainest, millega masin töötab, vaid ainult jahutaja ja soojendaja temperatuuridest T_2 ja T_1, kusjuures eelduseks on, et temperatuur on mõõdetud ide-

aalse gaasi termomeetriga, s. o. gaasiga, mis allub Mendelejev-Clapeyroni seadusele

$$pV = nRT,$$

kus p on rõhk, V ruumala, T absoluutne temperatuur, R universaalne gaasikonstant ja n moolide arv.

Põhimõtteliselt võiks mehaaniliste mõõtmiste kaudu leida η. Kui lepime kokku, et vee keemispunkti ja jää sulamispunkti vahe on 100 kraadi, siis, määrates η masina puhul, mille soojendajaks on keev vesi ja jahutajaks sulav jää, leiame keeva vee absoluutse temperatuuri $T_1 = \frac{10}{\eta}$. Nii saaksime temperatuuride skaala ja ideaalne soojusmasin oleks eksimatuks termomeetriks. Sellist temperatuuride skaalat nimetatakse termodünaamiliseks temperatuuride skaalaks. Praktiliselt on sellise termomeetri valmistamine võimatu, sest ei ole võimalik luua ideaalset soojusmasinat ega küllaldase täpsusega arvestada reaalse masina soojuskadusid ja reaalse protsessi mittepööratavust.

Tuleb silmas pidada, et termodünaamilist temperatuuri mõõdaks termomeeter, mis töötab ideaalse gaasiga. Tõsi küll, meil ei ole käepärast ka ideaalset gaasi, kuid reaalne gaas läheneb omadustelt ideaalsele gaasile, kui 1) molekulidevahelised tungid vähenevad kuni nullini ja 2) molekulide ruumala muutub kaduvväikeseks, võrreldes ühe molekuli kohta tuleva ruumalaga gaasis. Neile nõuetele vastab hõre gaas. Lähtudes sellest asjaolust mõõdetakse mõne jääva punkti (näiteks sulamispunkti) termodünaamiline temperatuur sel teel, et määratakse sel temperatuuril vesiniku või heeliumi jaoks korrutise pV suurus mitmel rõhul. Kogemus näitab, et kui rõhu väärtused on alla üht atmosfääri, siis langevad mõõtmistulemused diagrammil $pV - p$ ühele sirgele, mida on lihtne ekstrapoleerida kuni rõhuni null. Rõhul null on meil tegemist lõpmata hõreda gaasiga, mis peaks käituma kui ideaalne gaas. Jagades rõhul null saadud $(pV)_0$ väärtuse universaalse gaasikonstandiga, saamegi mõõdetava keha absoluutse termodünaamilise temperatuuri.

Vesiniktermomeetriga ei saa temperatuuri mõõta väikestes ruumalades ja mõõtmine ise on seotud suure ajakuluga. Seetõttu praktilistel mõõtmistel ei kasutata eelkirjeldatud meetodit, vaid ainult tema abil saadud tulemusi.

Praktilistel täpsetel temperatuurimõõtmistel kasutatakse nn. rahvusvahelist temperatuuriskaalat. See skaala on defineeritud: 1) rea jäävate temperatuuripunktidega, mis on suure täpsusega määratud eelkirjeldatud meetoditega, ja 2) interpolatsiooniriistadega, millede abil saadakse konstantsete punktide vahel olevad temperatuurid.

Rahvusvahelise temperatuuriskaala esimese järgu konstantsed temperatuuripunktid on järgmised:

hapniku keemispunkt	1 at juures	—182,97° C
jää sulamispunkt	1 at „	0,000° C

vee keemispunkt	1 at	juures	100,000°C
puhta väävli keemispunkt	1 at	„	444,60° C
puhta hõbeda hangumispunkt	1 at	„	960,5° C
puhta kulla hangumispunkt	1 at	„	1063,0° C

Peale nende on olemas veel teise järgu punktid, millede reprodutseerimisel ei ole võimalik saavutada esimese järgu punktide täpsust. Esitame mõned teise järgu temperatuuripunktid:

CO_2 sublimatsioonipunkt	1 at juures	—78,5
Hg hangumispunkt		—38,87
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O \rightarrow Na_2SO_4 +$ lahus		32,38
Salooli hangumispunkt		41,7
Naftaliini	„	80,1
Sn	„	231,85
Cd	„	320,9
Pb	„	327,3
Zn	„	419,45
Sb	„	630,5
Cu	„	1083
Pt	„	1773,5

Interpolatsioonivahendid on järgmised:

1) Puhta plaatina takistustermomeeter kujutab endast peenikest plaatinatraati, mis on bifilaarselt mähitud kvarts- või vilgukivi-alusele, millest väljuvad jämedamad Pt-juhtmed. Kasutatakse vahemikus —190 kuni +660° C. Takistuse olenevus temperatuurist vahemikus 0° C — 660° C on antud teise astme polünoomiga

$$R = R_0(1 + At + Bt^2).$$

Konstandid määratakse kolme punkti järgi, milleks on jää sulamispunkt, vee keemispunkt ja väävli keemispunkt. Vahemikus —190 kuni 0° C on takistus antud neljanda astme polünoomiga

$$R = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],$$

kus A ja B on samad mis eelmises polünoomis ning C tuleb määrata hapniku keemispunkti järgi.

2) Plaatina—plaatina-roodiumi termoelementi (10% Rh) kasutatakse vahemikus 660—1100° C. Termoelektromotoorse jõu sõltuvus temperatuurist avaldub teise astme polünoomiga

$$E = a + bt + ct^2.$$

Konstandid määratakse kolme punkti järgi, milleks on Sb (630,5° C), Ag (960,5° C) ja Au (1063° C) hangumispunktid.

3) Optiline (kaduva niidi) püromeeter on tarvitusel ülalpool 1100° C. Kaliibritakse Wieni seaduse alusel Au (1063° C) ja Pt (1773,5° C) hangumispunktide järgi.

Kõigile tuntud elavhõbetermomeeter on rahvusvahelisest temperatuuriskaalast välja jäänud. Põhjusi selleks on kaks: võrdlemisi väike temperatuurivahemik, mida saab mõõta elavhõbe-

termomeetriga (—39 kuni +450° C), ja väike täpsus, mis on tingitud klaasi omadustest (paisumise järelmõjud) ja ka sellest, et Hg-sammas koos klaas-skaalaga asub tavaliselt ebaühtlase temperatuuri väljas, mistõttu paisumine on ebaühtlane. Siiski on ta laialt levinud teatavate mugavuste tõttu tema kasutamisel. Ta on väike kompaktne riist, mis ei karda happeid ega leelisi, kuigi kardab väga järske temperatuurimuutusi. Kui näiteks asetada külm termomeeter otse keevasse vette, siis võib kindel olla, et ta kuulike praguneb. Termomeetrid lugemiveaga 0,2° ja alla selle kuuluvad mõõdukomitee järjekindla kontrolli alla (iga 2 aasta tagant) nagu ka kõik eelmainitud püromeetrid.

Temperatuure vedela vesiniku ja vedela heeliumi piirkonnas mõõdetakse samuti gaastermomeetriga. Mugavamaks töötamiseks on koostatud tabelid-graafikud, mis annavad vesiniku ja heeliumi küllastatud auru rõhu olenevalt temperatuurist. Tabelis esitatavad väärtused ulatuvad temperatuurini 0,7° K. Madalamaid temperatuure saavutatakse magnetokaloorilise efekti kaudu ja mõõdetakse paramagneetiku vastuvõtlikkuse muutuste kaudu. Sel teel on hinnatud temperatuure kuni 0,004° K.

Kirjandust

Методы измерения температуры, I и II, ИЛ, Москва, 1954.

57. JOONPAISUMISKOEFITSIENDI MÄÄRAMINE FUESSI JÄRGI

1. Tööülesanne

Metallvarva keskmise joonpaisumiskoefitsiendi määramine.

2. Töövahendid

Joonpaisumiskoefitsiendi määramise riist, termomeeter, varbsirkel või mõõtjoonel, keedukolb statiiviga, gaasipõleti ja kausike.

3. Töö käik

a) Keskmiseks joonpaisumiskoefitsiendiks mõnes temperatuurivahemikus nimetatakse ühe pikkusühiku kohta tulevat keha pikenemist temperatuuri muutumisel 1° C võrra selles temperatuurivahemikus. Kui keha pikkus 0° C puhul on l_0 ja t° C puhul l_t, siis keskmine joonpaisumiskoefitsient temperatuurivahemikus 0° — t° on

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{tl_0} = \frac{\Delta l_0}{tl_0}. \qquad (1)$$

Joonpaisumiskoefitsiendi ühiku tähiseks on $\frac{1}{\text{kr}}$. Valemist (1)

nähtub, et joonpaisumiskoefitsiendi määramiseks tuleb otseselt või kaudselt mõõta kolm suurust: l_t, l_0 ja t.

b) Fuessi riist joonpaisumiskoefitsiendi määramiseks koosneb soojendajast ja pikenemise mõõtmise mehhanismist. Varb, mille pikenemist määratakse, paigutatakse püst-vasktorusse, mis on ümbritsetud õõnsa silindriga. Soojendamine toimub silindrist läbi juhitava vee või veeauru abil.

Varva pikenemist mõõdetakse erilise mikromeetrilise seadisega. Varva alumine ots toetub kruvile, mille abil on võimalik varba mikromeetriliselt tõsta või allapoole lasta. Varva ülemise otsa vastu toetub kangseadis, mille abil varva ülemist otsa hoitakse samas kõrguses, n.-ö. n u l l s e i s u s. Nullseisu puhul on seadise teravikud vastakuti.

Mõõtmise algul määratakse kruvisammu kõrgus ja seatakse siis varva ülemine ots alumise toetuskruvi pööramisega nullseisu. Seejuures registreeritakse kruvipea seis. Soojenedes varb pikeneb, mistõttu ta ülemine ots tõuseb nullseisust kõrgemale. Et varva ülemist otsa nullseisus hoida, tuleb kruvi vastavalt allapoole lasta. Kui varb lakkab paisumast, registreeritakse kruvi seis ja arvutatakse kruvi pöördest varva pikenemine Δl_0 katsel esinenud temperatuurivahemikus $t - t_0$.

c) Töö käik on järgmine:

1) Varbsirkliga või mõõtjoonlaga mõõdame varva algpikkuse l_0.

2) Tutvume mikromeetrilise seadisega ja määrame, kui palju nihkub kruvi edasi pöördumisel ühe kruvipeal oleva jaotise võrra.

3) Paigutame varva aparaati, reguleerime ülemise otsa nullseisu ja registreerime kruvi seisu, samuti varva algtemperatuuri t_0 (toatemperatuur).

4) Võtame keedukolbi vett, ajame selle gaasipõleti leegil keema ja juhime keeva vee auru ülemise toru kaudu läbi aparaadi. Kondenseerunud vee kogumiseks paneme alumise toru otsa alla kausikese.

5) Jälgime varva ülemise otsa eemaldumist nullseisust ja alumise kruvi abil reguleerime selle tagasi nullseisu.

6) Kui varb enam ei paisu, registreerime kruvi seisu.

7) Kruvi alg- ja lõppseisust määrame varva pikenemise Δl_0.

8) Lõpptemperatuuriks t võtame vee keemistemperatuuri normaalrõhu puhul.

9) Saadud andmeist arvutame keskmise joonpaisumiskoefitsiendi temperatuurivahemikus $t—t_0$:

$$\alpha = \frac{\Delta l_0}{l_0(t - t_0)}.$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks tuleb kuum aur juhtida soojendajasse ülalt?
2. Kuidas oleneb keemistemperatuur õhurõhust?
3. Missuguse suuruse täpsest mõõtmisest eeskätt oleneb joonpaisumiskoefitsiendi määramise täpsus?

4. Defineerida pind- ja ruumpaisumiskoefitsient. Missugune on nende nimetus?

5. Kuidas on pind- ja ruumpaisumiskoefitsient seotud joonpaisumiskoefitsiendiga?

6. Raudplekis on ümmargune ava läbimõõduga 1 cm. Mitme μ^2 (mm^2) võrra muutub selle ava suurus temperatuuri tõusmisel 10° C võrra?

7. Kaheliitrine teekann on ääreni vett täis. Mitu cm^3 vett voolab üle ääre välja, kui temperatuur tõuseb 80° C võrra?

5. Kirjandust

L a n g jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 229—231.

58. TAHKE KEHA ERISOOJUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Erisoojuse mõiste. Tahke keha erisoojuse määramine segamismeetodil.

2. Töövahendid

Kalorimeeter, termomeeter, kaalud, tahke keha, soojendusanum, gaasipõleti ja kolmjalg.

3. Töö käik

a) A i n e e r i s o o j u s e k s (c) nimetatakse soojushulka kalorites, mis kulub selle aine 1 g temperatuuri tõstmiseks 1° C võrra. Sellest järeldub, et erisoojuse c tähiseks on $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kr}}$ ja et vee erisoojuseks on $1\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kr}}$.

Erisoojus oleneb teataval määral temperatuurist, millest soojendamine algab. Kitsamas temperatuurivahemikus, näiteks 0°—100° C, võime aga erisoojuse lugeda tegelikult konstantseks.

b) Erisoojuse määramine s e g a m i s m e e t o d i l seisneb selles, et juhime uuritavast kehast teatava hulga soojust vette (kalorimeetrisse) ja arvutame selle põhjal keha aine erisoojuse.

Olgu näiteks kalorimeetris M g vett algtemperatuuriga t_1 ning olgu uuritava keha mass m g ja algtemperatuur t_2. Kui keha algtemperatuur on kõrgem kalorimeetris oleva vee algtemperatuurist, siis keha vette asetamisel vee temperatuur tõuseb ja keha temperatuur langeb. See toimub seni, kuni saabub tasakaal, s. o. kuni mõlemad omavad sama temperatuuri t. Eeldades, et kogu soojushulk, mille keha kaotab, läheb vette, saame võrrandi:

$$\underbrace{cm(t_2 - t)}_{\text{keha kaotab soojust}} = \underbrace{M(t - t_1)}_{\text{vesi saab soojust juurde}},$$

millest

$$c = \frac{M(t - t_1)}{m(t_2 - t)}. \qquad (1)$$

c) Erisoojuse täpsemaks määramiseks tuleb valemis (1) teha mõned p a r a n d u s e d.

Tegelikult ei lähe kogu soojus kehast selle jahtumisel ainult

vette, vaid osa soojust kulub kalorimeetri, segaja ja termomeetri temperatuuri tõstmiseks, sest kõik need esemed omavad veega võrdset temperatuuri. Nimetame kalorimeetri *vesiväärtuseks* V seda *vee hulka* grammides, mille temperatuuri tõstmiseks 1° C võrra kulub niisama palju soojust kui kalorimeetri anuma, segaja ja termomeetri temperatuuri tõstmiseks 1° C võrra. Et vee erisoojus on $1\ \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot\text{kr}}$, siis vesiväärtus V võrdub ühtlasi *arvuliselt* soojushulgaga kalorites, mis kulub anuma, segaja ja termomeetri temperatuuri tõstmiseks 1° C võrra.

Arvestades kalorimeetri vesiväärtust, saame valemi (1) asemel erisoojuse määramiseks seose $cm(t_2 - t) = M(t - t_1) + V(t - t_1)$, millest

$$c = \frac{(M+V)(t-t_1)}{m(t_2-t)}.$$

Selle asemel et arvutada kogu kalorimeetri vesiväärtust (V), võime arvutada tema üksikute osade vesiväärtused ja need siis liita. Olgu näiteks anuma vesiväärtus V_1, segaja vesiväärtus V_2, termomeetri vesiväärtus V_3. Siis kogu kalorimeetri vesiväärtus $V = V_1 + V_2 + V_3$. Loomulikult tuleb neist vesiväärtuse komponentidest eeskätt arvestada kõige suuremaid.

Kui kalorimeetris esinevate esemete ained on teada, siis võime nende ainete erisoojuste põhjal arvutada kalorimeetri vesiväärtuse. Samuti võime selle määrata katseliselt, segades näiteks kalorimeetris kaht veehulka, millede algtemperatuurid on teada, ja määrates segu tegeliku lõpptemperatuuri erinevuse teoreetiliselt arvutatust. Selle põhjal saamegi arvutada kalorimeetri vesiväärtuse.

Tõepoolest, olgu kalorimeetris näiteks m_1 g vett temperatuuriga t_1. Valame sinna m_2 g vett temperatuuriga t_2, kusjuures $t_2 > t_1$. Kui puuduks soojusekadu vesiväärtuse arvel, siis peaks segu lõpptemperatuur olema $t = \frac{m_1t_1 + m_2t_2}{m_1 + m_2}$. Katsest saadav lõpptemperatuur t_0 on aga $(t - t_0)°$ võrra madalam, sest osa soojust kulub anuma, segaja ja termomeetri temperatuuri tõstmiseks. Olgu kalorimeetri vesiväärtuseks V; siis

$$V(t_0 - t_1) = (m_1 + m_2)(t - t_0),$$

anum + segaja + termomeeter saab soojust juurde — vesi kalorimeetris kaotab soojust

millest

$$V = \frac{(m_1 + m_2)(t - t_0)}{t_0 - t_1}.$$

Termomeetri vesiväärtust on kõige hõlpsam arvutada tema vetteulatuva osa ruumala (cm^3) põhjal, korrutades seda teguriga 0,46. Kui mõõtmisel termomee-

ter ulatub vette näiteks 5 cm^3 võrra, siis sel juhul tuleb võtta termomeetri vesiväärtuseks $0{,}46 \cdot 5 = 2{,}30$. Termomeetri vetteulatuva osa ruumala määrame mensuuri abil.

Tegur 0,46 võrdub ligikaudu klaasi erisoojuse ja tiheduse korrutisega ning mõõdab seega 1 cm^3 klaasi soojusmahtuvust. Elavhõbeda erisoojuse ja tiheduse korrutis annab ligikaudu sama arvu. Sellest järeldame, et 1 cm^3 elavhõbeda soojusmahtuvus võrdub 1 cm^3 klaasi soojusmahtuvusega, missugune seos ongi aluseks eelmise võtte rakendamisel.

Nagu esitatud seletustest nähtub, on eelmine võte termomeetri vesiväärtuse määramiseks õige nn. varbtermomeetri puhul, kus kogu termomeetri ruumala, välja arvatud tühi kapillaartoru, on täidetud klaasi või elavhõbedaga. On aga termomeetri kapillaar paigutatud klaastorusse, kus on rohkesti õhuga täidetud ruumi, siis tuleb eelmise teguri (0,46) rakendamiseks termomeetri vetteulatuva osa ruumalast lahutada vastav seesmine õhuga täidetud ruumala.

Kui kalorimeetris kasutatav veehulk on küllalt suur, siis vesiväärtusest tingitud parandus tulemust oluliselt ei mõjusta. Vastasel korral tuleb arvestada ka vesiväärtust.

d) Töö käik on järgmine:

1) Kaalumise teel määrame järgmised massid grammides:

antud keha mass	$m = \ldots\ldots$
kalorimeetri anuma mass	$m_1 = \ldots\ldots$
segaja mass	$m_2 = \ldots\ldots$
kalorimeetri anuma + vee mass	$M_1 = \ldots\ldots$
sellest kalorimeetri vee mass	$M = M_1 - m_1 = \ldots\ldots$

2) Täidame soojendusanuma (mitte selle keskel oleva silindrilise õõnsuse, kuhu paigutatakse uuritav keha!) rohkem kui poolest saadik veega ja süütame tule. Peenikese niidi või traadi otsas laseme uuritava keha (kuivalt) soojendusanuma õõnsusse. Kui vesi on keema hakanud, siis reguleerime tule väiksemaks. Laseme uuritaval kehal sel viisil soojeneda veel vähemalt 15 min pärast vee keemahakkamist, et ta omandaks vee keemistemperatuuri ($t_2 = 100°$ C). Katse lõpul tuli kustutada gaasikraani sulgemisega (mitte ära puhudes!).

Gaasipõleti süütamine toimub järgmiselt: sulgeda põletis õhu juurdevooluava (kui see on olemas), avada osaliselt gaasikraan, oodata 2—3 sekundit ja alles siis süüdata põletist väljuv gaasivool, seejärel avada õhu juurdevooluava ning gaasikraan täielikult ja reguleerida nende abil leek.

Kui leek lööb põletis alla, tuleb gaasikraan sulgeda ja süütamist uuesti alustada.

3) Vahepeal segame vett kalorimeetris ja jälgime selle temperatuuri. Soovitav on, et vee temperatuur kalorimeetris oleks mõni kraad alla toatemperatuuri. Mispärast?

Termomeetri lugemid võtta täpsusega 0,1° C! Enne mõõtmisele asumist termomeetri skaalaga lähemalt tutvuda! Käituda termomeetriga äärmiselt ettevaatlikult!

Kalorimeeter hoida tulest eemal, et mitte soojendada teda tule kiirgusega!

Kalorimeetri vee temperatuuri lugemi võtame vahetult enne keha laskmist kalorimeetrisse.

4) Kui keha on soojendusanumas küllalt soojenenud, laseme ta kiiresti, kuid ettevaatlikult kalorimeetrisse. Seejuures hoiame keha kogu aeg niidi otsas rippumas (mitte põhja lasta!) ja segame vett kalorimeetris. Jälgides pidevalt vee temperatuuri tõusu, fikseerime selle maksimaalse väärtuse t.

5) Arvutame kalorimeetri vesiväärtuse anuma ja segaja aine erisoojuse ja termomeetri ruumala põhjal. Seejuures tuleb termomeetrist arvestada ainult seda osa, mis mõõtmisel vette ulatub.

6) Saadud andmeist arvutame valemi (2) põhjal otsitava erisoojuse (ainult 2 koha täpsusega!).

4. Täiendavaid küsimusi

1. Defineerida soojushulga ühikud (cal, kcal).
2. Mis vahe on soojusmahtuvuse ja erisoojuse vahel?
3. Tuletada erisoojuse ühik valemitest (1) ja (2).
4. Mispärast soojendatakse keha kuivalt, mitte aga keevas vees hoides?
5. Kas keeva vee temperatuur on alati 100° C?
6. Miks ei tohi soojendatavat keha kalorimeetri põhja lasta?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 233.

59. AURU TIHEDUSE MÄÄRAMINE VIKTOR MEYERI JÄRGI

1. Tööülesanne

Eetri või mingi teise kergesti aurustuva vedeliku auru tiheduse määramine õhu suhtes normaaltingimusil.

2. Töövahendid

Seadis auru tiheduse määramiseks, klaaskuulike uuritava vedeliku jaoks, väike katseklaas kuulikese täitmiseks, analüütilised kaalud vihtidega, gaasipõleti, mõõtjoonel mm-jaotistega, baromeeter ja termomeeter.

3. Töö käik

a) Aine tiheduseks d nimetatakse selle aine ruumalaühiku massi, s. o.

$$d = \frac{m}{V}.$$

Et gaaside ja aurude ruumalad sõltuvad suurel määral rõhust ja temperatuurist, siis võetakse ruumala määramisel temperatuuriks 0° C ja rõhuks 760 torri. Neid tingimusi nimetatakse normaaltingimusteks.

Gaasi ruumalaühiku (1 cm^3) mass on väga väike. Seepärast võrreldakse gaaside tihedust kuiva õhu tihedusega samadel tingimustel, s. o. määratakse gaasi tiheduse ja õhu tiheduse suhe:

$$D = \frac{\text{auru (gaasi) tihedus}}{\text{õhu tihedus}}.$$

Kui gaasi ruumala normaaltingimustel on V_0, siis Boyle-Mariotte—Gay-Lussac'i seaduse põhjal

$$V_0 = V \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{1}{1 + \gamma t},$$

kus V on gaasi ruumala rõhu p ja temperatuuri t puhul ning γ on gaasi ruumpaisumiskoefitsient.

Seega gaasi tihedus

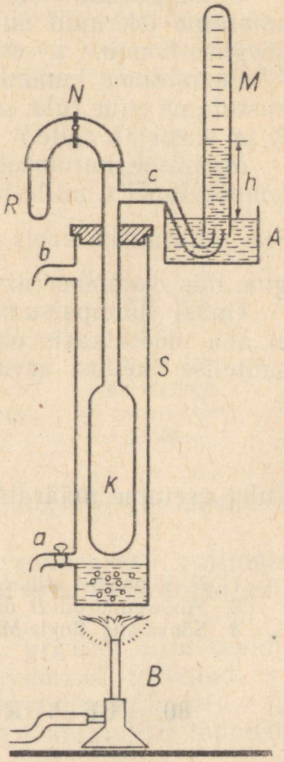
$$d = \frac{m}{V_0} = \frac{m \cdot 760\,(1 + \gamma t)}{V \cdot p}.$$

Õhu tihedus normaaltingimustel on 0,001293 $\frac{g}{cm^3}$ ja gaasi ning õhu tiheduste suhe $D = \frac{m \cdot 760\,(1 + \gamma t)}{V \cdot p \cdot 0{,}001293} = 587800 \frac{m \cdot (1 + \gamma t)}{V \cdot p}$.

b) Katseseadise skeem on esitatud joonisel 48.

Pika kaelaga klaaspudel *K*, mis on varustatud harutoruga *c*, asetseb metallsilindris *S*. Pudeli kaelale on jätkatud näpitsatega *N* suletav kummitoru, mille otsas on katseklaas *R* uuritava aine kuulikesega. Metallsilindri *S* põhjas on vesi, mida kuumutatakse gaasipõletiga *B*. Kraan *a* on määratud veepinna reguleerimiseks, toru *b* auru ärajuhtimiseks ja toru *c* õhu juhtimiseks pudelist *K* veevannis *A* kummuli olevasse mõõtklaasi *M*.

c) Katse teostamiseks kaalume analüütilistel kaaludel tühja klaaskuulikese. Kuumutame kuulikest ja asetame tema lahtise otsa uuritavasse vedelikku. Jahtumisel tõmbub kuulikesse vedelikku. Seda võtet korrates täidame kogu kuulikese. Sulatame kuulikese kaela otsa ettevaatlikult tikutule leegis kinni. Et kuulike seejuures ei kuumeneks, hoiame teda samaaegselt külmas



Joon. 48. Seadis auru tiheduse määramiseks.

vees või niiskes lapis. Kaalume kuulikese uuesti ja leiame kaalude vahest vedeliku massi m g.

Avame metallsilindri kraani a ja valame silindrisse vett, kuni kraanist vesi voolama hakkab. Suleme kraani. Täidame vanni ja mõõtklaasi veega ning asetame viimase kummuli vanni. Kui pudel K pole kuiv ja puhas, siis puhastame ta loputades 1) veega, 2) piiritusega ja 3) eetriga. Kuivatamiseks soojendame pudelit põleti leegi kohal, puhudes pika klaastoruga õhku (mitte suust!) pudeli põhja ja hoides tema lahtist otsa allapoole, et kiirendada õhust raskema eetriauru väljapääsu. Asetame kuulikese hoidjasse R, suleme näpitsa N ja ühendame kummitoru pudeliga K. Asetame pudeli K metallsilindrisse ja õhujuhtimistoru c vanni A, kuid mitte mõõtklaasi M alla. Süütame põleti ja keedame vett, kuni pudelis K on temperatuur konstantne, mille tunnuseks on õhumullide väljumise lõppemine toru c kaudu. Nüüd asetame toru c mõõtklaasi M alla ja laseme kuulikese langeda anuma põhja, kus ta soojenedes auru survel lõhkeb ja vastava ruumala õhku toru c kaudu mõõtklaasi alla paiskab.

Ootame, kuni veesamba kõrgus mõõtklaasis enam ei muutu, määrame tekkinud auru ruumala V cm^3 ja mõõdame veesamba kõrguse h mm.

Eemaldame kummitoru pudeli otsast ja kustutame tule. (Kui kustutame enne tule, siis tõmbub külm vesi toru c kaudu pudelisse K ja purustab selle.)

Määrame baromeetri seisu p_1 mm ja mõõtklaasis oleva õhu temperatuuri t, mille loeme võrdseks vanni A vee temperatuuriga. Siis rõhk mõõtklaasis $p = p_1 - \frac{h}{13{,}6}$, kus $\frac{h}{13{,}6}$ on veesamba kõrgus, mis on ümber arvutatud elavhõbedasamba kõrgusele.

Gaasi ruumpaisumiskoefitsiendiks võtame 0,004, arvestades, et õhk mõõtklaasis on veeaurust täiesti küllastunud. Siis saame suhtelise tiheduse arvutamiseks valemi

$$D = 587800 \frac{m(1 + 0{,}004t)}{V\left(p_1 - \frac{h}{13{,}6}\right)},$$

kuhu asetame määratud suurused.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Mille poolest erinevad gaasid, aurud ja küllastatud aurud üksteisest?
2. Missugune on D dimensioon?
3. Sõnastada Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadused.

60. VEE AURUSTUMISSOOJUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Vee aurustumissoojuse määramine keemistemperatuuril.

2. Töövahendid

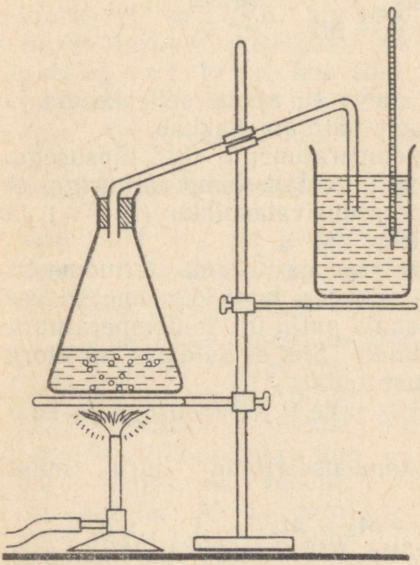
Kalorimeeter, termomeeter, keedukolb koos aurujuhtimistoruga, kaalud vihtidega, statiiv ja gaasipõleti.

3. Töö käik

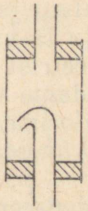
a) Aurustumissoojuseks mingil kindlal temperatuuril nimetatakse seda soojushulka, mis kulub 1 g aine üleviimiseks vedelast olekust gaasilisse olekusse sellel temperatuuril, või eelmisega võrdset soojushulka, mis vabaneb auru kondenseerumisel vedelikuks sellel temperatuuril. Seega on aurustumissoojuse ühikuks cal/g.

Aurustumissoojus oleneb temperatuurist, millel protsess toimub. Aurustumissoojust keemistemperatuuril nimetatakse keemissoojuseks.

Keemissoojuse määramiseks juhime keeva vee auru kalorimeetrisse, kus ta kondenseerub.



Joon. 49. Seadis vee keemissoojuse määramiseks.



Joon. 50. Kondenseerunud vee püünis.

Seejuures vabaneva soojuse arvel tõuseb kalorimeetris oleva vee temperatuur.

Et vältida juba torus kondenseerunud veepiisakeste sattumist kalorimeetrisse, on täpsetel mõõtmistel toru otsa paigutatud püünis (joon. 50), mis laseb edasi ainult auru.

Olgu vee keemissoojus a cal/g. Siis m grammi auru veeldumisel vabaneb ma cal soojust. Kondenseerumisel tekkinud vee edasisel jahtumisel kandub kalorimeetrisse soojushulk $m(t - t_2)$ cal, kus t tähistab keemistemperatuuri ja t_2 kalorimeetri lõpptemperatuuri.

Kondenseerumisel tekkinud soojuse arvel suureneb kalorimeetri ja vee soojushulk $(V + M)\ (t_2 - t_1)$ cal võrra, kus M on

kalorimeetri vee mass, V kalorimeetri vesiväärtus ja t_1 kalorimeetri algtemperatuur.

Et mõlemad soojushulgad on võrdsed, siis $m(t - t_2) + ma = (M + V)\ (t_2 - t_1)$, millest

$$a = \frac{(M+V)(t_2 - t_1) - m(t - t_2)}{m} \qquad (1)$$

b) Määrame järgmised massid grammides täpsusega 0,1 g:

kalorimeetri anuma mass . . $m_1 = \ldots\ldots$
„ anuma + vee mass . . $M_1 = \ldots\ldots$
„ vee mass $M = M_1 - m_1 = \ldots\ldots$

Valame keedukolbi umbes 200 cm³ vett, ajame selle keema ja ootame, kuni aur torust intensiivselt väljuma hakkab.

Määrame kalorimeetri vee algtemperatuuri t_1 0,1° täpsusega. Vee kalorimeetris võtame võimalikult madala temperatuuriga, et saaksime kasutada suuremat temperatuurivahemikku $(t_2 - t_1)$ ja seega kondenseerida suuremat auruhulka.

Juhime tekkinud auru kalorimeetrisse ja ootame, termomeetri või vastava segajaga vett hoolega segades, kuni kalorimeetri vee temperatuur on tõusnud umbes niisama palju üle toatemperatuuri, kui palju ta varem oli sellest madalam. Siis eemaldame aurutoru kalorimeetrist. (Tuld mitte enne kustutada!)

Mõõdame vee lõpptemperatuuri t_2 jälle 0,1° täpsusega ja kaalume kalorimeetri koos veega.

Kalorimeetri anuma + vee + kondenseerunud auru mass $M_2 = \ldots\ldots$ g.

Kondenseerunud auru mass $m = M_2 - M_1 = \ldots\ldots$ g.

Auru temperatuuriks t võime võtta 100° C, sest õhurõhust tingitud parandus on väike.

Kalorimeetri vesiväärtuse V määramine toimub nii, nagu on kirjeldatud tahke keha erisoojuse määramisel (§ 58).

Saadud andmeist arvutame tuletatud valemi põhjal vee keemissoojuse a.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks tõmbub vesi kalorimeetrist keedukolbi, kui tuli kustutada enne kalorimeetri eemaldamist aurutoru otsast?
2. Millest tekib auru vette juhtimisel pragin?
3. Millega seletada katse puhul sageli esinevat vee tõukelist keemist?
4. Kuidas tuletub keemissoojuse ühik valemist (1)?
5. Kuidas oleneb keemistemperatuur õhurõhust?
6. Sõnastada keemisseadused.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 286.

61. c_p JA c_v SUHTE MÄÄRAMINE CLEMENT-DESORMES'I JÄRGI

1. Tööülesanne

Määrata õhu c_p ja c_v suhe.

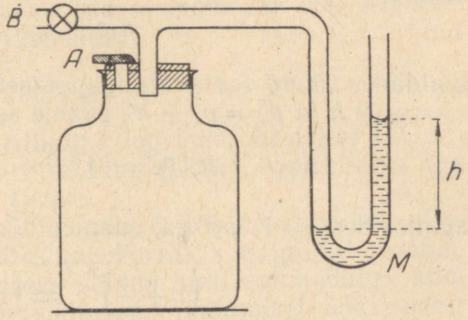
2. Töövahendid

Clément-Desormes'i riist c_p/c_v määramiseks (joon. 51).

3. Töö käik

Gaasi oleku muutust nimetatakse isotermiliseks, kui selle juures ei muutu gaasi temperatuur. Siis on kehtiv Boyle-Mariotte'i seadus: $pV = \text{konst}$. Gaasi oleku muutus on adiabaatiline, kui selle juures ei toimu soojuse vahetust ümbrusega. Sel juhul on kehtiv Poisson'i seadus: $pV^{\varkappa} = \text{konst.}$, kus p tähendab gaasi rõhku ja V ruumala nagu Boyle-Mariotte'i seaduseski ning $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ on gaasi erisoojuste suhe (c_p on gaasi erisoojus jääval rõhul ja c_v erisoojus jääval ruumalal). Paisudes jääval rõhul, teeb gaas lisaks veel välistööd, mistõttu $c_p > c_v$ ja $c_p/c_v > 1$.

Clément-Desormes'i meetod võimaldab lihtsal viisil määrata c_p ja c_v suhet. Vastav aparaat koosneb umbes 10-liitrise mahuga pudelist, mille korki läbiva toru ühe haru küljes on vedelikmanomeeter M ja teine haru B on kraaniga suletav. Korgi teine ava on võrdlemisi suur (läbimõõt 2—3 cm) ning klapiga A avatav ja suletav.



Joon. 51. Clément-Desormes'i riist.

Katse teostamiseks suleme klapi A ja toru B kaudu õhku juurde puhudes tekitame pudelis ülerõhu. Manomeeter M näitab ülerõhku h, mis hakkab kohe vähenema ja omandab konstantse väärtuse alles siis, kui adiabaatilisest kokkusurumisest tingitud temperatuuritõus on tasakaalustunud ümbruse temperatuuriga, milleks kulub ca 5 minutit. Avame klapi A umbes pooleks sekundiks, et rõhk pudelis tasakaalustuks välisrõhuga. Protsess on adiabaatiline ja gaasi oleku muutust kirjeldab Poisson'i võrrand. Kui tähistame gaasi rõhku ja ruumala enne klapi avamist vastavalt p_1 ja V_1 ning kohe pärast klapi sul-

gemist p_2 ja V_2, siis

$$p_1 V_1^{\varkappa} = p_2 V_2^{\varkappa}. \tag{1}$$

Pudelisse jäänud gaasi temperatuur langeb, sest protsess on adiabaatiline ning klapi avamisel rõhk väheneb. Ootame ca 10 minutit, kuni pudelis oleva õhu temperatuur saab võrdseks ümbruse temperatuuriga, mida näeme sellest, et manomeetri seis enam ei muutu. Et gaasi temperatuurid katse algul ja lõpul on võrdsed, siis võime Boyle-Mariotte'i seadust kasutades kirjutada:

$$p_1 V_1 = p_3 V_3,$$

kus p_3 ja V_3 tähistavad rõhku ning ruumala lõppolekus. Ruumalad V_2 ning V_3 on võrdsed (pudeli ruumala) ja seega

$$p_1 V_1 = p_3 V_2. \tag{2}$$

Suurused V_1 ja V_2 saame seostest (1) ja (2) elimineerida. Selleks tõstame seose (2) astmesse $\varkappa$:

$$p_1^{\varkappa} V_1^{\varkappa} = p_3^{\varkappa} V_2^{\varkappa}$$

ning jagame ta seosega (1):

$$\frac{p_1^{\varkappa}}{p_1} = \frac{p_3^{\varkappa}}{p_2},$$

millest

$$p_2 p_1^{\varkappa - 1} = p_3^{\varkappa}. \tag{3}$$

Avaldades rõhud vastavate manomeetrilt loetud ülerõhkude kaudu: $p_1 = p_2 + h$ ja $p_3 = p_2 + h'$, saame seose (3) asemele:

$$p_2 (p_2 + h)^{\varkappa - 1} = (p_2 + h')^{\varkappa}. \tag{4}$$

Jagades seose (4) $p_2^{\varkappa}$-ga, saame:

$$\left(1 + \frac{h}{p_2}\right)^{\varkappa - 1} = \left(1 + \frac{h'}{p_2}\right)^{\varkappa}.$$

Et ülerõhud h ja h' on õhurõhuga võrreldes väikesed, siis on ka murrud $\frac{h}{p_2}$ ning $\frac{h'}{p_2}$ väga väikesed, mistõttu võime kasutada lähendusvalemit

$$1 + (\varkappa - 1)\frac{h}{p_2} = 1 + \varkappa \frac{h'}{p_2},$$

millest

$$\varkappa = \frac{h}{h - h'}. \tag{5}$$

Katset tuleb korrata vähemalt kolm korda ja tulemustest võtta aritmeetiline keskmine.

Katset võime korraldada ka nii, et algul tekitame pudelis alarõhu ja laseme siis klapi avamisega rõhu pudelis tõusta õhurõhuni, nagu seda tegid Clément ja Desormes.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas mõjub tulemusele kraani hilinenud sulgemine?
2. Kumb meetod annab õigemaid tulemusi: kas alarõhu või ülerõhu rakendamine, ja miks?
3. Millest oleneb gaaside erisoojuste suhte c_p/c_v arvuline suurus?
4. Kuidas arvutada temperatuuri tõusu gaasi rõhu adiabaatilisel suurenemisel?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 254, 272 ja 273.
Putilov, Füüsika I, §§ 93 ja 131.

62. SOOJUSE MEHAANILISE EKVIVALENDI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Töö ja soojushulga mõõtühikutega tutvumine. Soojuse mehaanilise ekvivalendi määramine.

2. Töövahendid

Callendari riist (joon. 52) koos vajalike vahenditega (vedrukaal kandejõuga kuni 150 G, pael, vihid, termomeeter või termoelement galvanomeetriga, lehter, mensuur).

3. Töö käik

a) Tööd mõõdame harilikult kilogramm-meetrites (kGm), ergides, džaulides (J) ja kilovatt-tundides (kWh), soojushulka aga kalorites (cal) ja kilokalorites (kcal).

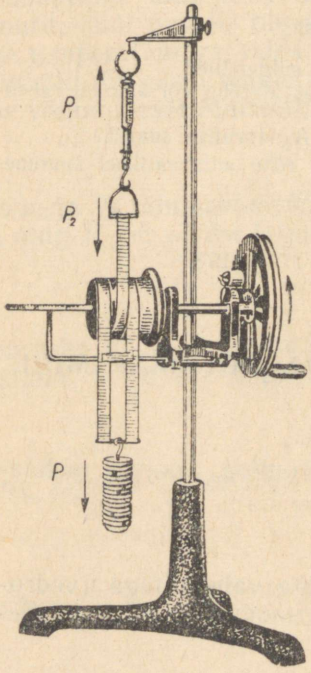
Energia jäävuse seaduse põhjal toimub töö muundumine soojuseks alati ühes ja samas kindlas vahekorras, s. o. iga kilogramm-meetri töö muundumisel soojuseks saame alati sama hulga kilokaloreid soojust; ümberpöördult: soojuse muundumisel tööks saame iga kilokalori soojuse asemel alati sama hulga kilogramm-meetreid tööd.

Soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks (E) nimetame üleminekukoefitsienti soojushulga ühikutest mehaanilise töö ühikutesse. Kui näiteks 1 kcal soojust annab tööks muundudes E kGm tööd, siis Q kcal soojust annab tööks muundudes $A = EQ$ kGm tööd. Siit

$$E = \frac{A}{Q}\,\frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}. \qquad (1)$$

Saadud valemit kasutamegi soojuse mehaanilise ekvivalendi

määramiseks. Kui üks selline üleminekukoefitsient on katseliselt määratud, siis saame iga teise ühikutepaari, näiteks $\frac{J}{cal}$, jaoks leida üleminekukoefitsiendi lihtsa arvutamise teel.



Joon. 52. Callendari riist.

b) Callendari riistaga soojuse mehaanilist ekvivalenti määrates mõõdame ühelt poolt tehtava tööhulga A ja teiselt poolt selle tööhulga soojuseks muundumisel tekkiva soojushulga Q.

Valgevasest silindri ümber on asetatud pael (joon. 52). Paela ülemine ots on riputatud vedrukaalu külge, paela teises otsas aga ripub teatav koormis.

Et silinder saab vabalt pöörelda, siis tema paigaloleku korral peab vedrukaalu tõmme (P_1) tasakaalustama paela (P_2) ja koormise (P) raskuse, s. o.

$$P_1 = P_2 + P.$$

Silindrit noole suunas vändast ümber ajades lisandame vedrukaalu tõmbele veel silindri ja paela vahel mõjuva hõõrdumistungi F, mis samuti aitab koormist P ülal hoida.

Kui koormis P on liiga väike ja hõõrdumistung F küllalt suur, tõuseb koormis silindri pöörlemisel üles. Siis peame suurendama koormist seni, kuni tekib tasakaal üles- ja allapoole mõjuvate tungide vahel, s. o. koormis jääb ühtlase pöörlemiskiiruse puhul tasakaaluolekusse paigale. Sel juhul järelikult

$$P_1 + F = P_2 + P,$$

millest

$$F = P - P_1 + P_2. \qquad (2)$$

Tasakaaluolekut aitab saavutada vedrukaal, mille tõmme (P_1) järjest väheneb koormise kaalu (P) lähenemisel hõõrdumistungi suurusele (F).

Hõõrdumistungi töö arvutamiseks peame teadma läbitud tee pikkust. Et hõõrdumistung on rakendatud silindri välispinnale, siis käidud tee pikkus võrdub silindri pinna edasinihkumisega paela suhtes. Ühe tiiru korral võrdub see nihkumine silindri ümbermõõduga $C = \pi d$, kus d on silindri läbimõõt. Kui silinder teeb katse vältel n tiiru, siis käidud tee

$$s = nC = \pi nd. \qquad (3)$$

Hõõrdumistungi poolt tehtav tööhulk A on valemite (2) ja (3) põhjal järgmine:

$$A = Fs = (P - P_1 + P_2)\pi nd. \quad (4)$$

Silindri hõõrdumisel vastu paela tekib soojus, mis läheb silindrisse ja sealt silindris olevasse vette. Olgu vee mass silindris m kg, silindri mass m_1 kg ja erisoojus c $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{kr}}$, vee ning ühes sellega ka silindri algtemperatuur t_0 ja lõpptemperatuur t_1. Hõõrdumisel tekkiv soojushulk Q, mis läheb silindrisse ja vette, väljendub siis valemiga

$$Q = m(t_1 - t_0) + cm_1(t_1 - t_0) = (m + cm_1)(t_1 - t_0) \text{ kcal.} \quad (5)$$

Eeldades, et kogu hõõrdumisel tekkiv soojus läheb silindrisse ja vette, võime valemite (1), (4) ja (5) põhjal kirjutada:

$$E = \frac{A}{Q} = \frac{(P - P_1 + P_2)\pi nd}{(m + cm_1)(t_1 - t_0)} \frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}. \quad (6)$$

c) Katse teostame järgmiselt:

1) Mõõdame silindri läbimõõdu d meetrites.

2) Vedrukaaluga määrame paela kaalu P_2 kilogrammides.

3) Asetame paela silindri ümber ja ühendame ta aasaga varustatud otsa vedrukaaluga, kuna paela teise otsa riputame koormise P.

4) Mõõdame mensuuriga umbes 70—80 cm³ vett ja valame selle lehtri abil silindrisse. Vee algtemperatuur (t_0) olgu paar kraadi madalam toatemperatuurist. Mispärast?

5) Märkides ära tiirude loendaja algseisu (n_0), paneme silindri paraja kiirusega, kuid võimalikult ühtlaselt pöörlema. Seejuures jälgime, et vedrukaalu osuti püsiks enam-vähem ühel ja samal kindlal jaotisel (P_1), mille registreerime. Enne silindri pöörlemapanemist tuleb t ö ö j u h e n d a j a l l a s t a k o n t r o l l i d a, kas paela otsa riputatud vihtidega on saavutatud õige tasakaaluolek. I l m a s e l l i s e e e l k o n t r o l l i t a t ö ö d v a s t u e i v õ e t a.

6) Kui eriline termomeeter vee temperatuuri mõõtmiseks puudub, siis tuleb temperatuuri mõõta hariliku termomeetriga. Seejuures võib ettevaatlikult toetuda silindri ringikujulise avause servale ja hoida termomeetrit kaldasendis nõnda, et tema elavhõbedareservuaar oleks kogu aeg vees, kuid ei hõõrduks vastu silindri põhja. Lubamatu on termomeetrit temperatuuri jälgimiseks vahetevahel veest välja võtta.

Kui vee temperatuur silindris on tõusnud niisama palju toatemperatuurist kõrgemale, kui palju ta katse algul oli sellest madalam, siis lõpetame katse ja märgime vee lõpptemperatuuri (t_1), samuti tiirude loendaja lõppseisu (n_1).

Kui tiirutamine on lõpetatud, tuleb termomeetrit seni vees hoida, kuni temperatuur enam ei tõuse. Selliselt mõõdetud kõrgeim vee

temperatuur ongi otsitav lõpptemperatuur. Hästi hoolikalt tuleb määrata ka algtemperatuur, sest vead temperatuuri määramisel mõjustavad tulemuse täpsust kõige rohkem.

Temperatuuri tõusu saab täpsemalt mõõta termoelemendiga.

7) Lõpuks eemaldame riista küljest kõik abivahendid, kruvime silindri aluse küljest lahti, valame vee välja, kuivatame silindri ja kruvime ta tagasi.

Mõõtmistulemused kanname järgmisse tabelisse:

Tööhulga arvutamine		Soojushulga arvutamine	
Silindri läbimõõt	$d = \ldots$ m	Vee mass	$m = \ldots$ kg
Koormise kaal	$P = \ldots$ kG	Silindri mass	$m_1 = \ldots$ kg
Vedrukaalu lugem	$P_1 = \ldots$ kG	Silindri aine erisoojus	$c = \ldots \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{kr}}$
Paela kaal	$P_2 = \ldots$ kG	Vee algtemperatuur	$t_0 = \ldots$ °C
Tiirude loendaja algseis	$n_0 = \ldots$	Vee lõpptemperatuur	$t_1 = \ldots$ °C
lõppseis	$n_1 = \ldots$		

Asetame saadud andmed valemisse (6) ja arvutame E väärtuse ühikutes $\frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}$.

d) Eespool käsitletud riistaga saavutatav mõõtmistäpsus on väike. See on tingitud vedrukaalu tõmbe väga suurest varieerumispiirkonnast. Vedrukaalu suure mõõtepiirkonna tõttu ei ole võimalik kuigi täpselt võtta tema lugemit P_1.

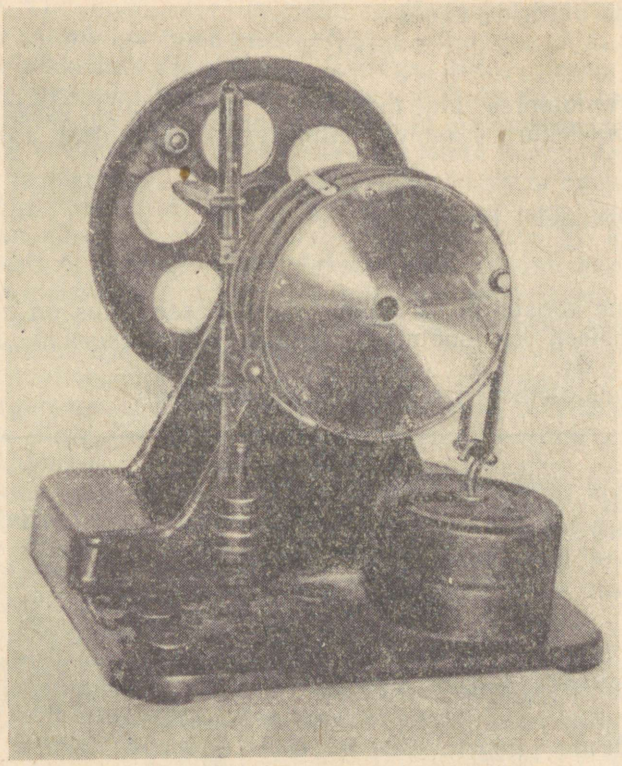
Joonisel 53 esitatud süsteemis on vedrukaalu mõõtepiirkond ainult 50 G ja tema ülesandeks on paela pingutava koormise P_2 vähendamine. Paigalseisva silindri korral toetub koormis P aluslauale. Koormist P_2 saab muuta 50 G kaupa ja tema suurus tuleb iga kord valida katsetamise teel. Selleks asetatakse koormise P_2 alusele järjest rohkem raskust ja proovitakse silindri ühtlase pööramisega, kas tekib tasakaal: silindri ühtlasel pööramisel tõuseb koormis P aluselt ja püsib kindlal kõrgusel. Silindri pööramisel tekib siin tasakaal automaatselt sel teel, et koormise P tõusmisel paela pingutav koormis P_2 langeb alla ja vedrukaal kergitab teda seni, kuni tekib paras hõõrdetung. Tasakaalu korral võime kirjutada:

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

millest

$$F = P - (P_2 - P_1) = P + P_1 - P_2. \qquad (2a)$$

P ja P_2 väärtused leiame riista passist, kus on antud aluste ja üksikute vihtide kaalud. P_1 on siin vedrukaalu lugem. Töö ajal vedrukaalu lugem kõigub veidi, mistõttu tuleb võtta keskmine lugem. Kui töö vältel osutub, et silinder on muutunud libedaks ja



Joon. 53. Callendari riist teistsuguse lindipingutussüsteemiga.

koormist P_2 tuleb suurendada, siis tuleb koormise muutmisel võtta ka tiirude arvu lugem n_2 ja arvutamisel pidada silmas, et esimesed $n_2 - n_1$ tiiru on tehtud teistsuguse hõõrdumistungi juures kui ülejäänud.

Seega üldjuhul, kui hõõrdumistung muutub, avaldub töö järgmiselt:

$$A = F_1 C n_1 + F_2 C n_2 + \ldots$$

Kui töö peab avalduma kilogramm-meetrites, siis tuleb hõõrdumistung avaldada kilogrammides ja silindri ümbermõõt meetrites.

e) Temperatuuri mõõtmine termoelemendiga. Termoelement koosneb kahest erinevast metalltraadist, millede otsad on kokku joodetud. Kui jootekohtade temperatuurid on erinevad, siis tekib traatides elektromotoorne jõud, mida mõõdab ahelasse lülitatud galvanomeeter. Katsed näitavad, et väikeste

temperatuurivahede korral on tekkiv elektromotoorne jõud võrdeline temperatuuride vahega:

$$aU = t_2 - t_1.$$

Elektromotoorse jõu mõõtmiseks kasutatava peegelgalvanomeetri pöördenurk φ on võrdeline tema klemmidele antava pingega, nii et

$$b\varphi = U.$$

Neist võrrandeist järeldub, et

$$t_2 - t_1 = ab\varphi.$$

Seadme konstandi *ab* leiame riista passist, kus on antud täpsemad juhised ka mõõtmistingimuste kohta. Nurkade mõõtmise kohta vt. § 24.

Mõõtmistulemused registreerime järgmiselt:

Galvanomeetri nullpunkt (mõlemad jootekohad samas veeanumas)	$N_0 = \ldots$ cm
Nullpunkt töö lõpul	$N_0' = \ldots$ cm
Galvanomeetri lugem ringiajamise algul	$N_1 = \ldots$ cm
Galvanomeetri lugem ringiajamise lõpul	$N_2 = \ldots$ cm
Hälbed 1) $s_1 = N_0 - N_1$ 2) $s_2 = N_2 - N_0$	$s_1 = \ldots$ cm $s_2 = \ldots$ cm
Skaala keskkoha kaugus galvanomeetri peeglist	$l = \ldots$ cm
$\tan 2\varphi_1 = \frac{s_1}{l} = \ldots.;\ 2\varphi_1 = \ldots$	$\varphi_1 = \ldots$ ′
$\tan 2\varphi_2 = \frac{s_2}{l} = \ldots.;\ 2\varphi_2 = \ldots$	$\varphi_2 = \ldots$ ′
Galvanomeetri peegli pöördumisnurk $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$	$\varphi = \ldots$ ′
Temperatuuri tõus ringiajamise vältel $t_2 - t_1 = ab\varphi$	$t_2 - t_1 = \ldots$ °C

Mõõtmisele asudes kontrollime, kas skaala on pikksilmaga risti; vajaduse korral parandame seisu silma järgi, vabastades statiivil vastava kruvi. Suuname pikksilma galvanomeetri peeglile ja statiivi nihutades otsime skaala kujutist. Seda on algul hõlpsam teha palja silmaga. Kui kujutis on silmaga näha, siis asetame pikksilma silma ette, suunates ta täpselt galvanomeetri peeglile. Pärast fookustamist peab paistma skaala (fookustada ei tule mitte peeglile, vaid skaalale, mille kujutis on peegli taga; selleks tuleb pikksilma okulaar sissepoole lükata, kui peegel on teravalt näha).

Termoelement ühendatakse galvanomeetriga ja tema mõlemad

jootekohad asetatakse ühte ja samasse veeanumasse, millel on toatemperatuur. Galvanomeeter on nüüd nullseisus. Statiivi ühes pikksilma ja astmikuga tuleb ettevaatlikult nihutada, nii et niitrist langeks ühte pikksilma kohal oleva jaotisega, mis on passis antud. Niitristi ühtelangemist keskmise jaotisega võib ka mitte taotleda, kuid arvutamisel tuleb siis silmas pidada, et galvanomeetri nullseisus nurk φ ei olnud null, vaid teatav φ_0. Nüüd kontrollime veel kord skaala ja pikksilma ristseisu, mis võis pikksilma suunamisel muutuda. Kui skaala seis on lõplik, siis tuleb 1 mm täpsusega mõõta galvanomeetri peegli ja skaala keskkoha vaheline kaugus.

Kui nullseis on märgitud, tõstetakse termoelemendi üks jootekoht kalorimeetrisse ning märgitakse galvanomeetri lugem N_1 (et kalorimeetri temperatuur peab katse algul olema veidi madalam toatemperatuurist, siis on hälve skaalal ca 15 cm). Tuleb veel selgitada, kas galvanomeetri hälve vastab toatemperatuurist madalamale või kõrgemale temperatuurile. Selleks võtame termoelemendi kalorimeetris oleva jootekoha välja ja soojendame seda näpuga, jälgides pikksilmas, kummas suunas galvanomeeter pöördub. Nüüd pannakse kalorimeeter pöörlema. Kui on tehtud 400—500 tiiru, märgitakse kohe galvanomeetri lugem N_2 (sest kalorimeeter hakkab kohe jahtuma ja ta hälve väheneb). See lugem peaks olema niisama palju üle galvanomeetri nullseisu, kui eelmine lugem oli alla seda. Seega soojuse juurdevool katse algul kompenseeritakse soojuse äravooluga katse lõpul. Kõik see kehtib siis, kui aeg, mille vältel vee temperatuur kalorimeetris oli allpool toatemperatuuri, on võrdne ajaga, mille vältel vee temperatuur oli kõrgem toatemperatuurist. Seda saavutatakse sellega, et tiirutatakse kalorimeetrit pidevalt ühtlase kiirusega. Lõpuks kontrollitakse uuesti galvanomeetri nullpunkti N_0' ning arvutatakse otsitav temperatuuritõus $t_2 - t_1$.

Galvanomeetri nullpunkti kontrollimisel peavad mõlemad jootekohad asetsema veeanumas. Seejuures tuleb anumas olev vesi klaaspulgaga hästi läbi segada.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Selgitada, mis on töö, soojus ja energia.
2. Defineerida tööühikud kGm, erg, džaul, Wsek, kWh, hjt.
3. Kuidas toimetada ümberarvutusi: kWh → kGm → kcal; hjt → Wsek?
4. Missugused soojuskaod on vältimatud? Kuidas saab nende mõju vähendada?
5. Mida nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks? Tuua näiteid.
6. Miks mõjustab temperatuuri mõõtmise viga väga tunduvalt lõpptulemuse täpsust?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 269.
Putilov, Füüsika I, § 128.

63. HALBADE SOOJUSJUHTIDE SOOJUSJUHTIVUSE MÕÕTMINE

1. Tööülesanne

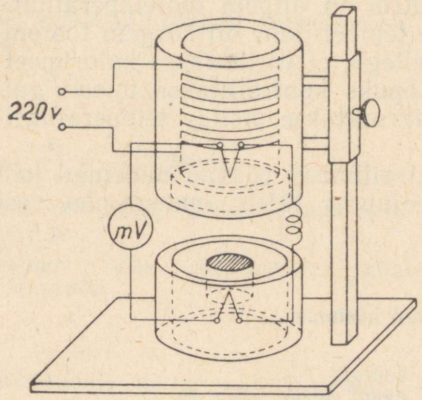
Antud plaadi soojusjuhtivuskoefitsiendi määramine.

2. Töövahendid

Soojusjuhtivuse määramise riist, uuritavast ainest plaat, tundlik millivoltmeeter, juhtmeid ühenduste tegemiseks, varbsirkel ja ajamõõtja.

3. Töö põhimõte ja teooria

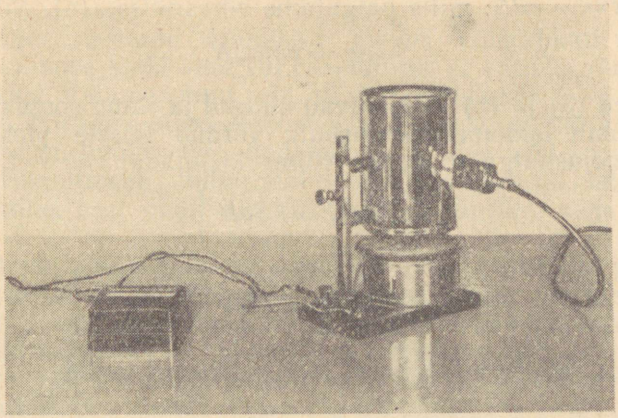
Plaadikujuliste halbade soojusjuhtide soojusjuhtivuse määramiseks kasutatav seadis koosneb kahest vaskplokist, millede vahele asetatakse uuritavast ainest plaat. Üks plokk hoitakse konstantsel temperatuuril. Teine plokk on hästi isoleeritud ja soojusvoolu tõttu, mis tuleb läbi uuritava plaadi ülemisest plokist, tõuseb tema temperatuur. Temperatuuri suurenemise seadus on teoreetiliselt tuletatav. Seaduses esinevate parameetrite hulgas on ka uuritava plaadi soojusjuhtivuskoefitsient. Kui leiame katseliselt seaduse graafiku, siis saame soojusjuhtivuskoefitsiendi arvutada. Riista skeem on esitatud joonisel 54.



Joon. 54. Halbade soojusjuhtide soojusjuhtivuse mõõtmise riista skeem.

Hea soojusjuhtivuse saavutamiseks on plokkide katsekehaga kokkupuutuvad pinnad poleeritud. Alumine plokk massiga m (m väärtus on antud riista passis) on ümbritsetud soojust eriti halvasti juhtiva ainega. Temperatuuri mõõtmiseks on alumise ploki keskkohta asetatud vask-konstantaan-termoelemendi üks jootekoht, mille vaskjuhtme ots on toodud vaskklemmi alla. Teine jootekoht on asetatud ülemisse plokki. Selle jootekoha vaskjuhe on toodud teise vaskklemmi alla. Ülemine plokk on elektriga soojendatava veevanni põhjaks. Mõõtmise teostamiseks täidame vanni veega, lülitame elektrivoolu sisse ja ajame vee keema. Kogu mõõtmise vältel hoiame vee keemisel, mistõttu ülemise ploki temperatuur on konstantne.

Soojushulga dq, mis voolab aja $d\tau$ kestel läbi katsekeha ühelt



Joon. 55. Halbade soojusjuhtide soojusjuhtivuse mõõtmise riist.

vaskplokilt teisele, võime avaldada järgmiselt:

$$dq = \lambda S \frac{t_1 - t_2}{l} d\tau, \tag{1}$$

kus λ on soojusjuhtivuskoefitsient ehk soojuslik erijuhtivus, t_1 ja t_2 vastavalt soojendaja ja soojust vastu võtva vaskploki temperatuurid, l uuritava plaadi paksus ja S soojusvoo ristlõige, s. o. väiksema läbimõõduga alumise vaskploki ristlõige. Uuritav plaat peab olema suurema pinnaga kui alumise ploki ristlõige.

Vase hea soojusjuhtivuse tõttu on plokkide temperatuuride vahe võrdne temperatuuride vahega katsekeha pindadel. Temperatuuride vahet mõõdame termoelemendiga. Katsel esinevate temperatuuride piirkonnas on temperatuuride vahe võrdeline millivoltmeetri hälbega N. Seetõttu võime kirjutada:

$$t_1 - t_2 = aN, \tag{2}$$

kus a on termoelemendist ja millivoltmeetrist sõltuv konstant.

Kasutades seost (2), võime seose (1) esitada kujul

$$dq = \lambda S \frac{aN}{l} d\tau. \tag{3}$$

Katsekeha läbiv soojushulk tõstab alumise vaskploki temperatuuri. Tähistame selle temperatuuritõusu dt-ga. Väikesi soojuskadusid arvestamata jättes võime väita, et kogu soojushulk dq kulub alumise ploki temperatuuri tõstmiseks. Seega

$$dq = cMdt, \tag{4}$$

kus c on alumise ploki aine (vase) erisoojus ja M mass.

Arvutades temperatuuritõusu ümber millivoltmeetri lugemile, saame $dt = -adN$, mille paigutame võrrandisse (4). Siis

$$-dq = cMadN. \tag{5}$$

Seosed (3) ja (5) tähendavad ühtesid ja samu soojushulki, sest ühelt plokilt lahkunud soojushulk võrdub teisele plokile lisandunud soojushulgaga. Seega võime kirjutada:

$$-cMadN = \lambda SaN\frac{d\tau}{l},$$

millest

$$-cMdN = \lambda SN\frac{d\tau}{l}. \tag{6}$$

Selle diferentsiaalvõrrandi integreerimisel saame:

$$\ln\frac{N_0}{N} = \frac{\lambda S}{cMl}\tau \tag{7}$$

ehk kasutades kümnendlogaritme:

$$\log N = \log N_0 - \frac{\lambda S\tau}{2{,}303\,cMl}, \tag{7a}$$

kus N_0 on hälve $\tau = 0$ puhul.

Seos (7a) kujutab sirget teljestikus log N ja τ; selle sirge tõus on

$$m = -\frac{\lambda S}{2{,}303\,cMl}. \tag{8}$$

Teades sirge tõusu m, saame seosest (8) arvutada soojusjuhtivuskoefitsiendi:

$$\lambda = \frac{2{,}303\,cMlm}{S} \tag{9}$$

(miinusmärgi jätame ära, sest meid huvitab soojusjuhtivuskoefitsiendi absoluutne suurus).

Kandes graafikule vastavad lugemid teljestikus log $N = y$ ja $\tau = x$, võime sirge tõusu ka graafikult mõõta ning selle abil arvutada λ. Eriti lihtsaks osutub töö siis, kui kasutame pool-logaritmilist paberit. Logaritmide otsimist saame vältida ka sellega, et kanname graafikule üksikutele ajamomentidele τ vastavad millivoltmeetri hälbed N (mitte nende logaritmid). Siis on pindala, mida piiravad τ-telg, kõver ning alg- ja lõppordinaat, võrdne valemi (6) paremal poolel esineva $Nd\tau$ integraaliga. Millivoltmeetri lugemite vahe aja alg- ja lõppmomendil on samas valemis vasakul esineva dN integraali väärtus. Mõõtes pindala (graafikult) ja millivoltmeetri vastavate hälvete vahe ning asetades need valemisse (6), võime samuti arvutada λ. Tulemuse täpsus sõltub sel juhul ka graafiku joonestamise täpsusest.

4. Töö käik

Tõstame veevanni alumisest plokist võimalikult kõrgele ja katame alumise ploki vihu või raamatuga, et vältida alumise ploki soojenemist. Valame vanni vett, nii et veepind oleks 2—3 cm allpool nõu äärt. Lülitame sisse elektrivoolu. Termoelemendi klemmidega ühendame millivoltmeetri. Sedamööda, kuidas vesi soojeneb, suureneb millivoltmeetri hälve; kui vesi hakkab keema, lakkab hälbe suurenemine, sest nüüd plokkide temperatuuride vahe enam ei kasva.

Mõõdame plaadi paksuse l varbsirkliga ja asetame plaadi alumisele plokile, nii et ta selle korralikult kataks ja oleks sellest vähemalt 1 cm võrra laiem. Laseme vanni alla ja vajutame ülemise ploki tugevasti vastu plaati, et tekiks hea kontakt plokkide ja katsekeha vahel. Kui katsekeha on kõva, siis tuleb tema pinnad tasaparalleelseks lihvida. Õhuke õhukiht ploki ja uuritava plaadi vahel põhjustab palju suurema vea kui suur viga plaadi paksuse määramises.

Nüüd hakkab soojus voolama läbi katsekeha alumisse plokki, mille temperatuur hakkab tõusma ja millivoltmeetri hälve vähenema. Millivoltmeetri hälvet tuleb registreerida iga poole minuti tagant vähemalt kümne minuti jooksul. Lugemi võtmisel koputame kergelt näpuga millivoltmeetrit. Saadud andmete põhjal koostame graafiku, nagu eespool selgitatud, ja arvutame soojusjuhtivuskoefitsiendi.

Kuigi teoreetiline seos on lineaarne, tuleb katseline graafik siiski kõver, kumerusega allapoole. See on tingitud sellest, et alumise ploki isolatsioon ei ole ideaalne. Niipea kui plokk soojeneb, hakkab soojus temast ära voolama ja temperatuuride vahe ei kahane nii kiiresti, kui arvestasime valemi tuletamisel — kõver kaldub ülespoole. Õige kalle on kõveral siis, kui alumise ploki temperatuur on madal — seega esimeste minutite vältel. Kõvera sellele osale tuleb tõmmata puutuja ja määrata selle tõus.

5. Täiendavaid küsimusi

1. Miks on meetod rakendatav ainult plaadikujuliste kehade puhul?
2. Missugused raskused tekivad riista kasutamisel heade soojusjuhtide soojusjuhtivuskoefitsiendi mõõtmiseks?
3. Miks mõjustab katsekeha ja ploki vahele jäänud õhukiht tunduvalt mõõtmistulemusi?

6. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 263.
Putilov, Füüsika I, § 95.

64. ABSOLUUTSE JA SUHTELISE NIISKUSE MÄÄRAMINE PSÜHROMEETRI JA HÜGROMEETRI ABIL

1. Tööülesanne

Õhu niiskuse karakteristikutega tutvumine. Absoluutse ning relatiivse niiskuse määramine psühromeetri abil. Juushügromeetri ehituse ja töötamise põhimõttega tutvumine ning skaala kontrollimine.

2. Töövahendid

Psühromeeter ja juushügromeeter.

3. Töö käik

a) Õhk on alati niiske, s. o. sisaldab veeauru. Kui veeauru vaadeldavasse ruumi enam ei mahu, siis on veeaur selles ruumis antud temperatuuril küllastatud. Harilikult on õhus olev veeaur küllastamata.

Õhu niiskust iseloomustavad järgmised kasutatavamad karakteristikud:

1) Absoluutne niiskus ehk veeauru tihedus on 1 m^3 õhus oleva veeauru hulk grammides. Kui õhus sisalduv veeaur on küllastamata, siis tähistatakse õhu absoluutset niiskust tähega a. Küllastavat absoluutset niiskust (veeauru hulka õhus küllastusolekus) tähistatakse tähega A.

2) Õhus olevad veeauru osakesed samuti nagu õhu osakesed tekitavad rõhku. Küllastamata veeauru rõhku tähistatakse tähega e, küllastatud veeauru rõhku tähega E. Rõhku mõõdetakse elavhõbedasamba millimeetrites (mm Hg) või millibaarides $\left(1\ \text{mb} = 1000\,\frac{\text{dn}}{\text{cm}^2}\right)$.

3) Relatiivne niiskus (r) on õhu absoluutse niiskuse (a) suhe küllastava absoluutse niiskusega (A) samal temperatuuril, s. o.

$$r = \frac{a}{A} = \frac{e}{E}. \qquad (1)$$

Relatiivset niiskust väljendatakse harilikult protsentides.

4) Kastepunkt on temperatuur, mille puhul õhus olev veeaur antud rõhul küllastub.

Sama rõhu ja temperatuuri puhul on küllastamata veeauru ja kuiva õhu tiheduste suhe 0,622. Lähtudes sellest, saame õhus oleva veeauru massi määrata sama rõhu ja temperatuuri juures oleva kuiva õhu massi kaudu. Mõõtmised näitavad, et normaaltingimustel on 1 m^3 kuiva õhu mass 1293 g.

Rakendame eelmisi andmeid veeauru hulga määramiseks. Sel-

leks tuleb antud tingimustel (p, t, V) oleva õhu ruumala taandada normaaltingimustele ($p_0 = 760$ mm Hg; $t_0 = 0°$ C; V_0).

Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i ühendatud valemist $pV = p_0V_0(1 + \gamma t)$ saame:

$$V_0 = \frac{pV}{p_0(1 + \gamma t)}, \tag{2}$$

kus $\gamma = 0{,}0037$ on gaaside ruumpaisumiskoefitsient.

Valem (2) on rakendatav ka küllastamata veeauru kohta. See võimaldab määrata absoluutset niiskust (a). Olgu 1 m³ õhus oleva veeauru mass a grammi, rõhk e mm Hg ja temperatuur $t°$ C. Siis a väljendub valemiga

$$a = \frac{0{,}622 \cdot 1293\, e}{760(1 + \gamma t)} = 1{,}06\frac{e}{1 + \gamma t}. \tag{3}$$

Valemist (3) nähtub, et teatavas temperatuurivahemikus on 1 m³ õhus sisalduva veeauru mass grammides (absoluutne niiskus) arvuliselt ligikaudu võrdne veeauru rõhuga, kui see on väljendatud elavhõbedasamba millimeetrites. Temperatuuril 16,4° C $a = e$. Temperatuuri tõusmisel veeauru osakeste kineetiline energia ja järelikult ka rõhk suureneb ning $a < e$. Madalama temperatuuri puhul $a > e$.

Veeauru rõhu (e) määramiseks kasutatakse nn. psühromeetrilist meetodit, mille puhul aururõhu määramine toimub kuiva ja märja termomeetri lugemite põhjal.

b) Psühromeeter koosneb kahest täiesti ühesugusest termomeetrist, milledest üks on kuiv ja näitab teda ümbritseva õhu (toa) temperatuuri, kuna teise, nn. märja termomeetri elavhõbedareservuaar on ümbritsetud marliga, mis on otsapidi vette kastetud. Seetõttu on teise termomeetri reservuaar alati märg ja tema pinnalt toimub vahetpidamata vee aurustumine, mis seda termomeetrit jahutab. Järelikult peab märg termomeeter, kui õhk pole niiskusega küllastunud, kogu aeg näitama madalamat temperatuuri (t_1) kui kuiv termomeeter (t), s. o. $t > t_1$.

Vee aurustumise intensiivsus märjalt termomeetrilt ning ühtlasi ka kuiva ja märja termomeetri lugemite vahe oleneb õhu suhtelisest niiskusest, õieti selle küllastusdefitsiidist ehk -vajakust. Viimase all mõeldakse absoluutse niiskuse vahet küllastusolekus ja vaadeldavas olukorras, muidugi ühel ja samal temperatuuril (t). Need kaks suurust — küllastusvajak ja kuiva ning märja termomeetri lugemite vahe — on teineteisega kindlas funktsionaalses seoses, mis ongi aluseks niiskuse karakteristikute määramisel.

Veeauru rõhu (e) määramisel lähtutakse valemist

$$e = E_1 - 0{,}0008(t - t_1)p, \tag{4}$$

kus E_1 on küllastatud veeauru rõhk temperatuuril t_1 (märg termomeeter), t kuiva termomeetri lugem ja p õhurõhk.

Teades veeauru rõhku e, saame valemi (3) põhjal arvutada vastava absoluutse niiskuse a ja valemi (1) põhjal relatiivse niiskuse r.

Toatemperatuuri piirkonnas võib absoluutse niiskuse määramiseks kasutada ka valemit

$$a = A_1 - 0{,}64(t - t_1), \qquad (5)$$

kus A_1 on küllastav absoluutne niiskus, mis vastab märja termomeetri lugemile t_1.

Küllastusolekule vastavad niiske õhu karakteristikud E ja A leiame vastavast tabelist raamatu lõpus.

Eelöeldust selgub, et õhu absoluutse ja relatiivse niiskuse määramiseks psühromeetri abil on tarvis teha ainult kaks vaatlust: määrata kuiva ja märja termomeetri lugemid t ja t_1. Viimase puhul on väga oluline, et märja termomeetri kontakt ümbritseva õhuga oleks küllaldane nii kestuse kui ka ulatuse poolest. Selleks puhutakse märjale termomeetrile erilise ventilaatoriga õhku umbes 10 min jooksul. Ventilaatori puudumisel tuleb õhu liikumist tekitada mõne sobiva esemega (papi- või vineeritükiga) ja toimetada vaatlusi termomeetrite temperatuuride stabiliseerumisel. Igal juhul tuleb hoiduda oma hingamise või keha kiirgamissoojusega mõjustamast nii kuiva kui ka märja termomeetri lugemeid.

Et veeauru rõhk on võrdeline auru tihedusega, siis võib suhtelise niiskuse määramisel kasutada absoluutsete niiskuste suhte asemel ka neile vastavate rõhkude suhet.

Määrata kolmel korral t ja t_1, arvutada absoluutne (a) ja relatiivne $\left(\frac{a}{A}\right)$ niiskus ning võtta saadud tulemustest keskmine. Töö protokolli märkida töötamise kellaaeg ja ruum.

c) Juushügromeetri peamiseks osaks on umbes 27 cm pikkune rasvavaba inimjuus. Selle ülemine ots on kinnitatud reguleerimiskruvi külge, alumine ots aga pöörleva võlliga ühendatud silindrilisele pinnale.

Suhtelise niiskuse suurenemisel juus pikeneb ja võlliga ühendatud osuti nihkub paremale; suhtelise niiskuse vähenemisel toimub vastupidine nähtus.

Juushügromeetri skaala kaliibritakse suhtelise niiskuse määramiseks. Kaliibrimine toimub psühromeetri abil.

Kontrollida juushügromeetri skaalat, kasutades selleks psühromeetriga toimetatud mõõtmise tulemusi.

d) Alluard'i hügromeetri peamiseks osaks on läikiva esipinnaga anum, millesse valatakse eetrit. Eetri aurustumise kiirendamiseks puhutakse temast kummipuhuriga õhku läbi. Intensiivselt aurustudes jahtub eeter ja samuti teda sisaldav anum kiiresti. Anum, kokku puutudes teda ümbritsevas õhus oleva veeauruga, jahutab selle kuni küllastuseni, mistõttu edasisel jahutamisel veeaur kondenseerub ja tekib kaste, mis katab anuma läikiva esipinna. Anuma väikeste veepiiskadega kaetud läikiv esipind see-

tõttu tuhmub, millest tunnemegi kaste tekkimise algust. Nüüd lõpetame õhu puhumise läbi eetri ja loeme otsapidi eetrisse pistetud termomeetrilt kaste tekkimise alguse temperatuuri t_1.

Et õhu puhumise lõpetamise tõttu lõpeb ka eetri intensiivne jahutav mõju, hakkab anum ja samuti teda ümbritsev veeaur pikkamisi soojenema, mistõttu kaob küllastusolek ja ühes sellega kastekiht anuma pinnalt.

Olgu kaste kadumise lõppmomendil eetri temperatuur t_2. Kastepunkti tõenäoseimaks temperatuuriks t võtame t_1 ja t_2 aritmeetilise keskmise, s. o.

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Määrame sel viisil kastepunkti vähemalt 5 korda ja võtame saadud tulemustest aritmeetilise keskmise. Toa (ümbruse) temperatuuri loeme teiselt, hügromeetri külge kinnitatud termomeetrilt. Saadud andmeist arvutame õhu relatiivse niiskuse.

Jahutamine ei muuda õhu absoluutset niiskust, sest veeauru hulk õhus jääb samaks ning muutub ainult tema olek. Seetõttu on õhu absoluutne niiskus vaadeldaval temperatuuril sama kui selle õhu absoluutne niiskus temperatuuril, mille puhul õhus olev niiskus ruumi küllastaks, s. o. kastepunkti temperatuuril. Küllastusoleku igale temperatuurile vastavad absoluutsed niiskused leiame vastavatest tabelitest. Seega taandub relatiivse niiskuse määramine hügromeetriga kastepunkti ja õhu temperatuuri määramisele ning neile temperatuuridele vastavate küllastusoleku absoluutsete niiskuste või rõhkude suhte leidmisele.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks vedelik aurustumisel jahtub?
2. Kuidas oleneb küllastatud veeauru rõhk temperatuurist?
3. Missugune on absoluutse ja suhtelise niiskuse ning veeauru rõhu mõõtühikute nimetus?
4. Millest oleneb aurustumise kiirus?
5. Mis vahe on aurustumise ja aurumise vahel? Mida tähendab auramine?
6. Kas Boyle-Mariotte'i seadus on kehtiv ka küllastatud auru kohta?
7. Näidata, et $\frac{a}{A} = \frac{e}{E}$.
8. Valemi (3) põhjal näidata, missugusel temperatuuril $a = e$.
9. Lähtudes katse tulemustest, määrata katseruumis olev veeauru hulk.
10. Temperatuuril 20° C õhus oleva niiskuse kastepunktiks on 12° C. Leida relatiivne niiskus.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 289 — 292.

65. VEE PINDPINEVUSKOEFITSIENDI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Torsioonkaalude ehitusega tutvumine ja vee pindpinevuskoefitsiendi määramine.

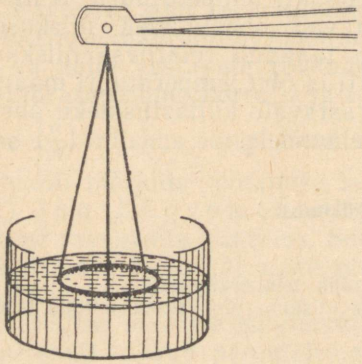
2. Töövahendid

Torsioonkaalud koos klaasanuma, rõnga ja antud koormisega.

3. Töö käik

a) Molekulaartungide mõjul käitub vedeliku vaba pinnakiht ehk pindkile pingule tõmmatud kummikelme taoliselt. Seda vedeliku pindkile omadust nimetatakse pindpinevuseks. Pindpinevust iseloomustab nn. pindpinevuskoefitsient α, mida mõõdetakse tungiga düünides, mis mõjub 1 cm pikkusele vedelikupinna piirjoonele. Selle tungi suurust on võimalik otseselt mõõta kaalude abil.

Olgu peenikese traatrõnga pikkus l cm. Riputame rõnga kaalukangi otsa ja seame rõnga alla anuma uuritava vedelikuga, näiteks destilleeritud veega, nii et rõngas puudutaks veepinda. Nüüd asetame kaalukausile vihte seni, kuni rõngas ennast veepinnast lahti rebib.



Joon. 56. Pindpinevuse määramine.

Siis võrdub vihtide kaal rõnga ja vee vahelise pindkile katkirebimiseks vajaliku tungiga. Kui vihtide mass on m grammi, siis nende kaal düünides $p = mg$, kus g on raskuskiirendus ühikutes $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$. Et 1 cm pikkusele pindkile piirjoonele mõjub tung α düüni, siis kogu rõnga ulatuses esinev pindkile mõjub rõngale tungiga $2l\alpha$ düüni. Siin on rõnga pikkus l võetud kahekordselt, sest rõnga veest lahtirebimisel on tegemist kahe pinnakihiga (vedelikukile kahe pinnaga). Järelikult rõnga lahtirebimisel

$$2l\alpha = mg,$$

millest

$$\alpha = \frac{mg}{2l}\left(\frac{\text{dn}}{\text{cm}}\right). \qquad (1)$$

Tuletatud valem ongi aluseks pindpinevuskoefitsiendi määramisel. Et pindpinevus oleneb vedeliku temperatuurist (tempera-

tuuri tõusmisel pindpinevus väheneb), siis tuleb koos pindpinevuskoefitsiendi suurusega anda ka temperatuur, mille puhul mõõtmine toimus.

b) Harilike kangkaalude asemel kasutatakse pindpinevuskoefitsiendi määramisel spetsiaalseid torsioon- ehk väändekaale. Need nagu vedrukaaludki töötavad elastsuse põhimõttel: deformatsiooni suurus on võrdeline mõjuva tungiga (Hooke'i seadus). Selleks on deformeeritava pingutatud terastraadi keskele kinnitatud pikk varb, mille otsale rakendatud võrdlemisi väike tung annab pika varva tõttu suhteliselt suure pöördemomendi. Selle mõjul traat väändub ehk tordeerub. Väändenurk on võrdeline mõjuva pöördemomendiga. Et aga vertikaalselt mõjuva tungi puhul kaugus tungi sihist jääb konstantseks, siis on antud juhul pöördemoment võrdeline ka mõjuva tungiga.

Mõjuva tungi tasakaalustamiseks tuleb traati väänata vastassuunas, mis toimub traadi otsa kinnitatud vastava osuti abil. Ringskaalal on kraadiastmik väändenurga suuruse määramiseks. Missugune varva (kangi) otsale rakendatud tung vastab väändele 1°, tuleb määrata katseliselt. Selleks seame kangi tasakaalu ja märgime ära osuti vastava asendi skaalal. Kui riputame kaalukangi otsa mingi koormise massiga m grammi, mille raskus p düünides on mg, siis kaob tasakaal ja me peame ringskaalal pöörama osutit näiteks n jaotise võrra endisest tasakaaluasendist paremale (päripäeva), et kaalukang oleks jälle tasakaalus. Kui mõnel teisel juhul saavutame kaalukangi tasakaalu osuti pööramisega N skaalajaotise võrra, siis on võrdelisuse põhjal lihtne arvutada sellele vastava tungi suurust x:

tungi p tasakaalustamiseks tuleb osutit pöörata n jaotise võrra,
„ x „ „ „ „ N „ „ .

Siit

$$\frac{x}{p} = \frac{N}{n},$$

millest

$$x = \frac{p}{n} N. \qquad (2)$$

Kaaluda analüütilistel kaaludel antud koormis (m), kui selle kaal pole antud, ja määrata selle tasakaalustamiseks vajalik skaalajaotiste arv (n).

c) Nüüd võtame klaasanumasse destilleeritud vett ja määrame rõnga lahtirebimise momendile vastava skaalajaotiste arvu N. Kordame seda vähemalt 10 korda ja võtame saadud andmetest aritmeetilise keskmise, s. o.

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \ldots + N_{10}}{10} = \ldots .$$

Aritmeetilise keskmise määramise kohta vt. lähemalt § 14.

Et pindpinevuskoefitsient võrdub kogu lahtirebimistungiga $\frac{p}{n} N$, mis on jagatud rõnga kahekordse pikkusega $(2l)$, siis, pidades silmas, et $p = mg$, saame:

$$\alpha = \frac{p}{n} N : 2l = \frac{mg}{n} N : 2l = \frac{mgN}{2ln} \left(\frac{\text{dn}}{\text{cm}}\right).$$

Asetame sellesse valemisse vastavad arvud ja arvutame α suuruse.

Olles määranud vee α toatemperatuuril, muudame vee temperatuuri jää lisamise või vee soojendamise teel. Nüüd määrame α uuesti. Kuidas muutus α? Kuidas mõjutab α väärtust soola, suhkru või seebi lisamine veele?

Rõnga lahtirebimiseks vedelikust võib kasutada ka tundlikku vedrukaalu. Sel juhul lahtirebimistung $F = 2l\alpha$, millest arvutame α väärtuse.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Pindpinevuskoefitsiendi määramisel ühikutes $\frac{\text{dn}}{\text{cm}}$ tuleb koormise mass m väljendada grammides, raskuskiirendus g ühikutes $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ ja rõnga pikkus l sentimeetrites. Mispärast?

Missugustes ühikutes tuleks väljendada eelmised suurused mks- ja mkGs-süsteemis?

2. Leida arvuline seos cgs-, mks- ja mkGs-süsteemi pindpinevuskoefitsientide vahel.

3. Näidata, et pindpinevuskoefitsiendi ühik $\frac{\text{dn}}{\text{cm}}$ on üheväärne ühikuga $\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}$.

4. Missugune on molekulaartungide mõjupiirkonna suurusjärk?

5. Miks temperatuuri tõusmisel pindpinevus väheneb?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., § 169.
Putilov, Füüsika I, § 108.

66. VEDELIKE PINDPINEVUSKOEFITSIENTIDE VÕRDLEMINE TILGAMEETODIL

1. Tööülesanne

Pindpinevuskoefitsientide võrdlemine tilgameetodil.

2. Töövahendid

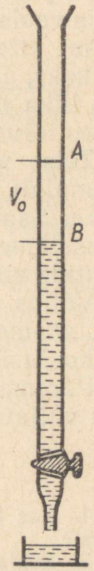
Kraaniga klaastoru (bürett), anum tilkuva vedeliku kogumiseks, kaks vedelikku, millede pindpinevuskoefitsiente võrreldakse.

a) Pindpinevuse mõiste kohta vt. eelmise töö kirjeldust (§ 65). Tilgameetodi rakendamine toimub järgmisel põhimõttel. Tilk rebib end toru otsa küljest lahti siis, kui tilga raskus pisut ületab tilga pindkile pindpinevustungi, mis teda toru otsaga ühendab. Olgu tilga ruumala V cm^3 ja vedeliku tihedus ϱ $\frac{g}{cm^3}$; selle tilga kaal düünides on siis ϱVg. Teiselt poolt, kui selle vedeliku pindpinevuskoefitsient on α ja tilga kaela raadius enne tilga äralangemist r, siis tilga langemist takistav tung on $2\pi r\alpha$. Et tasakaalu korral mõlemad tungid (tilga raskus ja tilka ülal hoidev tung) peavad olema võrdsed, siis

$$\varrho Vg = 2\pi r\alpha,$$

millest

$$\alpha = \frac{\varrho Vg}{2\pi r}. \qquad (1)$$



Joon. 57. Riist pindpinevuse määramiseks tilgameetodil.

Valemist (1) on võimalik määrata pindpinevuskoefitsienti α vedeliku tiheduse (ϱ), tilga ruumala (V), raskuskiirenduse (g) ja tilga kaela raadiuse (r) põhjal. Raskusi tekitab siin aga raadiuse r täpne määramine. Et raadiuse r määramisest üldse mööda pääseda, kasutatakse seda meetodit mitte pindpinevuskoefitsiendi α otseseks määramiseks valemi (1) alusel, vaid kahe vedeliku pindpinevuskoefitsientide võrdlemiseks.

Olgu teise vedeliku vastavad andmed α_1, ϱ_1, V_1 ja r_1. Et mõlema vedeliku puhul kasutame sama riista, siis $r = r_1$ ja analoogiliselt valemiga (1) võime kirjutada:

$$\alpha_1 = \frac{\varrho_1 V_1 g}{2\pi r}. \qquad (2)$$

Jagades valemite (1) ja (2) vastavad pooled, saame:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{\varrho V}{\varrho_1 V_1}. \qquad (3)$$

Asendame valemis (3) tilkade ruumala suhte $\frac{V}{V_1}$ tilkade arvu suhtega. Selleks laseme V_0 cm^3 vedelikku välja voolata ja loendame, mitu tilka sellest saab. Olgu tilkade arv n ja iga tilga ruumala V cm^3; siis $V_0 = nV$. Teise vedeliku puhul, kus väljavoolanud vedeliku ruumala on samuti V_0, tilkade arv n_1 ja ühe tilga ruumala V_1, saame $V_0 = n_1 V_1$. Võrdustest $V_0 = nV = n_1 V_1$ järeldub,

et $\frac{V}{V_1} = \frac{n_1}{n}$. Asetades suhte $\frac{V}{V_1}$ asemele valemisse (3) tilkade arvu suhte $\frac{n_1}{n}$, saame:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{\varrho n_1}{\varrho_1 n}. \qquad (4)$$

Valem (4) ongi aluseks vedelike pindpinevuskoefitsientide võrdlemisel.

b) Olgu üheks vedelikuks vesi ja teiseks mõni õli. Täidame riista püsttoru algul teatava tasemeni veega, laseme natuke vett välja voolata ja suleme kraani. Nüüd märgime vee nivoo torus (A), avame ettevaatlikult kraani, nii et vesi paraja kiirusega tilkuma hakkaks, ja loendame väljavoolavate tilkade arvu. Kui umbes 100 tilka on välja voolanud, suleme kraani ja märgime jälle vee nivoo torus (B).

Teise vedelikuga toimime samuti, lastes teda välja tilkuda ruumalalt niisama palju, s. o. vee puhul märgitud kriipsude vahe võrra. Saadud tilkade arvud n ja n_1 ning vedelike tihedused ϱ ja ϱ_1 asetame valemisse (4), millest arvutame pindpinevuskoefitsientide suhte.

Võttes ühe vedeliku, näiteks vee pindpinevuskoefitsiendi tabelist, saame leitud suhte põhjal arvutada teise vedeliku pindpinevuskoefitsiendi.

Paremate tulemuste saamiseks tuleb toru iga kord pärast vedeliku väljalaskmist puhastada.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas katse tulemus oleneb sellest, kui kõrgel asetseb ruumala V_0 toru otsast?
2. Kuidas mõjustab tulemuse täpsust väljavoolava vedeliku hulk?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus I, 2. tr., §§ 169 ja 172.
Putilov, Füüsika I, § 108.

IV. ELEKTER

67. ÜLDMÄRKUSI

Elektriliste ja magnetiliste mõõtmiste teostamiseks on vaja tutvuda rea üldiste riistade, vahendite ja põhimõtetega, mida nende tööde puhul korduvalt rakendatakse.

Niisuguste vahendite hulka kuuluvad vooluallikad, mõõteriistad, juhtmed, lülitid, reostaadid jt. Lisaks vahendite üldisele tundmisele on veel vaja osata lugeda skeeme ja koostada nende järgi vooluahelaid.

Elektriliste mõõtmiste teostamine nõuab äärmist ettevaatust, sest esiteks on elektri-mõõteriistad kallid ja õrnad ning teiseks on sageli tegemist katsetajale ohtliku pingega. Seepärast on üldreegliks, et ei tohi kunagi voolu enne lülitada, kui praktikumi juhendaja on seadmeid kontrollinud ja andnud vastava loa.

68. VOOLUALLIKAD

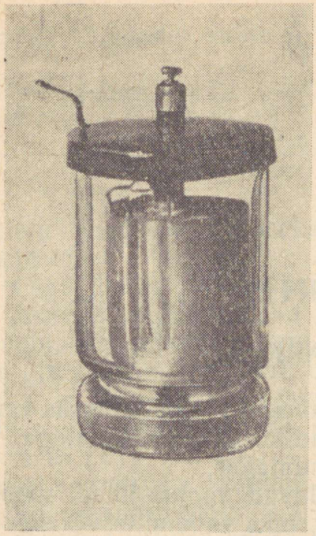
1. Elemendid. Suurest hulgast elementide tüüpidest on praegusel ajal tarvitusel peamiselt Leclanché elemendid, kuivelemendid ja Danielli elemendid. Püsiva pinge saamiseks kasutatakse veel nn. normaalelemente, milledest levinuim on Westoni kadmiumi-normaalelement.

a) Leclanché elemendi (joon. 58) väliskestaks on klaaspurk, elektrolüüdiks salmiaagi 15%-line vesilahus (NH_4Cl) ja elektroodideks mangaandioksüüdiga (MnO_2) ümbritsetud süsi (positiivne poolus) ja tsink (negatiivne poolus). Elemendi elektromotoorne jõud on 1,5 V.

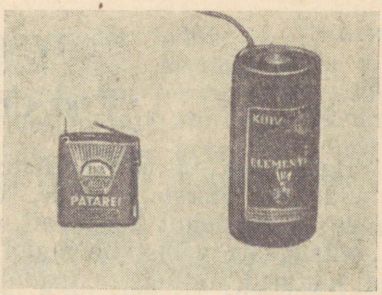
Laialdasemalt kasutatakse Leclanché elemendi eriliiki, nn. «kuivelementi» (joon. 59), milles elektrolüüt on immutatud poorsesse ainesse.

Täiesti kuiva elemendi valmistamine pole võimalik.

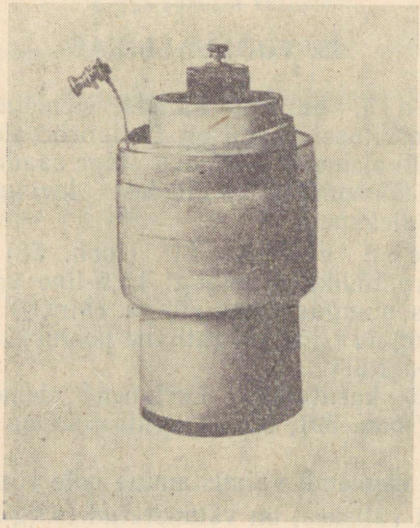
Kuivelemendi väliskest on valmistatud tsingist, mis on ühtlasi ka negatiivseks elektroodiks. Elemendi täieliku kuivamise vältimiseks on anum pealt kaetud pigiga. Anuma keskelt ulatub välja



Joon. 58. Leclanché element.



Joon. 59. Kuivelemendid.

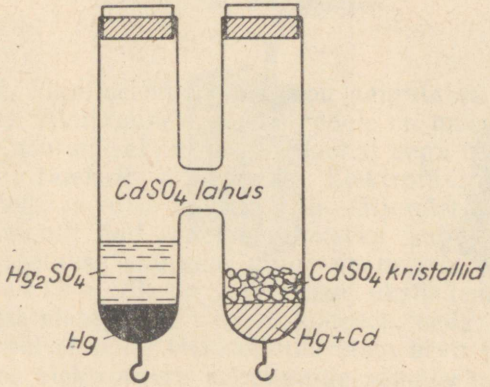


Joon. 60. Danielli element.

positiivse elektroodi ots. Värske elemendi elektromotoorne jõud on 1,5 V.

b) Danielli elemendiks (joon. 60) on klaaspurk, milles asuvad vaskelektrood vasevitrioli ($CuSO_4$) lahuses ja tsinkelektrood tsingivitrioli ($ZnSO_4$) lahuses. Lahuseid eraldab teineteisest poorne anum või vahesein, mis takistab elektrolüütide segunemist, kuid ei tõkesta ioonide liikumist, s. o. elektrivoolu. Mõnikord ehitatakse element ka nii, et välisanumaks on vaskelektrood. Positiivseks pooluseks on vask- ja negatiivseks tsinkelektrood. Elektromotoorne jõud on 1,1 V.

c) Normaalelement. Eelkirjeldatud elemente kasutatakse peamiselt elektrivoolu saamiseks. Nende klemmipinge oleneb suuresti võetava voolu tugevusest, elemendi kasutamise kestusest, temperatuurist ja teistest raskesti arvestatavaist tegureist.



Joon. 61. Normaalelement.

Konstantse pinge saamiseks kasutatakse seepärast nn. normaalelemente, mille emj oleneb temperatuurist väga vähe ja seejuures arvutataval määral. Mitmesugustest normaalelementidest on sobivaimaks osutunud Westoni kadmiumi-normaalelement, mis on ka rahvusvahelise kokkuleppe põhjal võetud tarvitusele pingestandardina. Elemendi väliskate on klaasist, H-kujuline ja õhukindel. Elemendi täpsem ehitus nähtub jooniselt 61. Elavhõbe on positiivseks ja kadmiumamalgaam negatiivseks pooluseks. Läbi klaasi viidud plaatinatraadid võimaldavad elemendi lülitamist vooluahelasse. Kõik elemendi valmistamiseks kasutatud ained on eriti hästi puhastatud ja seetõttu on ka elemendi emj püsiv ning arvutatav järgmise valemi põhjal (temperatuurivahemikus 0—40° C):

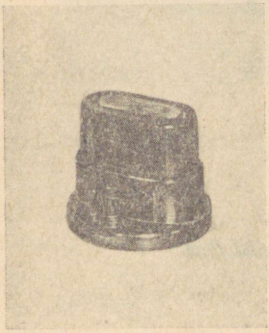
$$E = 1{,}01865 - 4{,}06 \cdot 10^{-5}\ (t - 20) - \\ - 0{,}95 \cdot 10^{-6}(t - 20)^2 + 10^{-8}(t - 20)^3\ \text{V}.$$

Normaalelemente kasutatakse ainult pinge võrdlemiseks ja neid ei tohi kunagi koormata tugevama vooluga kui 10^{-5} A. Normaalele-

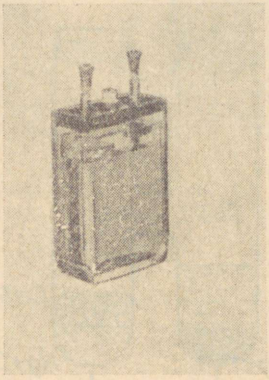
ment on valgustundlik, mistõttu ta suletakse valgust mitte läbi laskvasse kattesse.

2. Akud. Elemendid pole kohased kestvamaks koormamiseks ja tugevama voolu võtmiseks, sest nende emj kahaneb voolu võtmisel kiiresti ja nende sisetakistus on suhteliselt suur. Pikemaajalise ja tugevama voolu saamiseks kasutatakse seepärast akusid. Levinud on kaht tüüpi akud: tina- ja leelisakud.

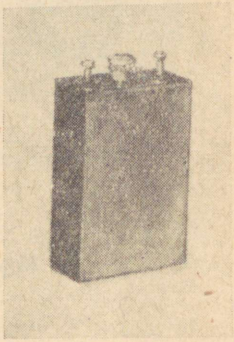
a) Tinaaku väliskest on valmistatud väävelhappekindlast materjalist. Elektrolüüdiks on ca 20%-line väävelhape, negatiivseks elektroodiks seatina (Pb) ja positiivseks seatinadioksüüd (PbO_2). Värvuselt on negatiivne plaat hall ja positiivne tumepruun. Töökorras oleva tinaaku emj on ca 2 V. Kui koormatud aku klemmipinge langeb 1,85 voldini, siis tuleb akust voolu



Joon. 62. Westoni normaalelement.



Joon. 63. Tinaaku.

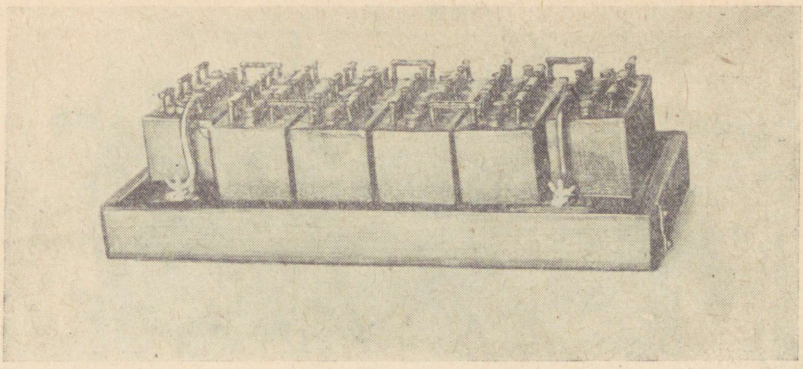


Joon. 64. Leelisaku.

võtmine lõpetada ja aku viia laadimisele. Klaaspurgis olevate akude puhul võib samal ajal märgata positiivsete plaatide värvuse heledamaks muutumist. Tinaakuga tuleb eriti hoolikalt käituda nii elektrilises kui ka mehaanilises suhtes. Akust on keelatud võtta tugevamat voolu, kui see on märgitud akuga kaasas olevale lehele. Lubatud voolutugevuse ülemine piir oleneb aku suurusest ja ehitusest. Aku põrutamine või kukkuda laskmine võib hävitada aku ka siis, kui väliskest jääb terveks. Tavaliselt purunevad siis positiivsed plaadid. Purgist juhuslikult väljunud elektrolüüt tuleb kohe ära pühkida, sest väävelhape on sööbiv vedelik ning mõjub hävitavalt eriti puuvillasele riidele.

b) Leelisaku[1] ületab tinaaku nii elektrilise kui ka mehaanilise vastupidavuse poolest. Leelisaku väliskest on terasest. Elektrolüüdiks on temas kaaliumhüdroksüüdi (KOH) 20%-line vesilahus ja elektroodideks õõnsad, aukudega varustatud nikeldatud teras-

[1] Nimetatakse ka Edisoni akuks ja raudnikkelakuks.



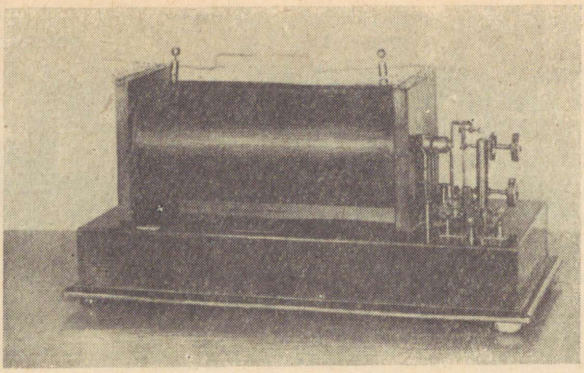
Joon. 65. Anoodpatarei.

plekist plaadid. Plaatide õõnsustesse on paigutatud elektrolüüsist osa võttev mass. Aku kaanele või külgedele on märgitud elektroodide poolsus. Kasutamisel on pinge pikemat aega umbes 1,25 V ja aku kannatab ka täielikku tühjenemist. Elektrolüüt on samuti sööbivate omadustega ja tuleb vältida selle väljumist purgist.

c) Üksikelemendi emj on kasutamiseks sageli liiga väike. Seepärast ühendatakse suurema pinge saamiseks elemendid järjestikku patareiks. Siis on patarei emj üksikelementide emj-de summa. Mitmest elemendist patarei koosneb, seda saame tavaliselt otsustada väljatoodud elektroodide otste arvu järgi. Nii näiteks kasutatakse elektrontoru anoodpinge saamiseks isegi mitmesajast väikesest elemendist koosnevat patareid, nn. anoodpatareid. Niisuguse patarei emj on siis vastavalt suurem ja seda tuleb patarei käsitsemisel arvestada. Anoodpatareist saadav voolutugevus on üldiselt väike (ca 100 mA), sest patarei elemendid on väikesed. Anoodpatareisid koostatakse ka kuivelementidest. Viimaste transport on vedeliku puudumise tõttu palju hõlpsam.

Tugevama voolu saamiseks tuleb ehitada suuremad üksikelemendid. See aga teeb patarei ruuminõudvaks ja kulukaks. Seepärast on paljudel juhtudel otstarbekohasem kasutada vooluvõrgust saadavat voolu, mille pinge on meil ca 220 V. Vooluvõrgust saadav vool on üldjuhul vahelduvvool. Alalisvoolu saamiseks kasutatakse siis alaldajaid, mis muudavad vahelduvvoolu alalisvooluks. Võrguvoolu kasutamisel tuleb enne alati selgusele jõuda seinakontaktist saadava voolu liigi suhtes. Et saada 220-voldisest võrgupingest katsele sobivat pinget ja voolutugevust, tuleb enamikul juhtudel kasutada reostaate. Alalisvoolu pinge vähendamiseks rakendatakse reostaati potentsiomeetrina, kuna vahelduvvoolu puhul on pinge muutmiseks ökonoomsem kasutada transformaatorit.

Töötamine pingetega 100 ja rohkem volti nõuab katsetajailt



Joon. 66. Sädeinduktor.

täiendavat ettevaatust, sest pinge all olevate isoleerimata juhtmete ja aparaadiosade puudutamine on ohtlik.

Kõrgepingelist tõukelist alalisvoolu saadakse sädeinduktorist. Sädeinduktori käitamiseks kasutatakse madalapingelist alalisvoolu, näiteks 2—20-voldist akude patareid. Sädeinduktoriga töötamisel tuleb vältida kõrgepinge all olevate osade puudutamist. Eriti tuleb silmas pidada, et katkestaja töötaks korralikult.

69. REOSTAADID JA TAKISTUSMAGASINID

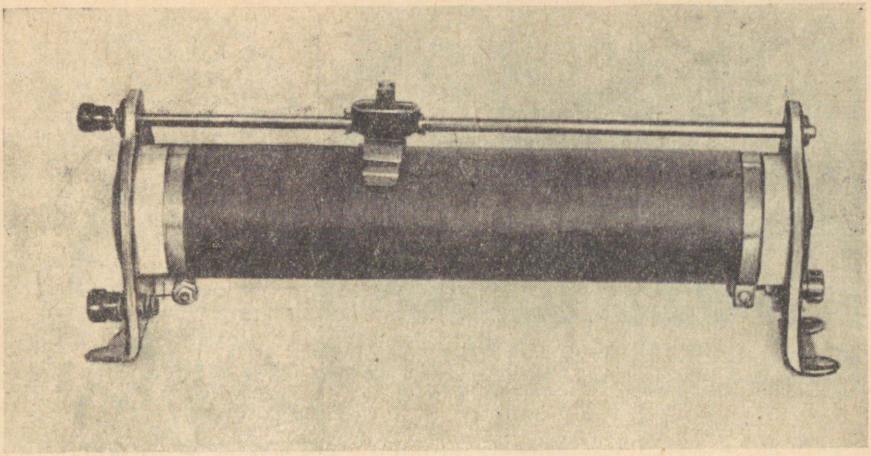
a) Reostaadi ülesandeks on voolutugevuse reguleerimine vooluahelas. Et pingelang ahela osades on võrdeline vastavate osade takistustega, siis on reostaadiga võimalik vähendada ka katseaparaadile langevat pinget.

Levinuimateks reostaaditüüpideks on takistustraadist mähitud lükat- ja väntreostaadid.

b) Lükatreostaadil toimub takistuse muutmine piki reostaati liikuva kontakti nihutamisega, mis võimaldab takistuse võrdlemisi pidevat muutmist. Vooluahelasse lülitamiseks on reostaadil kaks või kolm klemmi, millest üks on ühenduses liikuva kontaktiga.

c) Väntreostaat võimaldab takistuse astmelist muutmist vända nihutamisega ühelt kontaktilt teisele. Vooluahelasse lülitamise klemmidest on üks ühendatud vändaga ja teine takistustraadi otsaga.

Enne reostaadi kasutuselevõtmist tuleb jõuda selgusele reostaadi sobivuses antud tööks (vajalik takistus, lubatud voolutugevus, pidev või astmeline reguleerimine). Paramatele reostaatidele on peale märgitud takistuse suurus oomides ja lubatud maksimaalne voolutugevus amprites. Keelatud on maksimaalse voolutu-

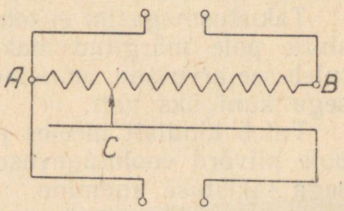


Joon. 67. Lükatreostaat.

gevuse ületamine, sest siis kuumeneb reostaat liigselt, traat pikeneb ja naaberkeerud võivad kokku puutuda, mille tulemuseks on lühis (lühiühendus) ning reostaadi ja halvemal juhul kogu aparatuuri hävimine.

d) Mõnede katsete puhul on vaja muuta pinget pidevalt nullist kuni teatava suuruseni. Seda saab teha kolme klemmiga lükatreostaadiga nn. potentsiomeetrilises lülituses.

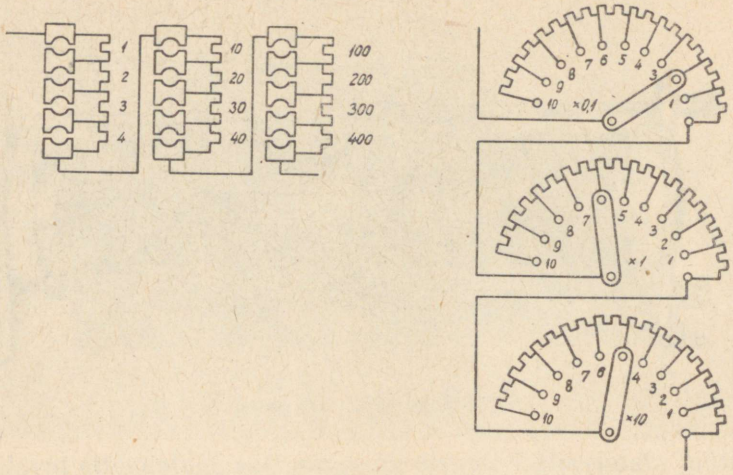
Vooluallikas ühendatakse reostaadi traadi otstes asuvate klemmidega *A* ja *B* (joon. 68). Aparaati juhitakse pinge liugkontaktist *C* ja ühest traadi otsas asuvast klemmist. Vastavalt joonisele on aparaati viivate juhtmete vaheline pinge null, kui punkt *C* ühtib punktiga *A*. Kui nihutame kontakti *C* punktist *A* punkti *B* poole, suureneb pinge ja osutub *C* jõudes punkti *B* võrdseks vooluallika pingega.



Joon. 68. Potentsiomeetriline lülitus.

Kirjeldatud meetodi puhul läbib reostaati kogu aeg kasutu vool ja seepärast pole potentsiomeetri kasutamine ökonoomne. Alalisvoolu puhul pole aga sageli teist võimalust pinge pidevaks reguleerimiseks.

e) Takistusmagasin koosneb reast täpse takistusega poolidest. Olenevalt magasini tüübist on neid poole võimalik lülitada järjestikku pistikute eemaldamisega või lülitite pööramisega. Poolidevahelised osad on massiivsed ega oma mõõtmist mõjustavat takistust. Iga pistiku või kontakti juurde on märgitud lülitamise või pistiku eemaldamisega lisanduv takistus oomides.



Joon. 69. Takistusmagasinide skeemid.

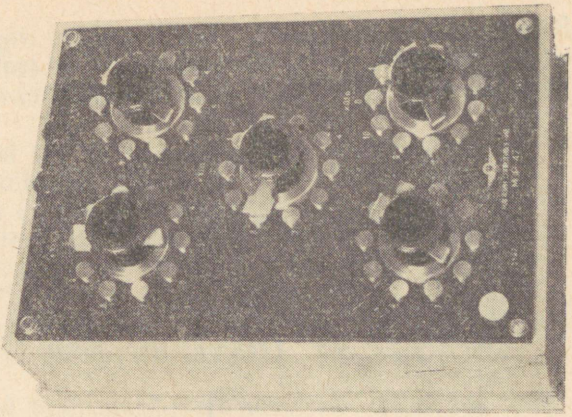
Pistikud ja kontaktid peavad üleminekutakistuse vältimiseks olema oksüüdivabad. Pistikutega magasinil tuleb mõõtmiste ajaks kõik vajalikud pistikud mõõduka survega ja pööramisega pessa suruda. Pärast mõõtmist tuleb kõik pistikud asetada pessa lõdvalt. Igas magasinis tohib tarvitada ainult sellele magasinile kuuluvaid pistikuid. Joonisel 69 on kujutatud pistikutega ja lülititega magasinide skeemid ja joonisel 70 nende fotod.

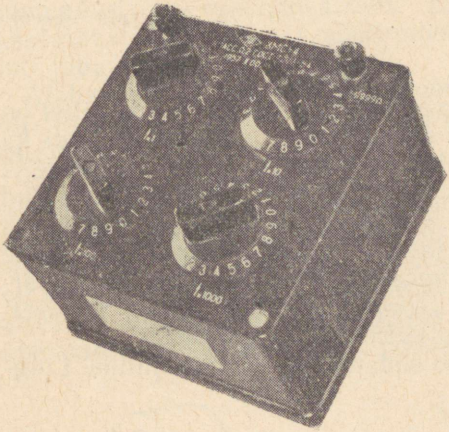
Takistusmagasini ei tohi koormata tugeva vooluga. Kui magasinile pole märgitud maksimaalset lubatud voolutugevust, siis tuleb see arvutada, arvestades, et üht pooli võib koormata võimsusega kuni üks vatt.

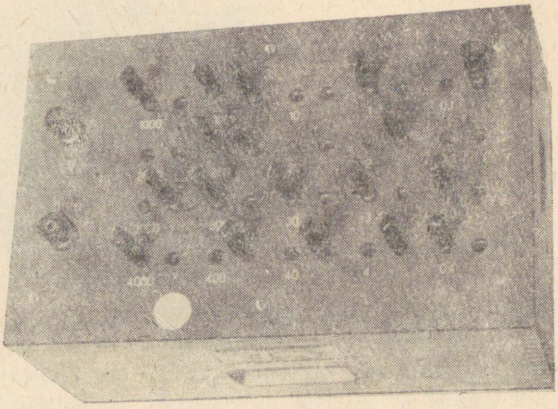
Tuleb kindlalt meeles pidada, et takistusmagasini ülesandeks pole niivõrd voolutugevuse reguleerimine kui just kindla suurusega takistuse andmine.

70. TRANSFORMAATORID

a) Vahelduvvoolu puhul asendab reostaate edukalt t r a n s f o r m a a t o r, milles energiakaod on üldiselt väga väikesed. Et võimaldada mitmesuguste pingete valikut, tuleb sekundaarmähisest välja tuua palju otsi. Pinge kahe väljatoodud otsa vahel on võrdeline otstevahelise keerdude arvuga. Joonisel 71 on kujutatud sekundaarmähis 6 väljatoodud otsaga, mis võimaldab kuni 15 erineva pinge saamist, kui keerdude arvud üksikute väljatoodud otste vahel on erinevad. Tavaliselt on trafo primaarmähis ette nähtud ühendamiseks vooluvõrguga, mille pinge on meil 220 V. Vastavalt sellele on sekundaarmähise otstele märgitud ka sealt saadavad pinged.

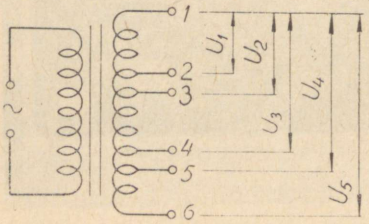




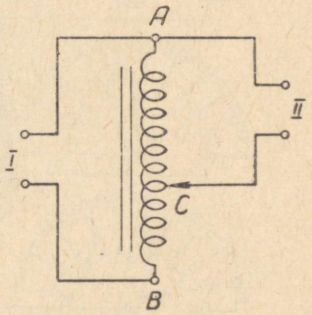


Joon. 70. Takistus-magasinid.

Kirjeldatud ehitusega trafo on võrreldav väntreostaadiga, sest ka siin toimub pinge muutmine astmeliselt. Lisaks tuleb aga ühelt astmelt teisele minnes lühise vältimiseks vool katkestada.



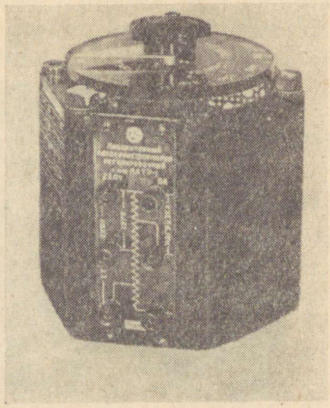
Joon. 71. Mitme otsaga sekundaarmähisega trafo skeem.



Joon. 72. Autotrafo skeem.

b) Potentsiomeetriga on võrreldav nn. a u t o t r a f o, millel on ainult üks mähis. Seejuures on osa mähisest nii primaar- kui ka sekundaarmähiseks. Primaarmähise moodustab mähis punktide *A* ja *B* vahel. Sekundaarmähiseks on vastavalt joonisel 72 esitatud skeemile mähise osa punkti *A* ja liikuva kontakti *C* vahel. Seejuures võib liikuv kontakt *C* asuda *A* ja *B* vahel või pikendatud mähise puhul isegi allpool punkti *B*. Viimasel juhul on saadav sekundaarpinge primaarpingest kõrgem. Joonisel esitatud skeemi kohaselt on võimalik pinge reguleerimine nullist primaarpingeni.

Meil kasutatavate autotrafode südamik on rõngakujuline. Liug-



Joon. 73. Autotrafo.

kontakti asukohta märgib skaala kohal liikuv osuti. Skaalal on jaotised nullist 240-ni, mis näitavad sekundaarpinget voltides, kui primaarpinge on olenevalt lülitusest 220 V või 127 V, või ühtlased jaotised nullist 100-ni.

Enne trafo lülitamist tuleb selgusele jõuda klemmide ülesannetes. Selleks on klemmilauale joonistatud trafo skeem.

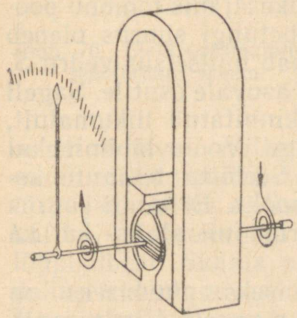
Autotrafo puuduseks on see, et tema sekundaarosa on juhtmete kaudu alaliselt ühenduses vooluallikaga. Seepärast on autotrafo isoleerimata sekundaarosa puudutamine ohtlik ka siis, kui võetav pinge on madal.

71. MÕÕTERIISTAD

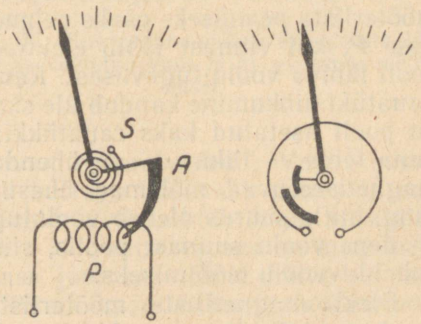
a) Praktikumi kestel tuleb korduvalt kasutada mitmesuguseid elektriliste suuruste mõõteriistu. Tavalisemad neist on volt-, amper- ja vattmeetrid. Seepärast on tarvis tunda nende riistade üldomadusi ja rakendusalasid. Erijuhtudel täpsusmõõtmisteks kasutatavate galvano- ja elektromeetritega lähem tutvumine toimub juba eritöödena.

Alalisvoolu täpsemaks laboratoorseks mõõtmiseks kasutatavad volt- ja ampermeetrid on valdavas enamikus nn. pöördpoolmõõteriistad.

b) P ö ö r d p o o l m õ õ t e r i i s t a (joon. 74) peamiseks osaks on tugev püsivmagnet, mille pooluste vahel asub pöörduv pool, millest juhitakse läbi mõõdetav vool. Pooli mähiseks on peen vasktraat kergel alumiiniumist alusel. Pooli tasakaaluasendi määravad kaks spiraalvedru, mille kaudu juhitakse pooli ka vool. Magnetivälja ühtlasemaks jaotamiseks ja poolustevahelise õhuvahe vähendamiseks paigutatakse pöörleva pooli keskele veel seisev



Joon. 74. Pöördpoolmõõteriista skeem.



Joon. 75. Elektromagnetiliste mõõteriistade tüüpe.

raudsüdamik, nii et mähis saab vabalt pöörduda pooluste ja raudsüdamiku vahelises õhuruumis. Voolu läbiminekul hakkab pool pöörduma. Pöördumist takistavad spiraalvedrude elastsustungid, mis on võrdelised pöördenurgaga. Pooli pöördumine ja seega ka

pooliga ühendatud osuti hälve on seda suurem, mida tugevam on pooli mähist läbiv vool. Hälve on võrdeline voolutugevusega, sest magnetiväli pooli südamiku ja magnetipooluste vahel on konstantse tugevusega. See võimaldab mõõteriistu varustada ühtlase jaotusega skaalaga. Hälbe suund oleneb voolu suunast ja seetõttu on riist otseselt rakendatav ainult alalisvoolu mõõtmiseks. Kui riista nulltäpp pole skaala keskel, siis tuleb riist lülitada nii, et vooluallika positiivne poolus oleks ühendatud riista plussiga tähistatud klemmiga ja miinus vastavalt miinusega.

Seda tüüpi riistu on võimalik ehitada nii, et nende näitamise viga on 0,1 % lõpphälbest ja voolutugevus lõpphälbel 0,0001 mA. Mähist läbiva voolu maksimaalne tugevus on tavaliselt 10 mA. Suuremate voolutugevuste mõõtmiseks tuleb kasutada šunte.

Suure täpsuse tõttu rakendatakse kirjeldatud mõõteriista ka vahelduvvoolu mõõtmiseks, kusjuures vahelduvvool enne alaldatakse. Tavaliselt kasutatakse selleks pooljuhtalaldajaid.

c) Teine meetod vahelduvvoolu mõõtmiseks põhineb termoelektrilisel efektil. Vahelduvvoolu juhtmes tekkinud temperatuuritõus tekitab pöördpoolriistaga ühendatud termoelemendis termopinge, mille suurus oleneb temperatuuritõusust ja viimane omakorda vahelduvvoolu tugevusest.

Vahelduvvoolu puhul on pöördpoolriistaga saavutatav täpsus ja tundlikkus väiksem kui alalisvoolu puhul. Samuti pole skaala siis ühtlase jaotusega.

Riistale märgitakse tavaliselt leppemärkidega tüüp, täpsus ja kasutamisasend. Mainitud tähised on toodud raamatu lõpus. Kui tähised puuduvad, siis tuleb tüübi üle otsustada skaala ja riista ehituse järgi.

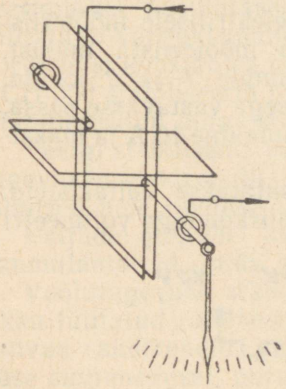
d) Elektromagnetiline mõõteriist ehk pehmeraudmõõteriist (joon. 75). Nagu nimetusest nähtub, on selle mõõteriista peamiseks osaks pehme raua tükike *A*, mis tõmbub poolisse *P*, kui viimast läbib elektrivool. Tõmbetungi suurus oleneb pooli läbiva voolu tugevusest. Rauatükki hoiab nullseisus vedru *S*. Rauatüki nihkumine kandub üle skaala kohal asuvale osutile. Sageli on pooli asetatud kaks rauatükki: üks on kinnitatud liikumatult, kuna teine — liikuv — on ühendatud osutiga. Voolu läbiminekul magnetiseeruvad mõlemad ühesuunaliselt. Seetõttu tekib tõuketung, mille suurus oleneb voolutugevusest poolis. Et tungi suurus ei olene voolu suunast poolis, siis kõlbab riist nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks.

Elektromagnetiliste mõõteriistade peamiseks puuduseks on nende suhteliselt suur mõjustatavus väliste magnetiväljade poolt. Selle vältimiseks kasutatakse magnetilist varjestamist või astatiseerimist. Esimest meetodit rakendatakse statsionaarsete riistade puhul, mille rauast väliskest kaitseb mõõtesüsteemi väliste väljade eest. Kantavad riistad on ehitatud astaatilistena, s. o. kahe pooliga, mille väljad on ruumis erinevalt suunatud. Selle tõttu väline väli, mis tugevdab ühe pooli välja, nõrgestab samal ajal teise pooli oma.

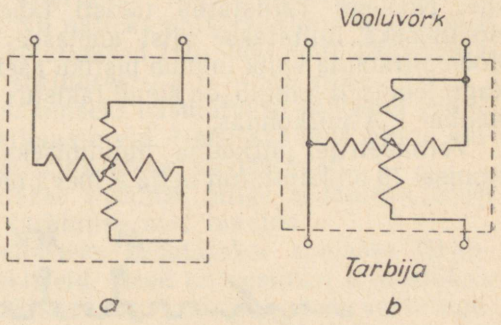
Eriti väikese koertsitiivjõuga magnetilisi materjale kasutades on osutunud võimalikuks suurendada mõõteriistade täpsust kuni 0,15—0,2 protsendini, mille tõttu kantavad elektromagnetilised riistad konkureerivad edukalt elektrodünaamilistega. Neid võib kasutada nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks, nad kannatavad ülekoormust ja tarvitavad vähem võimsust kui elektrodünaamilised riistad. Skaala jaotus on neil ebaühtlane.

e) Elektrodünaamiline mõõteriist (joon.76) koosneb kahest — seisvast ja osutiga ühendatud pöörduvast — poolist. Töötamise põhimõtte poolest on ta analoogiline pöördpoolriistaga, ainult püsivmagnetit asendab siin seisvas poolis voolu läbiminekul tekkiv magnetiväli.

Kasutades riista voolutugevuse või pinge mõõtmiseks, lülitatakse mõlemad poolid järjestikku või paralleelselt. Voolu läbiminekul tekib mõlemas poolis magnetiväli ja liikuv pool püüab pöörduda nii, et mõlemad väljad oleksid paralleelsed. Pooli ja ühtlasi



Joon. 76. Elektrodünaamilise mõõteriista skeem.



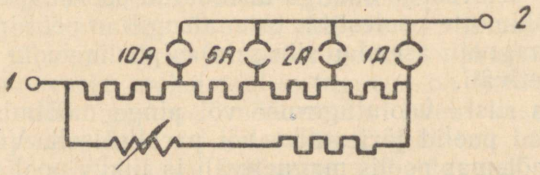
Joon. 77. Elektrodünaamilise mõõteriista lülitus a) voolutugevuse ja b) võimsuse mõõtmisel.

osutit hoiavad nullseisus vastavad spiraalvedrud. Voolu suuna muutumisel muutub välja suund korraga mõlemas poolis ja seetõttu jääb hälve endiseks. Siit järeldub riista kõlblikkus nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks. Mõõtmise täpsus on kuni 0,2% lõpphälbest. Skaala on ebaühtlase jaotusega, sest hälve on võrdeline voolutugevuse ruuduga. Riista kasutatakse vahelduvvoolu täpseks mõõtmiseks.

f) Vattmeeter. Elektrodünaamilised ja astaatilised elektromagnetilised mõõteriistad on kasutatavad vattmeetritena, kui nende ühest poolist juhitakse läbi mõõdetav vool ja teisest läbi suure takistuse pingega võrdeline vool. Osutit pöörav moment on sel juhul võrdeline voolutugevuse ja pinge korrutisega, s. o. võimsusega. Vattmeetril on tavaliselt neli klemmi. Kaks neist ühendatakse

vooluvõrguga ja teised kaks voolu tarbiva riistaga. Suurema pingega võimsuse mõõtmisel lülitatakse pingemähisele lisaks eeltakisti.

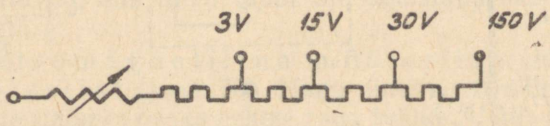
g) Mitme piirkonnaga mõõteriistad. Kasutatavate mõõteriistade arvu vähendamiseks varustatakse riistad mitme mõõtepiirkonnaga. Ampermeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse šunte, mis on sageli ehitatud mõõteriista sisse. Joonisel 78



Joon. 78. Mitmeastmeline šunt magnetoelektrilisele mõõteriistale.

on kujutatud mitmeastmeline šunt magnetoelektrilisele mõõteriistale. Noolega varustatud takisti tähendab mõõteriista mähist. Mõõtmiseks lülitatakse riist ahelasse klemmide *1* ja *2* kaudu. Mõõtepiirkonna valik toimub pistiku asetamisega vastavasse pessa. Nagu jooniselt nähtub, on šundi takistus minimaalne 10 A ja maksimaalne 1 A piirkonnas.

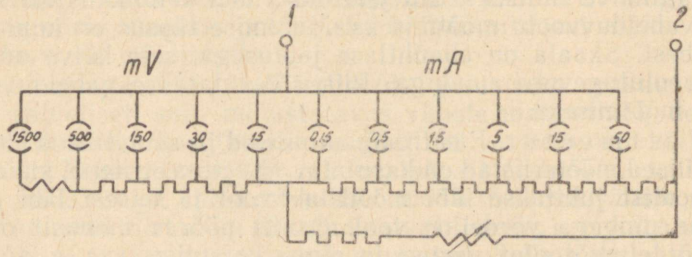
Voltmeetrite piirkonna muutmiseks kasutatakse eeltakisteid. Joonisel 79 on kujutatud nelja erineva mõõtepiirkonnaga voltmeetri



Joon. 79. Mitme piirkonnaga voltmeetri skeem.

skeem. Noolega varustatud takisti tähendab mõõteriista mähist ja teised eeltakisteid. Piirkonna valik toimub siin teise juhtme viimisega vastava klemmi alla.

Üht ja sama mõõteriista võib kasutada nii voolutugevuse kui ka



Joon. 80. Millivoltmilliampermeetri skeem.

pinge mõõtmiseks. Selleks varustatakse mõõteriist vastavate šuntide ja eeltakistitega. Niisugust riista nimetatakse voltampermeetriks või ka millivoltmilliampermeetriks, olenevalt peamistest mõõtepiirkondadest.

Joonisel 80 on kujutatud M-15 tüüpi millivoltmilliampermeetri skeem. Mõõtepiirkonna valik toimub pistiku asetamisega vastavasse pessa. Mitme piirkonnaga mõõteriista käsitsemine nõuab erilist tähelepanu ja ebaõige piirkonna lülitamine võib riista hävitada. Seetõttu kasutatakse neid tavalises füüsika praktikumis harva.

72. STABIILSE PINGE JA VOOLU SAAMINE

Paljude mõõtmiste puhul on vajalik konstantne pinge. Tavaline võrgupinge kõigub suurtes piirides ega võimalda paljudel juhtudel saavutada soovitavat mõõtmistäpsust. Pinge kõikumiste vähendamiseks kasutatakse stabilisaatoreid. Võrgupinge stabiliseerimiseks kasutatakse nn. ferroresonants-stabilisaatoreid, mis lülitatuna võrguklemmide ja aparatuuri vahele annavad väljundis võrdlemisi konstantse pinge. Nii näiteks universaalne stabilisaator УСН-350 stabiliseerib pinge kõikumised 160—260 volti 220 voldile. Stabiliseeritud pinge kõigub seejuures +3 ja —6% vahel.

Veelgi stabiilsema pinge saamiseks kasutatakse väikestel voolutugevustel elektroonilisi stabilisaatoreid. Neist saadava pinge kõikumised pole tavalise voltmeetriga enam mõõdetavad.

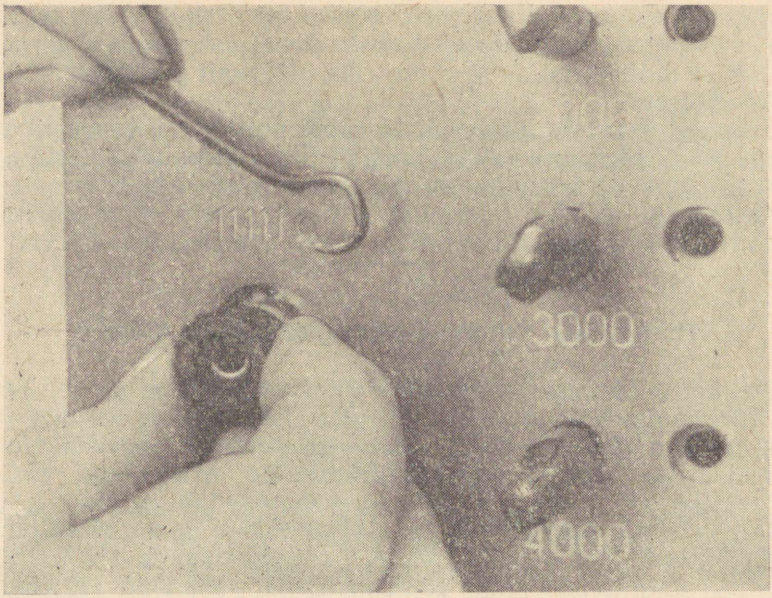
Paljudel juhtudel kasutatakse stabiilse pinge allikatena suuri akumulaatoreid, mida saab tarbimise ajal laadida.

Voolutugevuse stabiliseerimiseks kasutatakse ahelasse järjestikku lülitatud raudvesiniktakisteid. Need on vesiniku atmosfääris asuvad raudtraadid, mille takistus tugevasti suureneb voolutugevuse suurenemisel, piirates seega riista läbivat voolutugevust.

73. ÜHENDUSTE TEGEMINE

1. Mõõtmisseadmete üksikosade elektriliseks ühendamiseks kasutatakse mitmesuguseid j u h t m e i d. Üldiselt kasutatakse juhtmeid, mis on valmistatud isoleeritud vasktraadist. Korraliku isolatsiooniga juhtme puudutamine pole ohtlik, kuigi juhet läbib vool. Kõrgepinge puhul aga ei piisa tavalisest isolatsioonist ja tuleb kasutada kas eriisolatsiooni või eksituste vältimiseks üldse isolatsioonita traate, mis kinnitatakse nii, et nad oleksid küllalt kaugel kõrvalisist esemeist. Viimast meetodit rakendatakse sageli induktorist voolu võtmisel.

Tugevama voolu juhtimiseks tuleb kasutada jämedamaid juhtmeid, et vältida juhtmete kuumenemist ja isolatsiooni riknemist. Vaskjuhtmeid võib koormata kestvalt umbes 4 A/mm^2. Juhtmete takistuse vähendamiseks kasutatakse samuti jämedaid, kuid lisaks



Joon. 81. Juhtme ühendamine klemmiga.

veel võimalikult lühikesi traate. Vaskjuhtme takistuse hindamiseks võib kasutada valemit

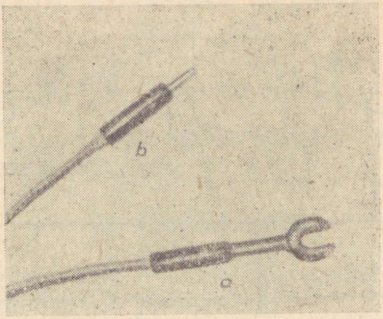
$$R = 0{,}025\frac{l}{d^2},$$

kus l on juhtme pikkus meetrites ja d tema läbimõõt millimeetrites. Kui juhe koosneb mitmest kiust, siis tuleb arvutada üksikkiu takistus ja jagada see kiudude arvuga.

Juhtmete ühendamiseks aparaatidega on viimased varustatud klemmidega. Ühendamiseks tuleb juhtmete otsad 1—2 cm pikkuselt isolatsioonist vabastada ja puhastada oksüüdist kas nüri noaga, viiliga või smirgelpaberiga. Samuti tuleb hoolitseda, et klemmide kokkupuutekohad juhtmetega oleksid puhtad. Kui juhe tuleb ühendada lihtsa kruviklemmiga, siis on kasulik pöörata kruvi alla asetatav juhtmeots kruvi kinnikeeramise suunas kõveraks. Vastasel korral libiseb traat kergesti kruvi alt välja. Püsivate ühenduste saamiseks on kasulik varustada juhtmed vastavate otstega, nn. kaablikingadega (joon. 82, *a*) või pistikutega (joon. 82, *b*).

Voolu kiireks ühendamiseks ja katkestamiseks kasutatakse mitmesuguseid lüliteid, millede kasutatavamad tüübid on esitatud joonisel 83.

Paljudel juhtudel on vaja muuta voolu suunda vooluahelas või lülitada ühe vooluringi asemele teine. Selleks kasutatakse kom-



Joon. 82. Kaabliking ja pistik.

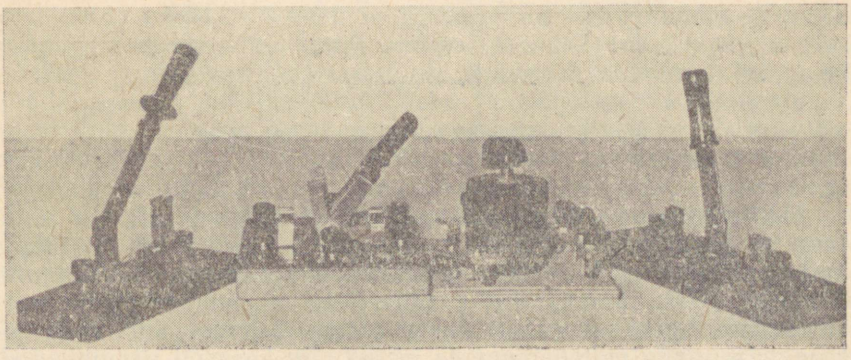
mutaatoreid ja ümberlüliteid. Enne vastavate riistade rakendamist tuleb põhjalikult tutvuda nende ehituse ja töötamisviisiga. Valeühendus võib siin tekitada suuri kahjusid.

2. Lülitusskeemid. Lülitusskeemile märgitakse vastavate leppemärkidega katseseadise üksikosad. Kasutatavamad leppemärgid on toodud raamatu lõpus.

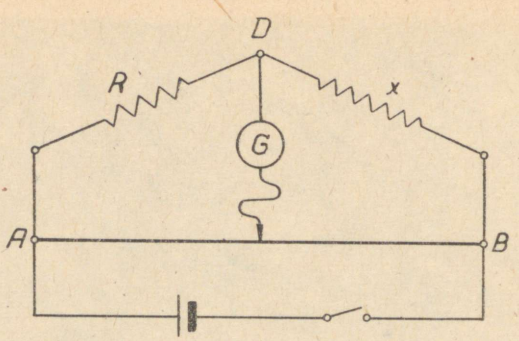
Teoreetilises skeemis tähistatakse üksikosad ja nendevahelised ühendused ilma osade asukoha täpsema märkimiseta.

Tehnilises skeemis märgitakse täpselt üksikosade klemmide, voolu hargnemiste, juhtmete jne. asukohad.

Skeemide võrdluseks tutvume lähemalt näiteks Wheatstone'i silla teoreetilise (joon. 84) ja tehnilise (joon. 85) skeemiga. Teoreetilise skeemi põhjal hargneb vool punktis *D* kolme harru. Praktiliselt aga osutub juhe punktist *D* kuni galvanomeetrini liigseks ja tehnilisel skeemil on punktiks *D* üks galvanomeetri klemm. Niisama hästi aga võime punktile *D* vastava hargnemiskohana kasu-



Joon. 83. Lüliteid.



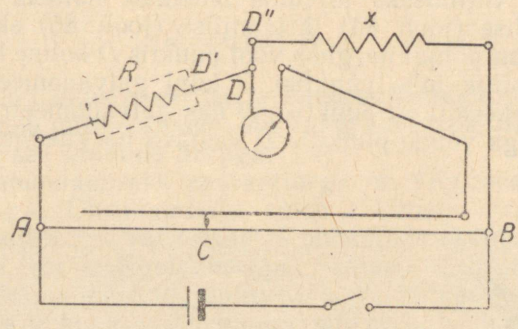
Joon. 84. Wheatstone'i silla teoreetiline skeem.

tada takistusmagasini või uuritava takisti galvanomeetri pool asuvaid klemme (D' või D'').

Teise erinevusena märkame, et galvanomeetrist tulev juhe, mis läheb liugkontaktile C, on tehnilises skeemis lülitatud silla otsas olevale liikumatule klemmile.

Nagu esitatud näitest selgub, jätab teoreetiline skeem teatava vabaduse ühenduste paigutamiseks ja igal katsel tuleb seepärast valida sobivaim paigutus.

Enamik käesolevas raamatus esitatud skeemidest on teoreetilised ja nõuavad kohandamist kasutatavatele riistadele.



Joon. 85. Wheatstone'i silla tehniline skeem.

Mõõtmisseadme koostamisel skeemi järgi on soovitatav alustada vooluallika ühe klemmiga ühenduses olevast lülitist (lüliti katkestusseisus!) ja koostada vooluahel vooluallika teise klemmini. Seejärel asuda eelmistega paralleelsete ühenduste tegemisele. Ühenduste tegemisel mingis meelevaldses järjekorras kaob keerukamate seadiste puhul ülevaade ja see viib kergesti valeühendustele.

74. ELEKTRIVÄLJA UURIMINE ELEKTROLÜÜDIVANNI MEETODIL

1. Tööülesanne

Tutvumine elektriväljaga elektrolüüdis. Ekvipotentsiaalipindade ja väljatugevuse määramine.

2. Töövahendid

Elektrolüüdivann koos mudelelektroodidega, pingeallikas, potentsiomeeter, mõõteriist ja sondid.

3. Teooria ja töö käik

Elektrolüüdivanni kasutatakse laialdaselt mitmesugustes füüsika ja tehnika harudes, kus on vaja määrata elektrivälja jaotust mitmesugustes aparaatides ja seadmetes. Selleks paigutatakse elektroodid või suurendatud metallilised mudelid elektrit juhtivat vedelikku sisaldavasse anumasse — elektrolüüdivanni, millest tulenebki meetodi nimetus. Elektrolüüdiks valitakse mingi vähese lahustunud soola hulgaga vedelik. Harilikult kasutatakse tavalist kraanivett. Elektroodidele rakendatava pinge mõjul tekib nende ümber elektrolüüdis elektriväli. Ühtlases elektrolüüdis tekkiv elektriväli on sarnane väljaga, mis tekiks samade elektroodide ja potentsiaalide puhul õhus või vaakuumis.

Elektrolüüdis sisaldub suur hulk positiivseid ja negatiivseid ioone. Elektrivälja mõjul tekkiv ioonide liikumine moodustab elektrivoolu. Oma teekonnal põrkavad ioonid kokku teiste osakestega, kaotades seejuures elektrivälja toimel omandatud kiiruse. Pärast põrget liiguvad ioonid mõjuva elektrivälja sihis, s. o. tungjoonte puutuja sihis. Kahe põrke vahelise lühikese vahemaa tõttu ei eemaldu nad liikumisel kuigi palju tungjoontest ja nende trajektoorid moodustavad lühikesi lõike tungjoontel. Samasugune liikumine toimub ka kõikidel järgmistel põrgetevahelistel lõikudel. Jooned, mida mööda liiguvad laengukandjad elektrolüüdis, ühtuvad seepärast elektrivälja tungjoontega. Mööda pindu, mis on risti osakeste trajektooridega, laengute liikumist ei toimu. Piki neid pindu puudub potentsiaalide vahe ja väljatugevuse komponent pinna sihis on null. Need on samapotentsiaalipinnad. Et tungjooned ühtuvad voolujoontega, siis samapotentsiaalipinnad elektrolüüdis ühtuvad elektrivälja samapotentsiaalipindadega. Esemetega võrreldes suurendatud mudelite puhul on samapotentsiaalipinnad elektrolüüdis samas vahekorras suurendatud, kuid jäävad geomeetriliselt sarnasteks samapotentsiaalipindadega tegelikus seadmes. Jälgides potentsiaalide vahet kahe punkti vahel ja teheskindlaks kõik punktid, mille potentsiaalide vahe antud punkti suhtes on null, võime leida hulga samapotentsiaalipindu ja saada ülevaate potentsiaali jaotusest elektriväljas.

Et elektriväli elektrolüüdis oleks täpselt sarnane väljaga uuritavas seadmes, peavad elektroodid olema küllalt kaugel vanni seintest, põhjast ja pinnast. Sel juhul asuvad elektroodid praktiliselt piiramatus elektrolüüdis ja väli elektrolüüdi mõõdetavas piirkonnas on sarnane reaalse väljaga ühtlases dielektrikus. Väga oluline on ka elektrolüüdi juhtivus. Kui elektrolüüdi juhtivus on võrreldav metallelektroodide juhtivusega, siis elektroodid mudelis kaotavad oma tähtsuse, sest nad pole enam samal potentsiaalil, nagu nad on dielektrikus. Potentsiaali langus elektroodis osutub siis võrreldavaks potentsiaali langusega elektrolüüdis ja elektroodi pind pole enam samapotentsiaalipind. Seepärast peab elektrolüüdi juhtivus olema palju väiksem metallide juhtivusest, millest on valmistatud elektroodid.

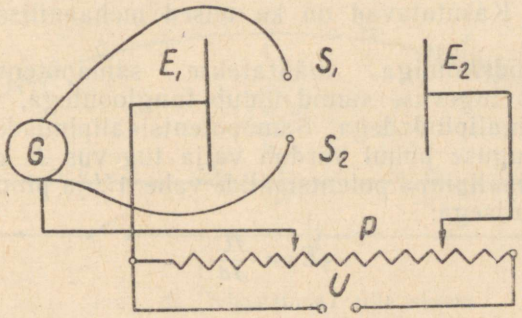
Välja punktide potentsiaalide mõõtmine toimub sondidega — metallteravikega, mis paigutatakse elektrolüüti uuritavaisse punktidesse. Teised sondi osad peale teravike on isoleeritud.

Elektrolüüdi juhtivus ei tohi olla ka liiga väike (nagu näiteks puhtal veel). See viib mõõdetava välja moonutamisele kasutatavate sondide poolt. Juhtivuse kaotanud elektrolüüt on isolaator ja tema kasutamine käesolevaks otstarbeks kaotab mõtte. Paigutades elektroodiga ühendatud sondi mingisse välja punkti dielektrikus, lühistame selle punkti juhtme abil elektroodiga. Kui ahelas on ka mõõteriist, siis see midagi ei näita. Sondi paigutamine moonutab välja oluliselt, sest sond annab oma paigutuskohale elektroodi potentsiaali. Niisugune olukord kujuneb ka siis, kui püüame kirjeldatud viisil mõõta välja õhus või vaakuumis. Et oleks välditud välja moonutamine, peab elektrolüüdi juhtivus mõõdetavate punktide vahel (sõltuvalt meetodist kahe sondi või sondi ja elektroodi vahel) olema vajalikul määral suurem mõõteahela juhtivusest. Siis tekib voolu hargnemine ja voolutugevus mõõteahelas on nõrk, kuid piisav potentsiaalide vahe registreerimiseks tundliku riistaga. Välja moonutusi ei teki, sest sondi paigutamine elektrolüüti muudab väga vähe potentsiaali elektrolüüdis. Nõrk vool sondi ahelas mõjustab välja sondi paigutuskohas vähe.

Vaatleme täpsemalt välja sarnasuse aluseid vedelikus ja dielektrikus. Väli ühtlases dielektrikus on kirjeldatav potentsiaali φ jaotusega, mis rahuldab Laplace'i võrrandit $\Delta\varphi = 0$. Juhtivate elektrolüütide puhul avaldub Ohmi seadus kujul $j = \lambda E$, kus j on voolu tihedus, E välja tugevus ja λ juhtivus, mis on konstantne kogu elektrolüüdi ulatuses. Keskmine laengu tihedus elektrolüüdis statsionaarses olukorras on konstantne ega muutu aja jooksul. Seepärast $\operatorname{div} \vec{j} = 0$ ja $-\operatorname{div} \vec{E} = \operatorname{divgrad} \varphi = \Delta\varphi = 0$. Väli rahuldab mõlemal juhul Laplace'i võrrandit. Kui potentsiaali väärtused elektroodidel on võrdelised ja elektroodide kujud elektrolüüdis geomeetriliselt sarnased vastavate reaalsete potentsiaalide ja elektroo-

didega dielektrikus, siis valitseb samasugune suhe ka elektrolüüdi välja ja dielektriku välja vahel.

Kahe elektroodi puhul ei sõltu välja jaotus potentsiaalide vahest elektroodidel. Sellest sõltub ainult välja tugevus. Mitmeelektroodilistes süsteemides tuleb määrata elektroodidevahelised potentsiaalid potentsiomeetriliselt võrdelistena tegelike potentsiaalidega uuritavas seadmes. Joonisel 86 on kujutatud lihtsaim katseskeem, kus U tähendab pingeallikat, P potentsiomeetrit, E_1 ja E_2 elektroode, G tundlikku mõõteriista ja S_1 ja S_2 sonde.



Joon. 86. Skeem elektrivälja uurimiseks elektrolüüdivanni meetodil.

Olgu tarvis määrata samapotentsiaalipind punktis, kuhu on paigutatud sond S_1. Selleks leiame sondi S_2 abil punktid, mille puhul puudub vool mõõteriistas. Kui mõõteriist sondi S_2 paigutamisel mingisse välja punkti näitab voolu, siis tuleb sondi nihutada voolu kadumiseni. Kui mõõteriistaks on galvanomeeter, siis on seda kerge teha galvanomeetri osuti hälvet jälgides. Sondi tuleb nihutada hälbe kahanemise suunas, kuni hälve muutub nulliks. Nii leiame ühe punkti teise järel.

Elektrolüüdivanni toidetakse tavaliselt vahelduvpingega. Alalispinge on kasutatav, kuid lagundab elektrolüüti ja tekitab elektroodidel polarisatsiooni, mis võib muuta elektroodide juhtivust, moonutada välja ja seega ka mõõtmistulemusi. Vahelduvpinge eeliseks on ka tema lihtne võimendatavus elektrooniliste seadmetega. Vahelduvpinge puhul kasutatakse vooluindikaatorina telefoni. Sondi asetsemist samapotentsiaalipinnal näitab telefonis kuuldava heli miinimum.

Sageli tuleb mõõta rotatsioonsümmeetrilisi välju. Selleks kasutatakse mudeleid, mis kujutavad uuritavast elektroodide süsteemist ainult üht poolt, kusjuures lõige on tehtud sümmeetriatelge sisaldavat pinda mööda. Niisugune mudel paigutatakse vanni nii, et lõikepind ühtub vedeliku pinnaga. Täielikult elektrolüüti paigutatud mudeli igas meridiaantasandis, mis läbib sümmeetriatelge, jäävad voolujooned sellele pinnale. Mittejuhtival õhu ja vedeliku

vahepinnal paiknevad kõik tungjooned sellel pinnal. Mudeli ühe poole asendamine õhuga ei moonuta seepärast voolu jaotust piirtasandil ja seega ka mudeli ülejäänud poolel elektrolüüdis. Et kõik meridiaantasandid reaalses seadmes on samaväärsed, siis võime mõõta välja jaotust vedeliku pinnal poolikut mudelit kasutades. See lihtsustab mõõtmist, sest sonde pole tarvis paigutada sügavale elektrolüüti, mis võib olla raskesti juurdepääsetav. Mõõtmisel tuleb ainult natuke vedeliku sisse ulatuvat sondi liigutada vedeliku pinnal.

Potentsiaali jaotuse paberile märkimiseks kasutatakse enamasti pantograafi. Kasutatavad on ka teised mehaanilised märkimisviisid.

Elektrolüüdivanniga määratakse samapotentsiaalipindade jaotus. Välja tugevuse suund ühtub tungjoontega, mis on risti samapotentsiaalipindadega. Samapotentsiaalipindade küllalt väikese vahekauguse puhul võrdub välja tugevus E kahe lähedase samapotentsiaalipinna potentsiaalide vahe ΔU ja pindade vahekauguse Δd jagatisega:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta d}.$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks samapotentsiaalipinnad on risti tungjoontega?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 10, 11, 15, 18 ja 19.
Mihelson, Füüsika II, ptk. III, §§ 1, 2, 5, 7, 9 ja 10.

75. JUHTME TAKISTUSE MÕÕTMINE WHEATSTONE'I SILLA ABIL

1. Tööülesanne

Wheatstone'i silla ehituse põhimõttega tutvumine ja takistuse mõõtmine Wheatstone'i silla abil.

2. Töövahendid

Wheatstone'i sild, takistusmagasin, galvanomeeter, vooluallikas, lüliti, juhtmeid ühenduste tegemiseks ja mõõdetav takisti.

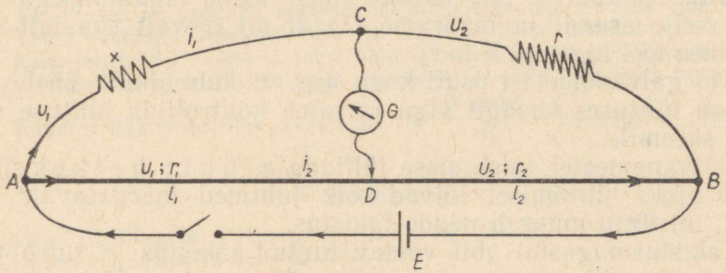
3. Töö käik

a) Wheatstone'i silla ehituse põhimõte selgub joonisel 87 esitatud skeemilt. Elemendist E (vt. § 73) tulev vool jaguneb kontaktis A kaheks haruks: ACB ja ADB. Olgu voolu tugevus esimeses neist i_1, teises i_2. Koosnegu haru ACB tundmatust takistusest x ning tuntud takistusest r (takistusmagasin), haru

ADB (reohord) aga takistustest r_1 (AD) ja r_2 (DB), mis on võrdelised traadi vastavate osade pikkustega l_1 ja l_2, sest traat AB on ühtlane. Järelikult

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}. \qquad (1)$$

Mõlema vooluharu otste A ja B vaheline pinge on sama. Tähendab, mõlema vooluharu otste vahel on võimalik leida lõpmata palju selliseid punktide paare, näiteks punktid C ja D, millel on



Joon. 87. Wheatstone'i silla skeem.

punkti A suhtes võrdne pinge, nii et AC-vaheline pinge (u_1) võrdub AD-vahelise pingega. Sel juhul on nn. «silla» CD otste vaheline pinge null ja temasse lülitatud galvanomeeter G voolu ei näita. Sellest järeldub, et ka CB- ja DB-vahelised pinged on võrdsed (u_2).

Väljendades pinged u_1 ja u_2 voolutugevuse ja takistuse kaudu (pinge võrdub voolutugevuse ja takistuse korrutisega) vastavates juhtmelõikudes, saame:

$$u_1 = i_1 x = i_2 r_1;$$
$$u_2 = i_1 r = i_2 r_2.$$

Siit jagamise teel:

$$\frac{i_1 x}{i_1 r} = \frac{i_2 r_1}{i_2 r_2} \text{ ja } \frac{x}{r} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Asendades saadud valemis suhte $\frac{r_1}{r_2}$ suhtega $\frac{l_1}{l_2}$ valemist (1), saame:

$$\frac{x}{r} = \frac{l_1}{l_2},$$

millest

$$x = r\frac{l_1}{l_2}. \qquad (2)$$

Valem (2) ongi aluseks takistuste mõõtmisel Wheatstone'i silla abil.

b) Valemist (2) järeldub töökäik Wheatstone'i sillal. Moodustame vooluahela vastavalt joonisel 87 esitatud skeemile. Seejuures tuleb hoolitseda, et ühendused (kontaktid) oleksid võimalikult takistusvabad, s. o. korralikult tehtud (juhtmed puhtad, kinnitused tihedad). Liugkontakti edasi-tagasi nihutades (traadi kulumise vältimiseks ei tohi kontakt nihutamisel traati puudutada!) näeme, et «silla» galvanomeeter näitab voolu kord ühes, kord teises suunas. Tähendab, vahepeal peab leiduma liugkontakti D selline asend, kus «silla» galvanomeeter voolu üldse ei näita. Kontakti D ettevaatliku edasi-tagasi nihutamisega fikseerime selle asendi ja määrame traadi all olevalt skaalalt otsese vaatluse teel lugemid l_1 ja l_2.

Kui galvanomeetri osuti kogu aeg nihkub ainult ühele poole, siis on lülituses kusagil viga ja tuleb kontrollida lülituse vastavust skeemile.

Galvanomeeter tuleb sisse lülitada ainult hetkeks. Pikemaks ajaks lülitamisel võivad kõik juhtmed märgatavalt soojeneda, mistõttu muutub nende takistus.

Takistusmagasini abil võetav tuntud takistus r tuleb valida nõnda, et ta liiga palju ei erineks määratavast takistusest x. Sel puhul kaob vool «sillas», kui liikuv kontakt asetseb enam-vähem takistustraadi keskosas, sest siis $\frac{x}{r} = \frac{l_1}{l_2} \approx 1$ ja $l_1 \approx l_2$. Sellega saavutame mõõtmistulemuse suurema täpsuse.

Muutes tuntud takistuse r suurust, toimetada kolm mõõtmist, arvutada neist takistus ja võtta saadud tulemustest aritmeetiline keskmine. Vaatlustulemused märkida tabelisse järgmiselt:

Jrk. nr.	Tuntud takistus r	Pikkus l_1	Pikkus l_2	Otsitav takistus x
1	$r_1 =$			$x_1 =$ .....
2	$r_2 =$			$x_2 =$ .....
3	$r_3 =$			$x_3 =$ .....

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} = \ldots$$

Otsitava takistuse määramiseks võime toimida ka järgmiselt. Asetame liugkontakti reohordi keskkohta. Nüüd lülitame takistusmagasinist järjest suuremaid takistusi, kuni galvanomeeter «sillas» ei näita enam voolu. Viimasel juhul takistusmagasini takistus võrdubki määratava takistusega, nagu nähtub valemist (2).

Seda võtet on soovitatav rakendada eespool saadud tulemuste kontrollimiseks.

Ühendada kaks takistit järjestikku ning paralleelselt ja mää-

rata Wheatstone'i silla meetodil selle ühenduse takistus. Võrrelda mõõtmise tulemusi vastavast valemist arvutatud takistuse väärtusega.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Millest oleneb juhtme takistus?
2. Defineerida takistus- ja eritakistusühikud $\left(\text{oom},\ \Omega\ \text{cm},\ \frac{\Omega\ \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$.
3. Kuidas oleneb juhtide eritakistus temperatuurist?
4. Anda reegel juhtmete kogutakistuse määramiseks nende järjestikusel ja rööbitisel ühendamisel.
5. Kui täpselt on võimalik määrata takistust Wheatstone'i silla abil?
6. Leida suuruslik vahekord cgse- ja mksA-süsteemi takistusühikute vahel.
7. Kaks juhet, üks vasest ja teine alumiiniumist, on võrdse pikkusega ning omavad võrdset takistust. Kumb neist juhtmeist on raskem ja mitu korda?
8. Kumb eritakistuse ühik — Ω cm või $\frac{\Omega\ \text{mm}^2}{\text{m}}$ — on suurem ning mitu korda?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 44—49.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VII, § 6.

76. ELEKTROLÜÜDI ERIJUHTIVUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Elektrolüüdi erijuhtivuse määramine sillameetodil.

2. Töövahendid

Kohlrauschi sild, väike sumisti või elektrontoru-generaator vahelduvvoolu allikana, telefon, elektrolüüdianum elektroodidega, tuntud juhtivusega ja uuritav elektrolüüt, termomeeter, juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

a) Elektrolüüdi takistus R oleneb nagu metalsete juhtmete takistuski pikkusest l, ristlõikest S ja eritakistusest ϱ, s. o.

$$R = \varrho \frac{l}{S}. \tag{1}$$

Aine eritakistuseks nimetatakse sellest ainest valmistatud 1-sentimeetrise servapikkusega kuubi takistust oomides. Eritakistuse pöördväärtust $\frac{1}{\varrho} = \varkappa$ nimetatakse aine erijuhtivuseks:

$$\varkappa = \frac{l}{S} \cdot \frac{1}{R}. \tag{2}$$

Nagu valemist (2) selgub, on erijuhtivuse määramiseks tarvis teada juhtme takistust R ja juhtme mõõtmeist olenevat suurust $\frac{l}{S} = C$, mida nimetatakse takistusmahtuvuseks.

Takistuse R mõõtmiseks rakendame Wheatstone'i silla lülitust. Elektrolüütide takistuste mõõtmiseks aga ei saa kasutada alalisvoolu, sest see tekitab elektrolüüsi ja elektroodidel polarisatsiooni, mis annab valed (liiga suured) takistuse väärtused. Seepärast peame kasutama vahelduvvoolu. Vahelduvvoolu tekitame väikese induktor-sumisti või elektrontoru-generaatoriga, mille võnkesagedus on kuuldavuse piirides. Voolu indikaatoriks ei sobi sel juhul galvanomeeter, sest selle osuti ei suuda jälgida vahelduvvoolu perioodilisi suunamuutusi. Galvanomeetri asemel kasutame telefoni, milles kuuleme vahelduvvoolu läbiminekul suminat, mille tugevus muutub voolutugevuse muutumisel. Nullseisus, s. o. kui vool ei läbi telefoni, vaikib ka telefon.

Mõõtmiseks kasutame Wheatstone'i silda Kohlrauschi ehitusviisis. Kohlrauschi sillal on mõõtetraat täpselt 10 ringina keritud jaotistega varustatud pööratavale isoleerivast ainest silindrile. Liikuva kontakti moodustab väike rattake. Kogu seadis on ehitatud takistuskasti kaanele, milles asetsevad induktsioonivabad takistused 1, 10, 100 ja 1000 oomi.

Vedelike puhul valmistab raskusi suuruse C määramine, sest vedeliku kuju oleneb anuma mõõtmeist. Seepärast lähtume oma töös juba tuntud erijuhtivusega elektrolüüdist, määrates tema takistuse R ning arvutades anuma takistusmahtuvuse

$$C = \varkappa R. \qquad (3)$$

Kui C on leitud, siis täidame anuma uuritava elektrolüüdiga, määrame takistuse R_1 ja arvutame erijuhtivuse

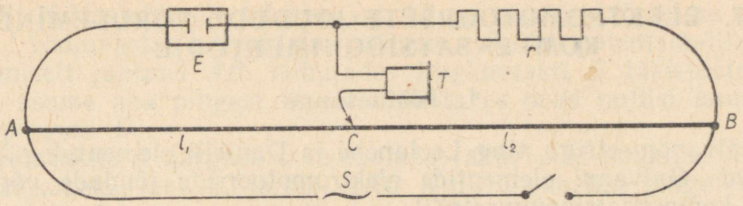
$$\varkappa_1 = \frac{C}{R_1}. \qquad (4)$$

Mõõtmiseks kasutatav elektrolüüdianum on U-kujuline ja varustatud plaatinast elektroodidega, sest teised metallid lagunduvad elektrolüüdis.

Elektrolüütide juhtivus on suuresti sõltuv temperatuurist. Seepärast peame alati silmas pidama, missugusel temperatuuril mõõtmine toimub. Vastandina metallidele suureneb elektrolüütide juhtivus temperatuuri tõusmisel ja seejuures ligikaudu 2,5% võrra iga kraadi kohta toatemperatuuri piirkonnas.

b) Töö teostamiseks ehitame silla joonisel 88 toodud skeemi kohaselt, kus s on vahelduvvoolu allikas, r takistusmagasin, AB mõõtetraat liugkontaktiga C, E anum elektrolüüdiga, T telefon, l_1 ja l_2 traadiosade AC ja CB pikkused.

Täidame anuma tuntud erijuhtivusega elektrolüüdiga. (Elektrolüütide erijuhtivused leiduvad raamatu lõpul toodud tabelis.) Mää-



Joon. 88. Kohlrauschi silla skeem.

rame elektrolüüdi temperatuuri ning lülitame ta ahelasse. Valime takistusmagasinist mingi takistuse, lülitame sisse vooluallika ja jälgime suminat telefonis, muutes silindri pööramisega liugkontakti C asendit. Leiame kontakti asendi, mille puhul sumin telefonis on minimaalne. Takistusmagasinist püüame leida niisuguse takistuse, et kontakt asetseks võimalikult traadi keskel. Arvutame takistusest r ning traadi pikkustest l_1 ja l_2 elektrolüüdi takistuse R nagu juhtme takistuse määramisel Wheatstone'i silla abil:

$$R = \frac{l_1}{l_2} r. \qquad (5)$$

Siit arvutame valemi (3) põhjal takistusmahtuvuse C.

Tühjendame anuma, loputame teda destilleeritud veega, kuivatame ja täidame uuritava elektrolüüdiga. Mõõdame elektrolüüdi temperatuuri ja lülitame ta ahelasse. Määrame elektrolüüdi takistuse R_1 eelkirjeldatud viisil ning arvutame erijuhtivuse $\varkappa_1$ valemi (4) põhjal.

Pärast katset tühjendame anuma, loputame teda hoolikalt destilleeritud veega ning kuivatame. Lahutame kõik tehtud ühendused ja viime aparatuuri esialgsesse seisundisse.

Et elektrolüüdi takistus oleneb suuresti lahustunud aine kontsentratsioonist, siis kasutatakse eeltoodud katseseadist ka elektrolüütide kontsentratsioonide määramiseks. Selleks määratakse uuritava elektrolüüdi erijuhtivus ja leitakse tabelist sellele vastav kontsentratsioon.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks peab tuntud takistus r olema induktsioonivaba?
2. Mille poolest erinevad elektrolüütide ja metallide elektrijuhtivused?
3. Kuidas seletatakse elektrolüütide juhtivuse suurenemist temperatuuri tõusmisel?
4. Kus ja milleks rakendatakse elektrolüütilist polarisatsiooni?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 58 ja 65.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VIII, § 1.

77. ELEKTROMOTOORSETE JÕUDUDE VÕRDLEMINE KOMPENSATSIOONIMEETODIL

1. Tööülesanne

Galvanomeetriga ning Leclanché ja Danielli elementidega tutvumine. Galvaani elementide elektromotoorsete jõudude võrdlemine kompensatsioonimeetodil.

2. Töövahendid

Reohord, galvanomeeter, aku, kaks galvaani elementi (Leclanché ja Danielli), kaks lülitit ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

a) Wheatstone'i sillaga tutvusime juhtme takistuse määramisel (§ 75). Käesolevas töös kasutame Wheatstone'i silla takistustraati — reohordi — ühtlase potentsiaalilanguse saamiseks. Voolu olemasolu ja suund määratakse galvanomeetriga. Galvanomeetrite ehitusega tutvumiseks vt. § 71.

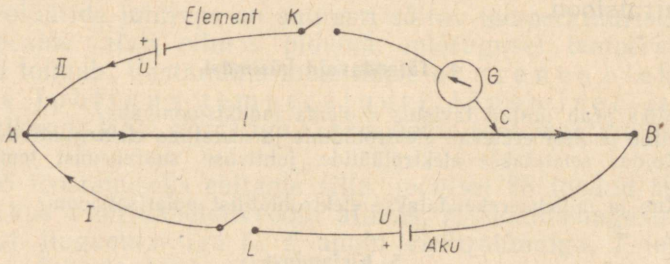
Kasutatava aku, Leclanché ja Danielli elementide ehitusega tutvumiseks vt. § 68. Vedelike ($CuSO_4$ ja $ZnSO_4$ lahuste) valamine Danielli elementi ja sellest tagasi vastavaisse anumaisse peab toimuma praktikumi juhendaja juuresolekul.

Enne mõõtmisele asumist tuleb mõõtevahenditega korralikult tutvuda.

b) Käesolevas töös kasutame järgmist katsekorralduse skeemi.

Aku pingega U on lüliti L abil lülitatav suletud vooluahelasse $ABLA$ (lühidalt: I vooluahel), kusjuures AB on Wheatstone'i silla takistustraat — reohord.

Teine vooluahel $AKCA$ (II) on moodustatud galvaani elemendi abil, mille pinge on u, ja sellesse ahelasse on lülitatud galvanomeeter G. Lülitus on tehtud nõnda, et kontakt A on ühendatud aku ja elemendi samanimeliste poolustega, näiteks plussidega (joon. 89).



Joon. 89. Lülitusskeem elektromotoorsete jõudude võrdlemiseks.

Et lülitusjuhtmete takistus on AB takistusega võrreldes väike, siis I vooluahelas toimub aku pooluste vaheline potentsiaalilangus peamiselt juhtmel AB. Nihutades liugkontakti C takistustraadil AB, saame aku pingest U võtta mistahes osad nullist kuni aku täispingeni U.

Kontaktis A hargneb I vooluahela (aku) vool punktide A ja C vahel kaheks: läbi AC ja läbi AKC. Kui AC-vaheline pinge võrdub elemendi elektromotoorse jõuga u, siis elemendi ja aku pinged harus AKC kompenseeruvad (tasakaalustuvad) ja galvanomeeter voolu ei näita. Et AC-vahelist pinget saame muuta liugkontakti C edasi-tagasi nihutamisega, siis on sellise olukorra saavutamine II vooluahelas alati võimalik, muidugi eeldusel, et $u < U$. Sel viisil saame määrata pikkuse AC, mille puhul aku ahela potentsiaalilangus arvuliselt võrdub elemendi elektromotoorse jõuga. Järelikult elemendi elektromotoorne jõud (u) ja aku pinge (U) suhtuvad nagu AC ja AB, s. o.

$$\frac{u}{U} = \frac{AC}{AB} = \frac{l}{AB}, \tag{1}$$

kui $AC = l$.

Lülitame nüüd II ahelasse elemendi pingega u_1 ja määrame uuesti liugkontakti asendi C_1, mille puhul galvanomeeter II vooluahelas voolu ei näita. Olgu sel juhul $AC_1 = l_1$. Siis, analoogiliselt valemiga (1), võime kirjutada:

$$\frac{u_1}{U} = \frac{AC_1}{AB} = \frac{l_1}{AB}. \tag{2}$$

Jagades valemi (1) valemiga (2), saame:

$$\frac{u}{u_1} = \frac{l}{l_1}, \tag{3}$$

s. o. võrreldavate elementide elektromotoorsed jõud suhtuvad nagu galvanomeetri nullseisule vastavad takistustraadi osade pikkused.

Valemil (3) põhinebki galvaani elementide elektromotoorsete jõudude võrdlemine nn. kompensatsioonimeetodil. Kompensatsioon seisneb siin selles, et elemendi poolt tekitatud pinge, mis mõjub galvanomeetrile, tasakaalustub aku poolt tekitatud vastassuunalise pingega.

c) Mõõtmise teostame järgmiselt:

Moodustame vooluahela vastavalt joonisel 89 esitatud skeemile. Vool tuleb sisse lülitada ainult hetkeks, et teha kindlaks voolu olemasolu ja suund. Pikemaajalise lülituse korral juhtmed soojenevad, mis muudab nende takistust. Ka võib pikemaajalise lülituse korral polarisatsiooni tõttu muutuda elemendi emj. Seejuures tuleb alati **enne lülitada aku ja siis elemendi vool, katkestada enne elemendi ja siis aku vool.** Vastasel korral mõjub kogu

elemendi pinge galvanomeetrile, andes sellele liiga tugeva voolutõuke. Pealegi võib liiga tugev vool hävitada galvanomeetri pooli mähise. Mainitud õnnetuse vältimiseks lülitatakse sageli elemendi vooluahelasse järjestikku suureoomiline takisti või varustatakse galvanomeeter šundiga.

Eeskirja kohaselt voolu lülitades otsime takistustraadil liugkontakti asukohad, mille puhul galvanomeetri hälbed on vastassuunalised. Siis jagame silmaga hinnates liugkontakti asukohtade vahe erisuunaliste hälvete puhul pooleks ning määrame jälle hälbe suuna. Nii kontakti asukohtade vahet erisuunaliste hälvete puhul pooleks jagades jõuame varsti olukorrani, kus kontakti vähimgi nihutamine ühele või teisele poole annab erineva suunaga hälbe. Viimastest lugemitest võtame aritmeetilise keskmise ja peame seda vastavaks olukorrale, kus galvanomeeter voolu ei näita. (Paigalseisu saavutamine osutub praktiliselt raskesti teostatavaks.)

Nüüd asendame Leclanché elemendi Danielli elemendiga ja kordame mõõtmist endisel viisil.

Et aku pinge võib katse kestel langeda, siis sellest tingitud vea vältimiseks kordame mõõtmist Leclanché elemendiga. Esimese ja viimase mõõtmise tulemustest võtame aritmeetilise keskmise, mida võrdleme Danielli elemendi puhul saadud tulemusega valemi (3) põhjal.

Vaatlustulemuste registreerimiseks ja arvutusteks kasutame järgmist skeemi:

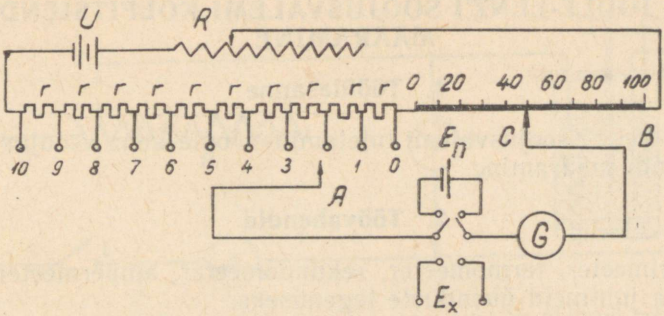
Element	Leclanché		Danielli		Leclanché	
	Hälve		Hälve		Hälve	
	vasakule	paremale	vasakule	paremale	vasakule	paremale
Liugkontakti asukohad						
Nullseis	$l_1 = \ldots$		$l_2 = \ldots$		$l_3 = \ldots$	

$$l = \frac{l_1 + l_3}{2} = \ldots$$

$$\frac{\text{Leclanché elemendi emj}}{\text{Danielli elemendi emj}} = \frac{l}{l_2} = \ldots$$

Teades ühe elemendi emj, saame selle suhte abil arvutada teise elemendi emj.

Pingete täpsemaks mõõtmiseks kasutatakse eelmist lülitust täiendatud kujul. Vastavaid seadeldisi nimetatakse kompensaatoriteks. Joonisel 90 on esitatud lihtsa kompensaatori skeem, mis võimaldab ilma täiendavate arvutusteta määrata elektromotoorseid jõude. Kompensaatori nn. töövooluahel koosneb pingeallikast U, reguleeritavast takistist R, kümnest võrdse takistusega r takis-



Joon. 90. Kompensaatori skeem.

tist ja skaalaga varustatud reohordist, mille takistus on samuti r. Pingete mõõtmiseks lülitatakse galvanomeetri ahelasse üks kord normaalelement E_n ja teine kord uuritav elektromotoorne jõud E_x. Mõlemal korral tasakaalustatakse galvanomeetri ahela emj punktide A ja C vahelise pingega. Tasakaalu puhul galvanomeeter voolu ei näita. Emj määramiseks tuleb reguleerida töövool I nii, et igale takisti astmele vastab näiteks 0,1 V. Niisama suur pinge valitseb siis ka reohordi otste vahel. Seega $Ir = 0{,}1$ V. Kui näiteks $r = 100\ \Omega$, siis $I = \frac{0{,}1}{100} = 1$ mA. Selle tingimuse täitmiseks paigutame kontaktid A ja C normaalelemendi elektromotoorsele jõule vastavasse asendisse, s. o. 1,01865 V, ja reguleerime reostaadi R abil töövoolu nii, et galvanomeetri ahelas puudub vool. See tähendab, et kontaktide A ja C vaheline pinge on 1,01865 V ja igale astmele vastab 0,1 V. Pärast töövoolu reguleerimist võime asuda tundmatu emj kompenseerimisele. Selleks lülitame ahelasse U_x ning liigutame kontakte A ja C, kuni galvanomeeter enam voolu ei näita. Joonisel 90 on kompensaator kujutatud lugemil 0,249 V. Mõõtmiste vältel tuleb aeg-ajalt kontrollida töövoolu õigsust normaalelemendi abil.

Mõõtmiste täpsus sõltub normaalelemendi ja takistite täpsusest ning galvanomeetri tundlikkusest.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Mida mõeldakse elemendi elektromotoorse jõu all ning missugustes ühikutes seda mõõdetakse?
2. Defineerida mõisted: potentsiaal, pinge, volt.
3. Mille poolest erineb volt- ja ampermeetri ehitus galvanomeetri ehitusest?
4. Sõnastada Kirchhoffi seadused haruvoolude kohta.
5. Missugused on emj mõõtühikud cgse- ja mksA-süsteemis?
6. Kuidas saab vähendada pingelangust, mis on tingitud elemendi sisetakistusest?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 37 ja 43.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VI, § 9 ja ptk. VII, § 4.

78. JOULE-LENZ'I SOOJUSVALEMI KOEFITSIENDI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Joule-Lenz'i soojusvalemi tuletamine. Joule-Lenz'i soojusvalemi koefitsiendi määramine.

2. Töövahendid

Kalorimeeter, termomeeter, sekundomeeter, ampermeeter, voltmeeter ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

a) Kui elektrihulk q läbib potentsiaalide vahe U, siis tehtud töö $A = qU$. See töö mõõtub džaulides, kui q on mõõdetud kulonites ja U voltides. Et $q = It$, siis voolu töö

$$A = UIt, \tag{1}$$

ja voolu võimsus vattides

$$N = \frac{A}{t} = UI, \tag{2}$$

kui voolutugevus I on mõõdetud amprites.

Džaulides mõõdetud tööhulga (A) väljendamiseks kalorites (Q) peame valemi (1) mõlemad pooled korrutama töö termilise ekvivalendiga c $\left(\frac{\text{cal}}{\text{J}}\right)$, mis näitab, mitme kaloriga on ekvivalentne 1 džaul tööd. Seega

$$Q = cA = cUIt. \tag{3}$$

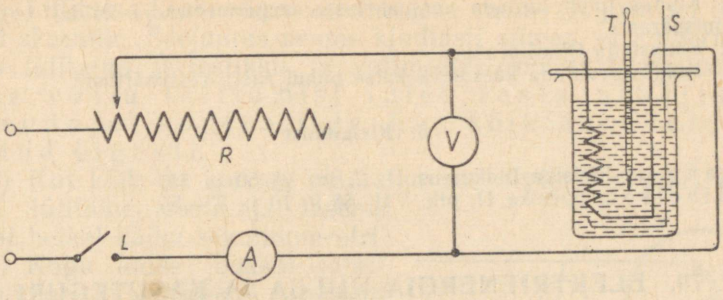
Arvutame esiteks c väärtuse soojuse mehaanilise ekvivalendi põhjal. Nagu teame, 1 kGm = 9,8 J. Siit:

$$\underline{1\ \text{J}} = \frac{1}{9{,}8}\,\text{kGm} = \frac{1}{9{,}8 \cdot 427}\,\text{kcal} = \frac{1000}{9{,}8 \cdot 427}\,\text{cal} = \underline{0{,}239\ \text{cal}}.$$

Nüüd määrame c suuruse otseselt katsest, mille skeem on esitatud joonisel 91.

Selleks juhime juhtmes tekkinud soojuse vette (kalorimeetrisse) ja arvutame 1 džauli kohta tuleva soojushulga.

b) Täidame kalorimeetri destilleeritud veega, jättes umbes 1 cm korgist puudu. (Miks?) Kalorimeetri vee algtemperatuur olgu paari kraadi võrra toatemperatuurist madalam, lõpptemperatuur aga sellest niisama palju kõrgem. Lülitame kalorimeetri soojenduskeha vooluahelasse, millesse on lülitatud ka reostaat, ampermeeter (järjestikku!) ja voltmeeter (rööbiti!). Katse kestel vett kalorimeetris hoolega segada! Märgime iga poole minuti järel



Joon. 91. Lülitusskeem Joule-Lenz'i soojusvalemi koefitsiendi määramiseks.

pinge ja voolutugevuse ning registreerime katse alg- ja lõppmomendi. Veehulga kalorimeetris määrame katse lõpul mensuuri abil.

Vaatlus- ja arvutustulemused paigutame tabelisse järgmiselt:

Vaatluse nr.	Võrdsete aegade järel võetud lugemid	
	U volti	I amprit
1		
2		
...		
Keskmine:		

Vee mass kalorimeetris $M = \ldots$
„ algtemperatuur ..... $\tau_1 = \ldots$
„ lõpptemperatuur ..... $\tau_2 = \ldots$
„ temperatuuri tõus $\tau_2 - \tau_1 = \ldots$
Katse algmoment ..... $t_1 = \ldots$
„ lõppmoment ..... $t_2 = \ldots$
„ kestus ..... $t_2 - t_1 = \ldots$

Saadud andmeist arvutame c. Eeldades, et juhtme soojenemisel tekkinud soojus kulub täielikult vee temperatuuri tõstmiseks kalorimeetris, saame võrrandi:

$$\underbrace{cUI(t_2 - t_1)}_{\text{Juhtmes } (t_2 - t_1) \text{ sekundis vabanenud soojushulk}} = \underbrace{M(\tau_2 - \tau_1)}_{\text{Kalorimeetri vette } (t_2 - t_1) \text{ sekundis üle läinud soojushulk}},$$

millest

$$c = \frac{M(\tau_2 - \tau_1)}{(t_2 - t_1)UI} = \ldots \qquad (4)$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Defineerida mõisted: võimsus, vatt, kilovatt, hobujõud.
2. Arvutada seos hobujõu ja vati vahel.
3. Kuidas määratakse elektrivoolu võimsust ja tööd?

4. Kuidas tuleb lülitada vooluahelasse ampermeeter ja kuidas voltmeeter ning mispärast?
5. Sõnastada Ohmi seadus.
6. Kuidas arvutada käesoleva katse puhul riista vesiväärtust?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 50 ja 51.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VII, §§ 9, 10 ja 53—55.

79. ELEKTRIENERGIA HULGA JA KASUTEGURI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Määrata vee soojendamisel elektrikeetjaga:
a) kogu äratarvitatud elektrienergia hulk;
b) keedunõus oleva vee temperatuuri tõstmiseks kulunud elektrienergia hulk (kasulik töö);
c) vee soojendamiseks kulunud elektrienergia hulga ja kogu äratarvitatud elektrienergia hulga suhe protsentides, s. o. kasutegur.

2. Töövahendid

Elektrikeetja, ampermeeter, voltmeeter, mensuur, vajalikud juhtmed, termomeeter ja sekundomeeter.

3. Töö käik

a) Kogu äratarvitatud elektrienergia hulga määramisel lähtume töö valemist (vt. § 78)

$$A = Nt = UIt, \qquad (1)$$

mille järgi t sekundi jooksul äratarvitatud elektrienergia hulk džaulides võrdub pinge (U volti), voolutugevuse (I amprit) ja aja (t sekundit) korrutisega. Sama elektrienergia hulk kalorites väljendub valemiga

$$Q = cA = cUIt, \qquad (2)$$

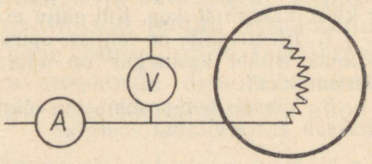
kus koefitsient $c = 0{,}24\ \frac{\text{cal}}{\text{J}}$. Mõõtes katseliselt U, I ja t, arvutame valemist (2) Q suuruse kalorites.
b) Töö teostame järgmiselt:
1) Mõõdame mensuuriga keedunõusse 600—1000 cm^3 vett (kraanist).

2) Lülitame keedunõu vooluahelasse vastavalt joonisel 92 esitatud skeemile. Seejuures peame kindlasti silmas, et ampermeeter oleks lülitatud järjestikku ja voltmeeter rööbiti (paralleelselt). Enne voolu lülitamist tuleb lasta praktikumi juhendajal kontrollida, kas kõik ühendused on tehtud õigesti.

3) Kui kõik on korras, määrame vee algtemperatuuri keedunõus, lülitame voolu ja laseme samal hetkel käiku sekundomeetri.

4) Kogu katse jooksul jälgime amper- ja voltmeetri lugemeid ning registreerime nad iga minuti järel.

5) Katset jätkame seni, kuni vee temperatuur keetjas tõuseb 80—95 kraadini, kogu katse kestel vett korralikult segades. Siis katkestame voolu, registreerime sekundomeetri lugemi ja temperatuuri keetjas.



Joon. 92. Lülitusskeem.

c) Vaatlus- ja arvutustulemused märgime tabelisse järgmiselt:

					Keskmine:
Pinge U volti	. . .	. . .	. . .	. . .	. . . volti
Voolutugevus I amprit	. . .	. . .	. . .	. . .	. . . amprit

Vee soojendamise aeg $t =$ ... min = ... s.
Kogu äratarvitatud elektrienergia

$$Q = cUIt = \ldots . \text{ cal.}$$

Vee hulk keetjas $M =$ ... g
„ algtemperatuur $\tau_1 =$ ... °C
„ lõpptemperatuur $\tau_2 =$ ... °C
„ temperatuuri tõus $\tau_2 - \tau_1 =$ ... °C

Vee soojendamiseks kulunud elektrienergia

$$q = M(\tau_2 - \tau_1) = \ldots . \text{ cal.}$$

Kasutegur

$$\eta = \frac{q \cdot 100}{Q} = \frac{M(\tau_2 - \tau_1) \cdot 100}{cUIt} = \ldots \%.$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Defineerida mõisted: amper, ampersekund, ampertund.
2. Missuguste mõistetega on üheväärsed mõisted ampersekund ja vattsekund?
3. Missugune on kasuteguri η dimensioon? Kuidas see nähtub viimasest valemist?
4. Miks on elektrikeetja kasutegur väiksem kui 100%?
5. Miks on elektrikeedunõude välispind läikiv?
6. Arvutada kirjeldatud katse puhul äratarvitatud elektrienergia hind, kui 1 kWh maksab 40 kop. Kui palju maksaks selle tariifi järgi 1 kGm energiat?
7. Elektripliite on lahtiste spiraalidega ja plaatidega (kinniste spiraalidega). Kumma tüübi kasutegur on suurem? Mis on lahtise spiraaliga elektripliidi paremuseks?
8. Vibratsioon-pesumasin võimsusega 100 W töötas 2 tundi. Kui palju maksab äratarvitatud energia?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 51 ja 52.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VII, §§ 9 ja 10.

80. VASE ELEKTROKEEMILISE EKVIVALENDI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Elektrolüütilise dissotsiatsiooni ja elektrokeemilise ekvivalendi mõistega tutvumine. Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine.

2. Töövahendid

Ampermeeter, reostaat, vaskelektroodid, anum vasevitriolilahusega (voltameeter), sekundomeeter ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

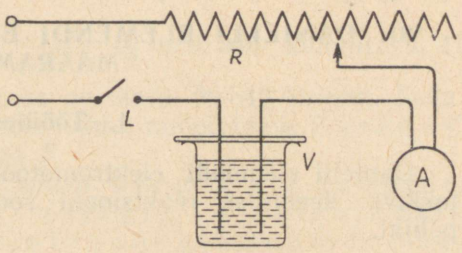
3. Töö käik

a) Elektri juhtimine toimub kahel teineteisest teravasti erineval viisil: metalliliselt (juhtivusvool) ja elektrolüütiliselt (konvektsioonvool). Esimesel juhul ei toimu juhi aines (vask, raud, alumiinium jt.) elektri läbivoolamisel mingisuguseid keemilisi muutusi. Sellesse rühma kuulub elektri voolamine metallides. Teisel juhul on elektri voolamine juhis seotud eriliste keemiliste protsessidega. Siia kuulub elektri voolamine nn. elektrolüütides, milledeks on soolade, hapete ja aluste lahused, näiteks vasevitrioli ($CuSO_4$) või keedusoola (NaCl) lahus vees.
Elektrolüüdis on lahustunud aine, näiteks $CuSO_4$, erilises nn. dissotsieerunud olekus: osa selle aine molekulidest on lahuses jagunenud kaheks osaks (Cu ja SO_4), nn. iooniideks, mis kannavad vastasmärgilisi elektrilaenguid, nimelt metall (Cu) positiivset ja ülejäänud osa (SO_4) negatiivset laengut. Kui sellisesse lahusesse asetada vooluallikaga ühendatud elektroodid,

siis hakkavad positiivselt laetud ioonid lahuses tekkinud elektrivälja mõjul liikuma miinuselektroodi (katoodi) poole ja negatiivselt laetud ioonid plusselektroodi (anoodi) poole. Seega on elektrivool antud juhul seotud juhtme aineosakeste liikumisega, mis ongi elektrolüütilise elektrijuhtivuse üks olulisi erinevusi metallilise elektrijuhtivusega võrreldes.

Katoodiga kokku puutuvad positiivselt laetud vase ioonid (katioonid) annavad katoodile oma elektrilaengu ja sadestuvad temale vase aatomitena. Anoodile jõudnud negatiivselt laetud SO_4 ioonid (anioonid) tõmbavad anoodist välja vase ioonid, mille tagajärjel tekivad uuesti $CuSO_4$ molekulid, mis omakorda dissotsieeruvad vees. Seega toimub ioonide kaudu nagu vase ülekandumine anoodilt katoodile.

b) Elektrivoolu mõjul lahusest eraldunud ainehulk oleneb läbivoolanud elektrihulgast ja on sellega võrdeline (Faraday I seadus). 1 kuloni (1 amper 1 sekundi jooksul) toimel elektrolüüdist eraldunud ainehulka nimetatakse selle aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks. Nii on vase elektrokeemiline ekvivalent grammides või milligrammides mõõdetud vasehulk, mis eraldub katoodil $CuSO_4$-lahusest 1 kuloni (C) elektri läbivoolamisel.



Joon. 93. Lülitusskeem vase elektrokeemilise ekvivalendi määramiseks.

Ainete elektrokeemiliste ekvivalentide teadmine on tähtis, sest nende põhjal saame ühelt poolt arvutada eraldunud ainehulga, kui on teada lahusest läbi voolanud elektrihulk, kuid teiselt poolt, mis veel tähtsam, saame elektroodidel eraldunud ainehulga põhjal määrata läbivoolanud elektrihulga.

Olgu katoodil eraldunud vasehulk m g, voolutugevus I amprit, voolu kestus t sekundit ja vase elektrokeemiline ekvivalent k g/C. Siis eelöeldu põhjal

$$m = kIt,$$

millest

$$k = \frac{m}{It}.$$

Saadud valemist järeldub otseselt vase elektrokeemilise ekvivalendi määramise viis.

c) Võtame vaskelektroodid, puhastame nad peenikese liivapaberiga ja kaalume katoodi analüütilistel kaaludel. Olgu katoodi mass m_1. Asetame elektroodid voltameetrisse $CuSO_4$-lahusega ja moodustame vooluahela voltameetrist, lülitist, reostaadist, ampermeetrist (järjestikku!) ja vooluallikast. Nüüd lülitame elektroodid voolu-

ahelasse, hoiame reostaadi abil voolutugevuse I konstantsena ja laseme voolu läbi voltameetri t sekundi jooksul (umbes 15—20 minutit). Enne uuesti kaalumist loputame katoodi puhta veega, siis niisutame piiritusega ja kuivatame piiritust põlema süüdates. Olgu katoodi mass uuel kaalumisel m_2. Siis katoodil eraldunud vasehulk $m = m_2 - m_1$. Saadud I, t ja m väärtustest arvutame elektrokeemilise ekvivalendi k. Voolutugevuse I kõikumise puhul tuleb registreerida voolutugevuse väärtused iga 3 minuti tagant ja võtta neist aritmeetiline keskmine.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Missugust laengut kannavad metalli ja vesiniku ioonid?
2. Mispärast ei olene aine elektrokeemiline ekvivalent temperatuurist ega lahuse kontsentratsioonist?
3. Mille poolest erinevad gaasi ioonid elektrolüüdi ioonidest?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 58—64.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VIII, §§ 1—3.

81. DANIELLI ELEMENDI ELEKTROMOTOORSE JÕU MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine elemendis tekkiva keemilise reaktsiooni soojusefekti (reaktsioonisoojuse) põhjal.

2. Töövahendid

200—300 mg keemiliselt puhast tsinki, 100—200 cm^3 $CuSO_4$ küllastatud lahust, termospudel, termomeeter 0,1° C jaotistega, keeduklaas, lehter, filterpaberit, analüütilised kaalud vihtidega, liivapaberit ja vatti.

3. Töö põhimõte ja teooria

Elektrivoolu läbiminekul elektrolüüt laguneb, kusjuures keemilise ühendi lagundamiseks vajaliku energia annab elektrivool. Faraday leidis, et elektrolüüsi puhul elektroodidel eralduv ainehulk m on võrdeline elektrolüüti läbiva elektrihulgaga Q. Et elektrihulk Q on võrdne voolu tugevuse ja kestuse korrutisega: $Q = It$, siis

$$m = kIt, \qquad (1)$$

kus k on võrdetegur. Kui $I = 1$ ja $t = 1$, siis

$$m = k,$$

s. o. k on ainehulk, mille eraldab elektroodidel 1 kulon elektrit. See on aine elektrokeemiline ekvivalent. Üldiselt on iga aine elektrokeemiline ekvivalent erineva suurusega.

Edasi avastas Faraday, et k on võrdeline aine keemilise ekvivalendiga $\frac{A}{n}$, kus A on gramm-molekuli (gramm-aatomi) mass ja n valents; seega võime valemi (1) kirjutada järgmiselt:

$$m = c\,\frac{A}{n}\,It, \qquad (2)$$

kus c on juba kõigile ainetele ühine konstant.

Kui m on mõõdetud grammides, I amprites ja t sekundites, siis $c = 1{,}036 \cdot 10^{-5}\,\frac{\text{gr.-ekv.}}{\text{C}}$ ja seega

$$m = 1{,}036 \cdot 10^{-5}\,\frac{A}{n}\,Q,$$

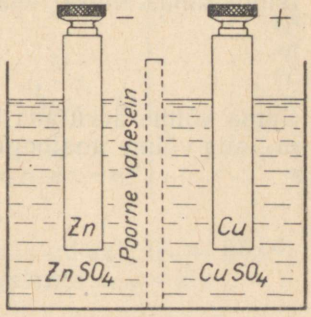
kus $Q = It$, s. o. läbivoolanud elektrihulk kulonites.

Sellest võrrandist järeldub, et kui elektroodidel eraldunud ainehulk m on võrdne 1 gramm-ekvivalendiga, s. o. $m = \frac{A}{n}$ g, siis läbivoolanud elektrihulk $Q = \frac{1}{1{,}036 \cdot 10^{-5}} = 96\,540$ kulonit, s. t. 1 gramm-ekvivalendi eraldamiseks on tarvis 96 540 kulonit. Seda arvu, mis on kehtiv kõikide ainete kohta, nimetatakse Faraday arvuks ja tähistatakse tähega F.

Nagu eespool tähendatud, annab keemiliste tungide ületamiseks vajaliku energia elektrolüüsil elektrivoolu allikas. Galvaani elementides toimub ümberpöördud protsess: keemilise reaktsiooni energia arvel tekib elektrivoolu energia. Seega on elementides toimuva keemilise reaktsiooni soojusefekti põhjal võimalik arvutada elemendi elektromotoorset jõudu. Kasutades termodünaamika 1. põhilauset, arvutas W. Thomson sel teel mõnede elementide elektromotoorsed jõud.

Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine Thomsoni järgi. Danielli elemendi skeem on esitatud joonisel 94.

Poorse vaheseina ülesandeks on takistada $CuSO_4$ otsest kokkupuutumist tsingiga. Kui $CuSO_4$ puutuks tsingiga otseselt kokku, siis me ei saaks Danielli elemendist elektrienergiat, vaid see muunduks soojusenergiaks, nagu see toimub käesolevas töös.



Joon. 94. Danielli elemendi skeem.

Danielli elemendis kulgeb järgmine keemiline protsess:

$$CuSO_4 + Zn \rightarrow ZnSO_4 + Cu + q, \qquad (3)$$

kus q tähendab selle reaktsiooni puhul vabanevat soojushulka. Olgu q soojushulk, mis vabaneb n gramm-ekvivalendi (ühe gramm-aatomi) vase asendumisel tsingiga $CuSO_4$-s. Sellise vasehulga sadestamiseks läheb vaja nF kulonit elektrit. Et galvaani elemendist, mille elektromotoorne jõud on E, voolaks läbi nF kulonit elektrit, on tarvis teha nFE volt-kulonit $= nFE$ džauli tööd (volt-kulon = džaul).

Elemendis toimub see töö reaktsiooni energia arvel ja peab seega võrduma reaktsioonisoojusega, mistõttu

$$nFE = \frac{q}{0{,}239}. \qquad (4)$$

Reaktsioonisoojuseks (q) nimetatakse soojushulka, mis eraldub ühe gramm-molekuli (gramm-aatomi) aine reageerimisel.

Jagades kogu võrrandi nF-ga, saame:

$$E = \frac{q}{0{,}239nF}. \qquad (5)$$

Elemendi elektromotoorne jõud võrdub seega soojushulgaga, mis vabaneb $\frac{A_{Zn}}{n_{Zn}F}$ grammi tsingi lahustumisel või $\frac{A_{Cu}}{n_{Cu}F}$ grammi vase sadestumisel.

Et võrrandist (5) arvutada E, peame katseliselt määrama q. Kui lahustame m_1 grammi, s. o. $\frac{m_1}{A_{Zn}}$ gramm-aatomit tsinki ja kui seejuures vabaneb q_1 kalorit soojust, siis ühe gramm-aatomi tsingi lahustamisel vabaneb soojust

$$q = \frac{q_1}{m_1} A_{Zn} \text{ cal}. \qquad (6)$$

Sama võime arvutada ka sadestuva vase hulga järgi. Kui see on m_2, siis võime analoogiliselt kirjutada:

$$q = \frac{q_1}{m_2} A_{Cu} \text{ cal}. \qquad (6a)$$

4. Töö käik

Kalorimeetrisse (termospudelisse) valatakse $CuSO_4$-lahus, mille hulk on määratud mõõtklaasi abil või kaalumise teel, ja mõõdetakse lahuse algtemperatuur.

Lahust tuleb võtta 100 cm^3 ning metallilist tsinki 120—150 mg. Tsink peab olema puhas (oksüüdita). Kui kasutatav tsink esineb õhukese plekina, tuleb pleki pind liivapaberiga puhtaks hõõruda. Kui kasutatakse pulgakujulist tsinki, siis tuleb pulga ots puhtaks viilida ja edasi koguda puhast viilipuru paberile. Kui reaktsioonianumasse panna suuri tsingitükke, siis kulgeb lahustumisreaktsioon pikka aega, mis on seotud suurema soojuskaoga, ja selle tagajärjeks on ebatäpne tulemus.

Puhas tsink kaalutakse analüütilistel kaaludel (kaalumise tulemused korralikult protokollida!) ja puistatakse kalorimeetrisse. Seejuures jälgitakse, et osa tsingipuru ei jääks kalorimeetri märjale seinale kleepuma. Anum kaetakse vatiga, millest on läbi pistetud termomeeter ja segaja.

Nüüd oodatakse, kuni Zn on lahustunud, mille tunnuseks on see, et temperatuur enam ei tõuse. Lõpptemperatuur loetakse ja arvutatakse tekkinud soojushulk q_1, võttes lahuse erisoojuse võrdseks vee erisoojusega (1).

Reaktsioonisoojus q arvutatakse valemite (6) ja (6a) põhjal nii lahustunud tsingi kui ka sadestunud vase hulga järgi. Mõlemal juhul saadakse katsevigade piires muidugi võrdsed tulemused.

Sadestunud Cu kaalu leidmiseks

a) küsida praktikumi juhendajalt filterpaber ja kaaluda see analüütilistel kaaludel. Kaalumisandmed protokollida;

b) pärast seda, kui temperatuur on saavutanud maksimumi, filtreerida kalorimeetri sisu. Filterpaber hoolikalt pesta destilleeritud veega, et filtrisse ei jääks vitrioli. Filterpaber koos sellele jäänud vasega kuivatada ning kaaluda analüütilistel kaaludel.

Mõõtmisandmete ülesmärkimiseks ja arvutamiseks kasutada järgmist skeemi:

Jrk. nr.	Suuruse nimetus	Tähis	Arvuline suurus ja ühik
1	Zn kaal	m_1	. . . . . g
2	$CuSO_4$-lahuse hulk termospudelis	m	. . . . . g
3	„ „ algtemperatuur	t_1	. . . . . °C
4	„ „ lõpptemperatuur	t_2	. . . . . °C
5	„ „ temperatuuri tõus	$t_2 - t_1$	. . . . . °C
6	Tekkinud soojushulk	$q_1 = m(t_2 - t_1)$	. . . . . cal
7	Filterpaberi + Cu kaal	m'	. . . . . g
8	Filterpaberi kaal	m''	. . . . . g
9	Cu kaal	$m_2 = m' - m''$	. . . . . g

Zn aatomkaal $A_{Zn} = 65{,}4$. Cu aatomkaal $A_{Cu} = 63{,}54$.
Zn valents $n_{Zn} = 2$. Cu valents $n_{Cu} = 2$.
Reaktsioonisoojus tsingi hulga alusel:

$$q' = \frac{q_1}{m_1} A_{Zn} = \ldots\ldots \text{ cal.}$$

Vastav emj: $E' = \frac{q'}{0{,}239 n_{Zn} F} = \ldots\ldots$ V.

Reaktsioonisoojus vase hulga alusel:

$$q'' = \frac{q_1}{m_2} A_{Cu} = \ldots\ldots \text{ cal.}$$

Vastav emj: $E'' = \frac{q''}{0{,}239 n_{Cu} F} = \ldots\ldots$ V.

Keskmine emj: $E = \frac{E' + E''}{2} = \ldots\ldots$ V.

5. Täiendavaid küsimusi

1. Kas võib olla mõnekümnevoldise elektromotoorse jõuga elemente?
2. Kuidas arvutada elektrolüüsiks vajalikku minimaalset pinget?
3. Kas leiab rakendust asjaolu, et iga ioon hakkab sadestuma alles kindla minimaalse pinge juures?

6. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 65—67.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VI, § 9.

82. TANGENSGALVANOMEETRI TAANDUSTEGURI MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Galvanomeetri teooriaga tutvumine ja tema taandusteguri määramine.

2. Töövahendid

Tangensgalvanomeeter, vase-kulonomeeter, reostaat, kommutaator, akumulaator, ühendusjuhtmed, ajanäitaja, analüütilised kaalud ja vihid.

3. Riista ehitus ja teooria

Tangensgalvanomeeter (joon. 95) koosneb 1—10 ringikujulisest, suure läbimõõduga (tavaliselt kuni meeter) traadikeerust. Keerdude tsentris asub teravikul pöörduv lühike magnetinõel, millele on kinnitatud osuti pöördenurga lugemi võtmiseks. Keerdude tasapind on vertikaalne ja orienteeritakse keskel oleva noole järgi meridiaani tasapinda. Maa magnetiväli on seega rööbik keerdude tasapinnaga, milles asub ka magnetinõel. Kui keerde läbib elektrivool, siis tekib nende ümber magnetiväli, kusjuures keeru tsentris on see väli risti keeru tasapinnaga ja tema suurus on antud avaldisega:

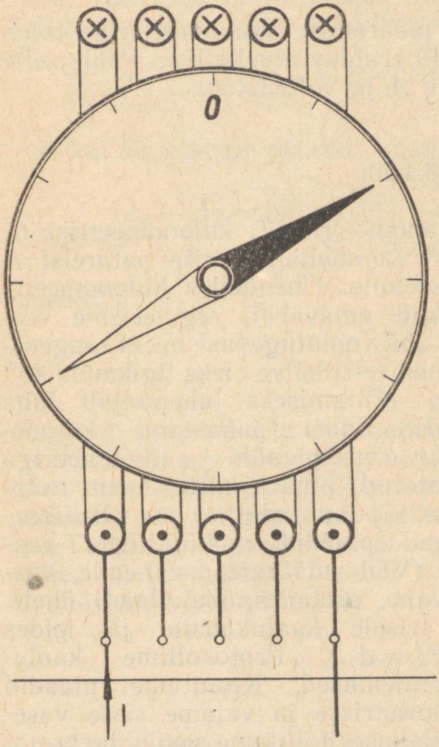
$$H_v = \frac{2\pi Iz}{cr_0}, \qquad (1)$$

kus I on voolutugevus absoluutsetes elektrostaatilistes ühikutes, r_0 keeru raadius, z keerdude arv ja $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Maa magnetiväli ja voolu magnetiväli liituvad vektoriaalselt: $\vec{H} = \vec{H_h} + \vec{H_v}$. $\vec{H_h}$ on siin Maa magnetivälja horisontaalkomponent, sest nõel saab pöörduda ainult horisontaaltasapinnas. Magnetinõel orienteerub selle liitvektori suunas. Ta pöördub seega nurga φ võrra, mis on võrdne nurgaga vektorite $\vec{H_h}$ ja $\vec{H}$ vahel. Joonise 96 alusel võime kirjutada:

$$\tan\varphi = \frac{H_v}{H_h} = \frac{2\pi Iz}{cr_0 H_h}. \qquad (2)$$

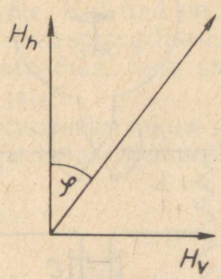
Selles valemis on kõik suurused peale voolutugevuse I ja pöördenurga φ konstandid. Kui lahendame võrrandi (2) voolutugevuse I suhtes, saame:

$$I = \frac{cr_0 H_h}{2\pi z} \tan\varphi = I_0 \tan\varphi. \qquad (3)$$



Joon. 95. Tangensgalvanomeeter.

Siit näeme, et voolutugevus galvanomeetri keerdudes on võrdeline magnetinõela pöördenurga tangensiga, millest tulenebki nimetus «tangensgalvanomeeter». I_0 on tangensgalvanomeetri taandustegur ja tähendab voolutugevust juhul, kui $\tan\varphi = 1$, s. t. $\varphi = 45°$. Kui taandustegur on teada, siis saab mõõdetud pöördenurga järgi määrata voolutugevuse.



Joon. 96. Magnetiväljade liitumine tangensgalvanomeetris.

Taandusteguri I_0 määramiseks tuleb mingi tuntud voolutugevuse I_1 korral määrata pöördenurk φ_1. Siis saab I_0 võrrandist (3) arvutada.

Selleks tekitame konstantse pingega allika abil konstantse voolu läbi galvanomeetri ahela. Voolutugevuse määramiseks lülitame galvanomeetri ahelasse kulonomeetri. Kulonomeetri elektroodil eralduva ainehulga m määrab Faraday I elektrolüüsiseadus

$$m = kQ = kIt. \tag{4}$$

Faraday II elektrolüüsiseaduse alusel võime kirjutada:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}, \tag{5}$$

kus k on elektrokeemiline ekvivalent, A iooni molekulkaal, n iooni valents ja $F = 96\,500$ C/gramm-ekvivalent — Faraday arv.

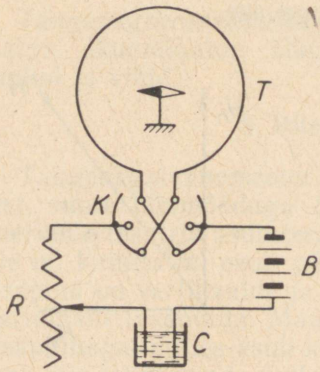
Lahendades võrrandi (4) voolutugevuse I suhtes ja paigutades tulemusse k võrrandist (5), saame:

$$I = \frac{m}{kt} = \frac{mnF}{At}. \tag{6}$$

Siit näeme, et voolutugevuse määramisel kulonomeetriga tuleb mõõta voolu kestus t ja elektroodil eralduv ainehulk m. Peale selle peame teadma aine molekulkaalu A ja valentsi n.

4. Töö käik

Koostame ahela tangensgalvanomeetrist T, kulonomeetrist C, reostaadist R, kommutaatorist K ja akumulaatorite patareist B vastavalt joonisel 97 toodud skeemile. Ühendades kulonomeetri kontaktid omavahel, reguleerime reostaadi abil voolutugevuse nii, et tangensgalvanomeetri hälve oleks ligikaudu 45°. (Voolu lülitamiseks juhendajalt luba küsida!) Edasi puhastame kulonomeetri vaskplaadid liivapaberiga (puhastatud pindu mitte enam näppudega puudutada!) ja kaalume mõlemad plaadid analüütilistel kaaludel. (Võib määrata ka nende kaalude vahe, asetades ühe plaadi ühele, teise teisele kaalukausile ja leides $P_1 - P_2 = \Delta_1$.) Protokollime kaalumise tulemused. Kinnitame plaadid kulonomeetrisse ja valame sisse vasevitriolilahuse. Lülitame voolu ja protokollime voolu lülitamise momendi.



Joon. 97. Tangensgalvanomeetri lülitusskeem.

Kui osuti võnkumine vaibub, võtame lugemi. Iga kahe minuti tagant kommuteerime voolu kiiresti kommutaatoriga. Seejuures muutub voolu suund galvanomeetris, kulonomeetris aga peab ta endiseks jääma. Igal kommuteerimisel võtame nurga lugemi ja protokollime selle. Voolu kestus peab olema vähemalt 20 min. Kui hälve muutub väiksemaks (aku pinge vähenemise tõttu), siis peame arvutama tangensite aritmeetilise keskmise.

Katse lõpetamisel lülitame voolu välja ja protokollime voolu kestuse. Võtame ühendused lahti. Plaadid peseme algul kraaniveega (plaatide pindu mitte hõõruda!). Loputame nad piiritusega üle ja süütame plaadile jäänud piirituse; plaat soojeneb seejuures ja kuivab kiiresti. Seejärel kaalume plaadid (leiame nende kaalud P_1' ja P_2' või otseselt nende kaalude vahe $P_1' - P_2' = \Delta_2$).

Vase-kulonomeetris toimuva protsessi

Anoodil:	Katoodil:
$Cu + SO_4^{--} \rightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}$	$Cu^{++} + 2\,e^- \rightarrow Cu$

tõttu kandub vask anoodilt katoodile. Seega nii palju kui katoodi kaal suureneb, peab anoodi kaal vähenema. Kui esimene plaat oli katoodiks ja teine anoodiks, siis

$$m = P_1' - P_1 = P_2 - P_2',$$

või kui määrasime plaatide kaalude vahed, siis

$$\Delta_2 - \Delta_1 = (P_1' - P_2') - (P_1 - P_2) = (P_1' - P_1) + (P_2 - P_2') = 2m,$$

millest

$$m = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2}.$$

Seejuures peame silmas pidama Δ_1 ja Δ_2 märke. Kui nad on ühemärgilised, siis tuleb võtta nende vahe, kui vastasmärgilised, siis nad liita. Kumb plaat oli anoodiks, kumb katoodiks, seda saame määrata kas lülitusskeemi või kaalumuutuse järgi.

Tangensgalvanomeetri taandusteguri arvutamiseks saame avaldise, kui lahendame võrrandi (3) I_0 suhtes ja paigutame sellesse I väärtuse võrrandist (6):

$$I_0 = \frac{I}{\tan\varphi} = \frac{mnF}{At\tan\varphi}.$$

Analüütilise kaalumise protokollimine toimub tavalise skeemi kohaselt.

Vaatlustulemused märgime tabelisse järgmiselt:

Jrk. nr.	Aeg	par.	vas.
1	$14^h 23^m$	. . . . .	. . . . .
2	$14^h 25^m$	. . . . .	. . . . .
.	.		
.	.		
.	.		

83. PÖÖRDPOOLGALVANOMEETRI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

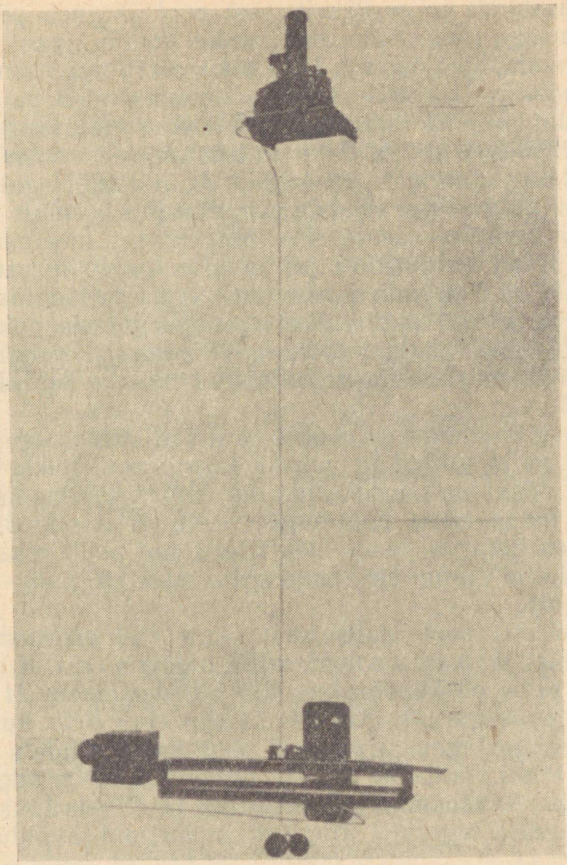
Pöördpoolgalvanomeetri ehitusega tutvumine. Pöördpoolgalvanomeetri tähtsamate karakteristikute määramine.

2. Töövahendid

Pöördpoolgalvanomeeter M 21-1 valgustusseadme ja skaalaga, voltmeeter 1,5 V, kaks takistusmagasini 1—11111 Ω, takistusmagasin 1—100 Ω, reostaat 1000 Ω, aku 1,4 V, ümberlüliteid ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö põhimõte ja teooria

Nõrkade elektrivoolude täpseks mõõtmiseks kasutatakse tänapäeval eranditult pöördpoolgalvanomeetreid peegelgalvanomeetritena. Pöördpoolgalvanomeeter erineb paragrahvis 71 kirjeldatud pöördpoolmõõteriistast peamiselt selle poolest, et pöörduv pool on riputatud õhukese metall-lindi või kvartsniidi otsa. Seega puuduvad galvanomeetril laagrid, milledes esinev hõõrdumine on üheks takistuseks teiste mõõteriistade tundlikkuse suurendamisele. Pooli lähedale lindi külge on kinnitatud peeglike, mida kasutatakse pooli pöördenurga määramiseks (vt. § 24). Osuti ja osutit tasakaalustavate koormiste puudumise tõttu on galvanomeetri liikuv süsteem eriti kerge, mis võimaldab kasutada peent rippelinti ja seega suurendada riista tundlikkust. Vool juhitakse pooli rippelindi kaudu. Teiseks juhtmeks on pooli alla kinnitatud õhuke kuld- või hõbelindike, mis ei tohi takistada pooli liikumist. Pooli hoiab nullseisus rippelindi elastsustung. Pool saab vabalt pöörduda kitsas pilus siis, kui pooli pöördetelg ühtub silindrilise pilu teljega. Galvanomeetri õigesse asendisse seadmiseks kasutatakse vesiloodi ja kolme reguleeritavat toetuskruvi. Kui vesiloodi mull on keskel, siis on ka galvanomeetri pool õiges asendis. Vesiloodita galvanomeetrite üles-



Joon. 98. Pöördpoolgalvanomeeter.

seadmisel tuleb saavutada olukord, kus pool liigub vabalt, hüpeteta. Transportimisel ja üldse siis, kui galvanomeetriga ei töötata, peab pöörduv süsteem olema kinnitatud erilise seadeldise — areteerija — abil. Areteerimata riista transportimisel võib rippelint kergesti vigastuda või isegi rebeneda. Enne tööle asumist tuleb galvanomeetri areteerija vabastada ja pärast töö lõppu sulgeda. Seda tuleb teha ettevaatlikult, sest areteerija tõuked kanduvad otseselt üle rippelindile. Praktikumis tuleb selleks pöörduda juhendava õppejõu või laborandi poole.

Rippelindi ülemine ots on kinnitatud pööratava nupu — nulli korrektori — külge, mille abil pöördpool seatakse enne töö algust õigesse asendisse nii, et pooli tasand on paralleelne magnetipooluste keskkohti ühendava sirgega. Ka seda nuppu tuleb pöörata

väga ettevaatlikult ja aeglaselt, sest pool järgneb pöördele teatava hilinemisega (pöördemoment kandub poolile rippelindi kaudu). Veidi pööranud, tuleb oodata, kuni pool võtab uue asendi, ja alles siis edasi pöörata. Ka selleks operatsiooniks tuleb paluda praktikumi juhendaja abi. Et vähendada juhuslike raputuste mõju, paigutatakse galvanomeeter mõõtmiste teostamiseks massiivse seina külge kinnitatud alusele — konsoolile. M 21-1 tüüpi galvanomeetri skaala koos valgustusseadmega kinnitatakse samale seinale ja hälvete määramiseks kasutatakse objektiivset meetodit. Valgusallikast väljunud valguskiire juhtimiseks galvanomeetri pöörduvale peeglile on galvanomeetri ees veel horisontaaltasandiga 45-kraadise nurga all olev väike tasandpeegel või prisma. Mõõtmiste teostamiseks peab vooluta galvanomeetri peeglilt peegeldunud valgusindeks olema reguleeritud skaala keskele ja hästi teravustatud.

Liikuvale galvanomeetri poolile mõjuvad mitmesugused tungid. Tasakaalust välja viidud ja vabaks lastud pool hakkab elastsustungi toimel võnkuma tasakaaluasendi ümber. Võnkumised sumbuvad esiteks mehaanilise hõõrdumise tõttu ja teiseks indutseerub magnetiväljas liikuvas poolis elektrivool, kui pooli otsad on omavahel ühendatud, ning see omakorda takistab pooli võnkumist (Lenz'i reegel).

Galvanomeetri pooli nullseisust välja viiv pöördemoment on tingitud mähist läbivast voolust, mille tugevus on i. Kui magnetivoo tihedus pilus on konstantne, siis pöördemoment M on võrdeline voolutugevusega: $M = Gi$. Võrdetegur $G = HSn$, kus H tähendab magnetivälja tugevust pilus, S pooli keeru pindala ja n keerdude arvu. Pooli nullseisu tagasi pöörav elastsustungi moment $M = -D\alpha$, kus α tähendab pöördenurka ja D keerdjäikust.

Summutavaist tegureist tingitud momendid avalduvad järgmiselt. Mehaanilise sumbuvuse moment $M_m = -h\frac{d\alpha}{dt}$, kus h tähendab hõõrdumiskoefitsienti ja $\frac{d\alpha}{dt}$ nurkkiirust. Indutseeritud voolust tingitud sumbuvuse moment $M_e = -Gi_i$. Indutseeritud voolu tugevus i_i on aga võrdne indutseeritud emj ja ahela takistuse jagatisega. Poolis liikumisel indutseeruv emj $e = G\frac{d\alpha}{dt}$. Ahela takistus koosneb galvanomeetri sisetakistusest R_g ja välistakistusest R_v. Seega

$$i_i = \frac{G}{R_g + R_v}\frac{d\alpha}{dt}$$

ja

$$M_e = -\frac{G^2}{R_g + R_v}\frac{d\alpha}{dt}.$$

Kõiki suurusi kokku võttes võime koostada galvanomeetri pooli

liikumise diferentsiaalvõrrandi järgmisel kujul:

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = Gi - D\alpha - h\frac{d\alpha}{dt} - \frac{G^2}{R_g + R_v}\frac{d\alpha}{dt},$$

kus I tähendab pöörduva süsteemi inertsimomenti.

Pärast liikmete ümberpaigutamist võime kirjutada:

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(h + \frac{G^2}{R_g + R_v}\right)\frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = Gi. \qquad (1)$$

Kui galvanomeetrit läbiva voolu tugevus i ei muutu, siis on avaldis Gi konstantne ega muuda pooli liikumise kuju. Pooli liikumine galvanomeetrit läbiva voolu poolt määratud uue tasakaaluasendi suhtes on täpselt samasugune nagu voolu puudumisel nullseisu suhtes. Seega võime kirjutada arvutuste lihtsustamiseks:

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(h + \frac{G^2}{R_g + R_v}\right)\frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \qquad (2)$$

See võrrand on analoogiline paragrahvis 53 esitatud võrrandiga (1). Tema lahendiks on seega

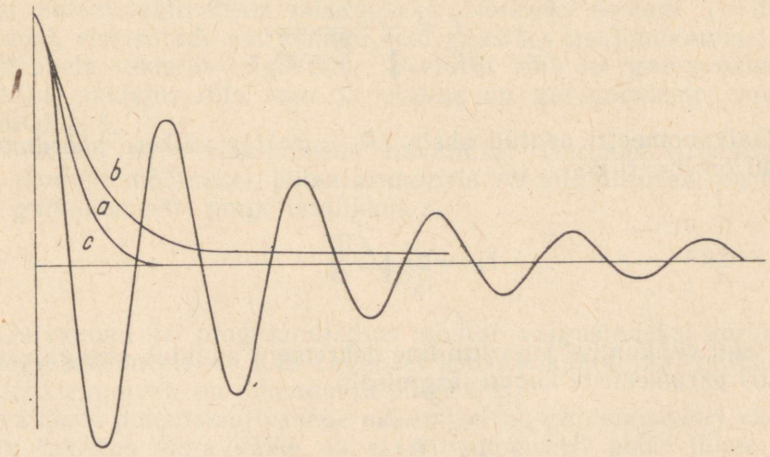
$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta t}\sqrt{\frac{\beta^2 + \omega^2}{\omega^2}}\sin\left(\omega t + \arctan\frac{\omega}{\beta}\right), \qquad (3)$$

kus käesoleval juhul

$$\beta = \frac{h + \frac{G^2}{R_g + R_v}}{2I} \text{ ja } \omega = \sqrt{\frac{D}{I} - \beta^2}.$$

Vaatleme galvanomeetri pooli pöördumise kolme erijuhtu.

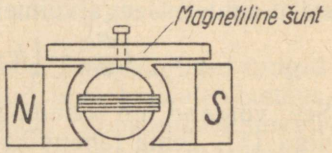
a) Kui $\frac{D}{I} - \beta^2 = 0$, s. o. $\omega = 0$, siis on võrrandis (3) hälvet määravaks ajast sõltuvaks suuruseks ainult $e^{-\beta t}$. See tähendab,



Joon. 99. Galvanomeetri pooli liikumine kolmel erineval režiimil.

et galvanomeetri pool liigub aperioodiliselt tasakaaluasendisse. Sellist galvanomeetri töörežiimi nimetatakse kriitiliseks. Kriitiline režiim on töötamiseks kõige otstarbekohasem, sest siis jõuab pool kõige lühema aja vältel tasakaaluasendisse (joon. 99, kõver *a*). Muude tingimuste konstantsuse korral võib seda režiimi saavutada välisahela takistuse R_v muutmise teel, sest sellest sõltub β väärtus. Välisahela takistust, mis vastab galvanomeetri kriitilisele režiimile, nimetatakse välisahela kriitiliseks takistuseks. Kogu ahela takistust $R_g + R_v$ kriitilisel režiimil nimetatakse täielikuks kriitiliseks takistuseks R_{kr}.

Sageli on galvanomeetrid varustatud magnetilise šundiga (joon. 100), mille abil saab muuta galvanomeetri pilus magnetivälja tugevust H. Viimase muutumisel muutub ka G ja seega galvanomeetri töörežiim. Sel viisil saab galvanomeetri kriitilist režiimi kohandada välisahela takistusele. Praktiliselt valitakse galvanomeetri välisahela takistus kriitilisest veidi suurem.



Joon. 100. Galvanomeetri magnetilise šundi skeem.

b) Kui $\frac{D}{I} < \beta^2$, s. o. kui galvanomeetri ahela kogutakistus on väiksem täielikust kriitilisest takistusest, siis liigub galvanomeetri pool samuti aperioodiliselt tasakaaluasendi poole, kuid aeglasemalt kui eelmisel juhul (joon. 99, kõver *b*). Niisugust galvanomeetri töörežiimi nimetatakse ülesummutatuks.

c) Kui $\frac{D}{I} > \beta^2$, siis on tegemist paragrahvis 53 käsitletud sumbuvate võnkumiste juhuga (joon. 99, kõver *c*). Võnkeperiood

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{I} - \beta^2}}. \qquad (4)$$

Galvanomeetri avatud ahela ($R_v = \infty$) ja väikese hõõrdumise puhul on $\beta = 0$ ja

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}. \qquad (5)$$

Pooli võnkumise logaritmiline dekrement avaldub siin galvanomeetri parameetrite kaudu järgmiselt:

$$\Lambda = \ln k = \frac{T}{2I}\left(h + \frac{G^2}{R_g + R_v}\right). \qquad (6)$$

Sumbuvussuhe $k = e^{\lambda}$ on määratav ühesuunaliste võnkeamplituudide suhtest:

$$k = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = \ldots = \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}, \tag{7}$$

kus $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$ tähendavad üksteisele järgnevaid maksimaalseid samasuunalisi hälbeid.

Galvanomeetri pooli tasakaaluasendi puhul $HSni = D\alpha$. Tähistades konstandi $\frac{D}{HSn}$, mida nimetatakse galvanomeetri voolukonstandiks, tähega C_i, võime kirjutada:

$$i = C_i\alpha. \tag{8}$$

Voolukonstant on arvuliselt võrdne voolutugevusega amprites, mille toimel pool pöördub ühe nurgaühiku võrra. Teda avaldatakse voolutugevuse kaudu, mis tekitab valgusindeksi hälbe 1 mm, kui galvanomeetri peegli kaugus skaalast on 1 m, ja mõõdetakse ühikutes $\frac{\text{A}}{\text{mm/m}}$. Voolukonstandi pöördväärtust nimetatakse galvanomeetri voolutundlikkuseks:

$$s_i = \frac{1}{C_i} = \frac{HSn}{D}. \tag{9}$$

Galvanomeetri voolutundlikkus mõõtub valgusindeksi kõrvalekaldega millimeetrites 1 m kaugusel asuval skaalal, kui galvanomeetrit läbib vool tugevusega 1 A. Seega on voolutundlikkuse mõõtühik $\frac{\text{mm}}{\text{A} \cdot \text{m}}$.

Peegelgalvanomeetrit võib kasutada nõrkade voolude ja väikeste potentsiaalivahede mõõtmiseks. Nõrkade voolude (näiteks fotovool, elektronide või ioonide vool gaasides jne.) mõõtmisel on mõõteahela takistus väga suur. Seetõttu võib ka galvanomeetri kriitiline takistus olla suur ja oluline on galvanomeetri voolutundlikkus s_i.

Väikeste potentsiaalivahede mõõtmisel (termoelektromotoorsete jõudude mõõtmisel, potentsiomeetris või sildlülituses) on oluline galvanomeetri pingetundlikkus s_u:

$$s_u = \frac{s_i}{R_g}.$$

Galvanomeetri pingetundlikkus mõõtub valgusindeksi kõrvalekaldega millimeetrites 1 m kaugusel asuval skaalal, kui galvanomeetri klemmidele on rakendatud pinge 1 V.

Väikeste potentsiaalivahede mõõtmisel on galvanomeetri välisahela takistus väga väike, ja et galvanomeetri pooli liikumine poleks täielikult summutatud, tuleb ahelasse lülitada lisatakisti,

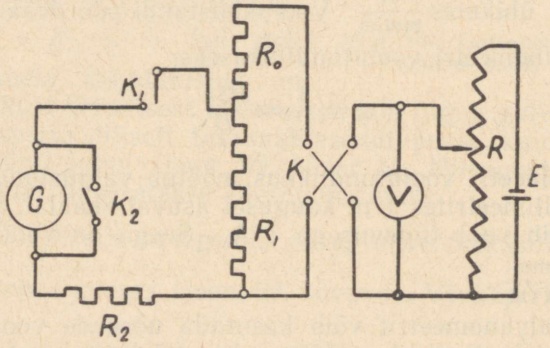
mis võrdsustab ahela takistuse kriitilise takistusega. Sel juhul avaldub pingetundlikkus järgmiselt:

$$s_u' = \frac{s_i}{R_g + R_v} = \frac{s_i}{R_{kr}}.$$

Galvanomeetri pingetundlikkus on seda väiksem, mida suurem on tema täielik kriitiline takistus. Nii osutub, et väga suure voolutundlikkusega galvanomeeter on vähetundlik potentsiaalivahede mõõtmisel oma suure kriitilise takistuse tõttu. Pingete mõõtmiseks kasutatavatel galvanomeetritel peab seega olema väike kriitiline takistus.

4. Töö käik

a) Galvanomeetrit läbiva voolu tugevuse ja galvanomeetri pingetundlikkuse mõõtmiseks teeme lülitused joonisel 101 esitatud skeemi kohaselt. Pärast lüli-



Joon. 101. Lülitusskeem galvanomeetri karakteristikute määramiseks.

tuste kontrollimist praktikumi juhendaja poolt valime takistusmagasinil R_1 takistuse umbes 5 Ω. Takisti R_0 peab olema umbes 10 000 Ω. Potentsiomeetri R abil reguleerime galvanomeetri mõõteahelasse antava pinge U suuruseks 0,1—0,5 V, avame lüliti K_2 ja suleme lüliti K_1.

Seejärel anname ümberlüliti K abil galvanomeetrile erineva suunaga pingeid, et saada võrdse suurusega hälbeid vasakule ja paremale. Selle saavutamiseks peab skaala olema paralleelne galvanomeetri peegli nullasendiga.

Galvanomeetrit läbiva voolu tugevus on

$$i_g = \frac{U\frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2}.$$

Muutes takistust R_2, s. t. töötades galvanomeetri mitmesuguste režiimidega, märgime galvanomeetri hälbed mitmesugustel voolutugevustel. Voolutugevust reguleerime pinge U muutmisega.

Mõõtmistulemuste põhjal koostame graafiku i_g ja α teljestikus. Kasutades galvanomeetri passist saadud sisetakistuse väärtust R_g, arvutame galvanomeetri voolutundlikkuse $s_i = \frac{m}{i_g l}$ ja voolukonstandi $C_i = \frac{i_g l}{m}$, kus m tähendab valgusindeksi kõrvalekallet nullasendist millimeetrites ja l skaala kaugust galvanomeetri peeglist meetrites. Edasi määrame s_u ja s_u'.

b) Galvanomeetri pooli omavõnkeperioodi T_0 määramiseks valime takistused R_1 ja R_2 nii, et saame skaalal küllalt suure (150—200 mm) hälbe. Pärast hälbe tekitamist avame lüliti K_1, mille tulemusel galvanomeetri pool hakkab võrdlemisi väikese sumbuvusega võnkuma nullseisu ümber. Perioodi määramiseks registreerime hulga loendatud täisvõngete aja sekundomeetriga ja arvutame T_0. Võngete loendamiseks on otstarbekas jälgida valgusindeksi läbiminekut nullseisust.

c) Galvanomeetri täieliku kriitilise takistuse määramine. Avades lüliti K_2 ja sulgedes lüliti K_1, veendume, missuguses režiimis liigub valgusindeks antud voolule vastavasse tasakaaluasendisse. Hälve peab seejuures olema küllalt suur (150—200 mm). Kui valgusindeks võngub tasakaaluseisu ümber, siis tuleb katseid korrata järk-järgult R_2 vähendades, kuni indeks hakkab liikuma aperioodiliselt. Takistuse $R_2 + R_g + R_1$ suurus, mille puhul galvanomeetri pool hakkab liikuma aperioodiliselt, ongi kriitiline takistus.

d) Logaritmilise dekremendi sõltuvuse määramine välisahela takistusest toimub samuti nagu kriitilise takistuse määramine, selle erinevusega, et siin tuleb registreerida üksteisele järgnevate ühesuunaliste hälvete maksimaalsed väärtused. Saadud andmeist arvutame logaritmilise dekremendi Λ. Katsed teostame R_2 väärtustel, mis vastavad 2-, 4-, 6-, 8- ja 10-kordsele kriitilisele takistusele. Saadud andmete põhjal joonestame graafiku välisahela takistuse ja logaritmilise dekremendi teljestikus.

84. HÕÕGLAMBI TUNNUSKÕVERA MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

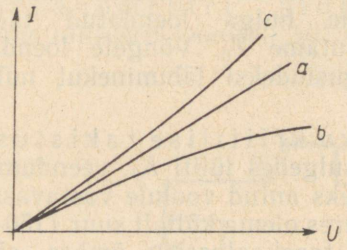
Tutvumine juhtme takistuse olenevusega temperatuurist. Süsi- ja metallniitlambi pinge ja voolutugevuse ning takistuse ja voolutugevuse graafiku joonestamine.

2. Töövahendid

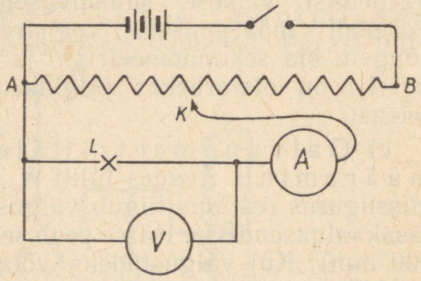
Uuritav süsi- ja metallniitlamp, volt- ja ampermeeter, potentsiomeeter, vooluallikas ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

a) Ohmi seaduse põhjal saame voolutugevuse I ja pinge U kaudu arvutada juhtme takistuse: $R = \frac{U}{I}$. Kui R on konstantne, siis on seos $I = \frac{U}{R}$ graafiliselt kujutatav U ja I teljestikus sirgena a (joon. 102). Tugevama voolu puhul aga juhe soojeneb ja juhtme takistus muutub. Siis kujutab vastavat olenevust graafikul kõverjoon. Kui takistus temperatuuri tõusmisel suureneb, siis on kõveral



Joon. 102. Voolutugevuse ja pinge olenevuse graafik.

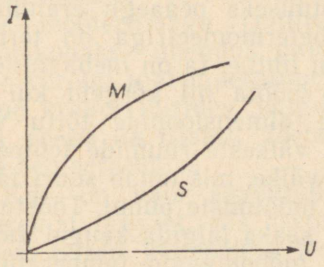


Joon. 103. Lülitusskeem hõõglambi tunnuskõvera määramiseks.

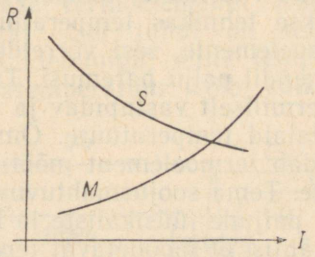
kumerus ülespoole, kui aga takistus väheneb, siis allapoole. Vastavaid olenevusi kujutavad joonisel 102 kõverad *b* ja *c*. Kirjeldatud seoseid voolutugevuse ja pinge vahel nimetatakse antud juhtme tunnuskõveraks ehk karakteristikuteks.

b) Hõõglambi tunnuskõvera määramiseks koostame katseseadme joonise 103 kohaselt. Muudetava pinge saamiseks kasutame potentsiomeetrilist lülitust. Selleks ühendame lükatreostaadi otsad A ja B vooluallikaga ning liugkontakti K ampermeetrisse A viiva juhtmega. Reostaadi valikul tuleb silmas pidada, et seda läbiva voolu tugevus ei ületaks 1—2 A ja et reostaat märgatavalt ei soojeneks. Punktide A ja B vahel valitseb vooluallika täispinge, millest hõõglampi L juhime ainult A ja K vahelise osapinge. Kui nihutame kontakti K punktist A punktini B, muutub A ja K vaheline pinge nullist vooluallika täispingeni. Pinge suuruse loeme voltmeetrilt V. Pinget muudame 5 või 10 voldi kaupa ja määrame iga kord vastava voolutugevuse. Mõõtmisi teostame esiteks ühe ja siis teise lambiga. Vaatlusandmed kanname tabelisse ja arvutame Ohmi seaduse põhjal igale pinge väärtusele vastava takis-

tuse R. Saadud andmete põhjal joonestame graafikud U ja I teljestikus (joon. 104) ning I ja R teljestikus (joon. 105).



Joon. 104. Metall- (M) ja süsiniitlambi (S) tunnusköver.



Joon. 105. Metall- (M) ja süsiniitlambi (S) takistuse olenevus voolutugevusest.

	Metallniitlamp		Süsiniitlamp	
U	I	R	I	R
5	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
10	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
15	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .

4. Täiendavaid küsimusi

1. Missuguste ainete eritakistused suurenevad ja missuguste ainete eritakistused vähenevad temperatuuri tõusmisel?
2. Kas metallniitlambi sisselülitamisel on voolutugevus suurem või väiksem kui pideval põlemisel?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 45.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VII, § 7.

85. TERMOELEMENDI KALIIBRIMINE

1. Tööülesanne

Termoelemendi kaliibrimine jäävate punktide järgi.

2. Töövahendid

Termoelement, millivoltmeeter 0—50 mV, sekundomeeter, kaks tiiglit, statiiv tiigli hoidmiseks, keedupudel, umbes 30 g seatina ja niisama palju tsinki.

3. Riistade kirjeldus ja teooria

Termoelektrilist efekti on selle avastamisest saadik püütud rakendada temperatuuride mõõtmiseks. Tänapäeval kasutatakse tehnikas temperatuuride mõõtmiseks peaaegu eranditult termoelemente, sest võrreldes elavhõbetermomeetriga on termoelemendil palju paremusi. Ta ehitus on lihtne, ta on mehaaniliselt ja termiliselt vastupidav ja võimaldab mõõta nii kõrgeid kui ka madalaid temperatuure. Oma väikeste dimensioonide tõttu võimaldab termoelement mõõta ka väga väikeste ruumide temperatuure. Tema soojusmahtuvus on väga väike, mis omab suurt tähtsust paljude füüsikaliste ja keemiliste mõõtmiste puhul. Tööstuses on tähtis, et mõõdetavat temperatuuri saaks jälgida kaugel mõõtmiskohast või jälgida mitmes kohas mõõdetavaid temperatuure ühes kohas ning üheainsa elektri-mõõteriista abil. Ka seda võimaldab termoelement.

Termoelektriline efekt seisneb teatavasti selles, et kahest eri metallist moodustatud ahela ühe jootekoha soojendamisel tekib ahelas elektromotoorne jõud.

Paljude termopaaride elektromotoorne jõud on suures lähenduses võrdeline jootekohtade temperatuuride vahega. On aga ka termopaare, millede elektromotoorne jõud temperatuuri tõusmisel esialgu suureneb, hakkab siis teatavast temperatuurist alates vähenema ja teataval kindlal temperatuuril muudab märki (näiteks W-Mo, Fe-Cu, Ni-uushõbe jm.).

Tehnikas kasutatakse peamiselt järgmisi termoelemente:

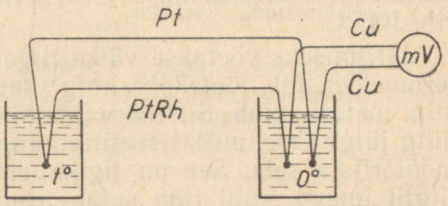
Cu-konstantaan	kuni 500° C,	kusjuures	$E_{500} = 26{,}8$ mV
Kromell [1]-kopell [2]	kuni 800° C,	„	$E_{800} = 66{,}40$ mV
Fe-konstantaan (40% Ni, 60% Cu)	kuni 900° C,	„	$E_{900} = 50{,}9$ mV
Ni-CrNi (12,3% Cr) . . .	kuni 1100° C,	„	$E_{1100} = 41{,}3$ mV
Kromell-alumell [3]	kuni 1300° C,	„	$E_{1300} = 52{,}41$ mV
Pt-PtRh (normaal) (10% Rh)	kuni 1600° C,	„	$E_{1600} = 16{,}65$ mV
W-Ta	kuni 2500° C,	„	$E_{2500} = 32{,}3$ mV

Tehnilise termoelemendi ehitus on järgmine: kahest eri metallist 0,5—1,5-millimeetrise läbimõõduga traadid on otsapidi kokku joodetud. Jootekohast alates on traadid isoleeritud mingi temperatuurikindla keraamilise ainega (harilikult kvartsiga SiO_2 või korundiga Al_2O_3). Mõlemad traadid ühes isoleertoruga on paigutatud kaitsetorusse, mille ülesandeks on kaitsta jootekohta ja traatide isolatsiooni mehaaniliste vigastuste eest ning samuti mõõdetavate keskkondade keemiliste ja elektriliste mõjude eest. Eriti kõrgete temperatuuride puhul, kus kasutatakse W-Ta termoelementi, valmistatakse isoleer- ja kaitsetoru tsirkooniumoksüü-

[1] Kromell: 90% Ni, 9,7% Cr, 0,3% Si.
[2] Kopell: 43—44% Ni, 56—57% Cu.
[3] Alumell: 94,8% Ni, 2% Al, 0,2% Fe, 2% Mn, 1% Si.

dist ning termoelement ise on inertse gaasi ülerõhu all (harilikult argoon, mida saadakse õhust, kus tema sisaldus on ca 0,95 mahuprotsenti).

Tehnilistel mõõtmistel ühendatakse termoelemendi traadid otse mõõteriistaga (millivoltmeetriga). Sel juhul on teiseks «jootekohaks» ühendus galvanomeetri klemmiga, mille temperatuur võrdub toatemperatuuriga. Et toatemperatuur võib kõikuda mõne kraadi piirides, kõiguvad seega ka riistalt loetavad temperatuurid



Joon. 106. Termoelemendi lülitus täpseks temperatuuri mõõtmiseks.

Kui on vaja saavutada suuremat täpsust, siis asetatakse teised jootekohad termostaati (joon. 106), tavaliselt termospudelisse, mis on täidetud jääga. Termostaadist väljuvad juhtmed on vasest. Millivoltmeetri ahel on tavaliselt samuti vasest, nii et selles osas täiendavat elektromotoorset jõudu ei teki.

Soojendamisel termoelemendi traatide takistus muutub, ja et igal mõõtmisel termoelemendi traadid soojenevad erinevas ulatuses — kord 5—6 cm, kord aga rohkem kui 20 cm pikkuselt — olenevalt sellest, kui sügavale kõrge temperatuuri tsooni tuleb jootekoht paigutada, siis ei ole võimalik seda ahela takistuse muutust arvestada. Seepärast tuleb hoolitseda, et termoelemendi takistus oleks väike — kümnendike oomide kuni mõne oomi piirides, sest siis muutub ka takistus kümnendikes oomides. Vastupidi: millivoltmeetri takistus peab olema suur — mõnisada kuni tuhat oomi. Millivoltmeetri temperatuur peab olema alati üks ja sama, sest vastasel korral muutub ka tema takistus.

Täpsematel millivoltmeetritel on pöördpool lindi abil üles riputatud. Nad ei jää kunagi «kinni». Tappidel pöörleva pooliga riista puhul aga toimub liikumine väikeste hüpetega ja lugemi võtmisel tuleb teda näpuga kergelt koputada, et ta nihkuks tasakaaluasendisse.

Täpsel temperatuuri määramisel või termopaari normimisel mõõdetakse elektromotoorset jõudu täpse sillaga kompensatsioonimeetodil (vt. § 77). Siis ei tule termoelemendi takistus üldse arvesse.

Käesoleva töö ülesandeks on antud termoelemendi kaliibrimine, s. o. tuleb määrata tema elektromotoorne jõud kolmel jääval temperatuuril ja selle järgi leida elektromotoorse jõu teise astme lähenduspolünoomi konstandid. Lähenduspolünoomi kuju on seega järgmine:

$$E = a + bt + ct^2, \qquad (1)$$

kus t on kuuma jootekoha temperatuur, E termoelemendi elektromotoorne jõud ning a, b, ja c empiiriliselt määratavad konstandid.

Kaliibritav termoelement ühendatakse millivoltmeetriga ning jootekoht paigutatakse keevasse vette, võimalikult veepinna lähedale või isegi aurujoasse, sest tugevasti keeva vee temperatuur on veidi üle 100° C. Kui termopinge enam ei tõuse, loetakse mõõteriista seis E_1 (enne lugemist koputada riista kergelt näpuga, et ta läheks tasakaaluasendisse). See termopinge vastab temperatuurile 100° C.

Järgmiseks võetakse väike tiigel seatinaga, asetatakse sellesse termoelemendi jootekoht ning kuumutatakse tiiglit gaasileegil, kuni metall sulab. Siis kõrvaldatakse leek, et tiigel saaks jahtuda, ning jälgitakse, millal seatina hangub. Hangumise hetkel loetakse mõõteriista seis. See on ligikaudne lugem. Nüüd kuumutatakse tiiglit uuesti, kuni tina sulab (mõõteriista seis 4—5 jaotist üle hangumistemperatuuri). Kõrvaldatakse jälle leek ja lastakse tiiglil aegamööda jahtuda, jälgides seejuures millivoltmeetrit ja märkides lugemid iga 15 sekundi järel (riista koputada!), kuni millivoltmeetri hälve langeb alla esialgselt määratud hangumistemperatuuri. Saadud andmete põhjal joonestatakse pinge käigu graafik olenevalt ajast. Seatina hangumisel eraldub hangumissoojus, mistõttu hangumistemperatuuril tekib väike seisak temperatuuri languses ja seega ka termoelemendi pinge languses. Termopinge käigu kõveras peab seetõttu esinema koht, mis on rööbik aja teljega. Selle rööbiku koha elektromotoorse jõu väärtus E_2 vastabki seatina hangumistemperatuurile 327,3° C. Et termoelementi seatinast kätte saada, tuleb see uuesti sulatada. Termoelemendi kaitsetoru ja samuti ka isoleertoru on klaasist, mistõttu teda tuleb ettevaatlikult soojendada ja jahutada. Mingil tingimusel e i t o h i j a h e d a t k l a a s t o r u v e d e l a s s e m e t a l l i a s e t a d a.

Tsingi puhul on mõõtmise käik täiesti analoogiline. Saadakse elektromotoorse jõu väärtus E_3, mis vastab tsingi sulamistemperatuurile. Zn sulamistemperatuur on 419,4° C.

Mõõtmisandmete ülesmärkimiseks ja arvutamiseks kasutada järgmist skeemi:

I Keev vesi $t = 100°$ C Termopinge $E_1 = \ldots\ldots$ mV

II Pb			III Zn		
Aeg	Termopinge E_2	Temperatuur	Aeg	Termopinge E_3	Temperatuur
a)	Ligikaudse hangumistemperatuuri leidmine esialgsel jahutamisel: . . . . . mV	327,3° C	a)	Ligikaudse hangumistemperatuuri leidmine esialgsel jahutamisel: . . . . . mV	419,4° C

II Pb			III Zn		
Aeg	Termopinge E_2	Temperatuur	Aeg	Termopinge E_3	Temperatuur
b)	Täpse hangumistemperatuuri leidmine aeglasel jahutamisel		b)	Täpse hangumistemperatuuri leidmine aeglasel jahutamisel	
0^m0^s 15^s 30^s 45^s	Alata 5 mV võrra kõrgemalt ligikaudsest hangumistemperatuurist		0^m0^s 15^s 30^s 45^s	Alata 5 mV võrra kõrgemalt ligikaudsest hangumistemperatuurist	
	Lõpetada 5 mV allpool hangumistemperatuuri			Lõpetada 5 mV allpool hangumistemperatuuri	
	Pinge languse seisak	327,3° C		Pinge languse seisak	419,4° C

(Koha juurde, kus termopinge langus seisma jääb, märkida vastav temperatuur.) Termopinge languse seisakute täpsemaks kindlakstegemiseks koostada graafikud.

Jrk. nr.	Kindlad temperatuurid	Toatemperatuur t_0	Temperatuurivahe t_i	Termopinge E_i
1	H_2O ..... 100° C	..... °C	$t_1 =$ ..... °C	$E_1 =$ ..... mV
2	Pb ..... 327,3° C	..... °C	$t_2 =$ ..... °C	$E_2 =$ ..... mV
3	Zn ..... 419,4° C	..... °C	$t_3 =$ ..... °C	$E_3 =$ ..... mV

Nende andmete põhjal saame kirjutada kolm võrrandit:

$$1)\ E_1 = a + bt_1 + ct_1^2,$$
$$2)\ E_2 = a + bt_2 + ct_2^2,$$
$$3)\ E_3 = a + bt_3 + ct_3^2,$$

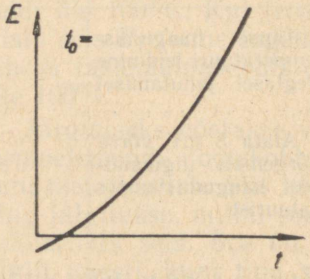
kus otsitavateks on konstandid a, b ja c.

Seda võrrandisüsteemi on sobiv lahendada determinantide kaudu. Lahutades igas determinandis esimesest reast teise ja teisest kolmanda ning taandades kogu murru $(t_1 - t_2)(t_2 - t_3)$-ga, saame tulemuse, mida võib numbriliselt lahendama hakata:

$$c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \frac{E_1 - E_2}{t_1 - t_2} \\ 1 & \frac{E_2 - E_3}{t_2 - t_3} \end{vmatrix}}{t_3 - t_1}; \quad b = \frac{\begin{vmatrix} \frac{E_1 - E_2}{t_1 - t_2} & t_1 + t_2 \\ \frac{E_2 - E_3}{t_2 - t_3} & t_2 + t_3 \end{vmatrix}}{t_3 - t_1}.$$

a saame, kui asetame võrrandisse leitud c ja b väärtused. Võrrandisüsteemi lahenduskäik esitada täielikult, nii et iga arvutustehet saab kontrollida.

Kui ruutvõrrandi $E = a + bt + ct^2$ kordajad a, b, c on leitud, joonestame vastava funktsionaalse olenevuse kõvera, arvutades E väärtused iga 50° C tagant (joon. 107).



Joon. 107. Termopinge ja temperatuuri olenevuse graafik.

Samale graafikule joonestame ka lineaarseose $E = bt$ ja võrdleme mõlemate joonte erinevust. Kui suures piirkonnas tohime kasutada lineaarseost?

See kõver võimaldab termopinge järgi määrata temperatuuri. Seejuures peame silmas pidama kaht asjaolu. Et kaliibrimisel teine jootekoht oli toatemperatuuril, siis kehtib meie kaliibrimine ka ainult sellel juhul, kui termoelemendi teine jootekoht on toatemperatuuril t_0 (mis tuleb ka protokolli kanda). Teiseks oleme õigustatud mõõtma ainult interpolatsiooni teel saadavaid temperatuure, s. o. temperatuure vahemikus 100° C — 419° C, ja kaugele sellest piirkonnast väljapoole me ekstrapoleerida ei tohi.

Kõvera punktid arvutame järgmise tabeli järgi:

$a =$ ..... $b =$ ..... $c =$ .....

t	bt	ct^2	$bt + ct^2$	E
50° C	.....	.....	.....	..... mV
100° C	.....	.....	.....	..... mV
.....	.....	.....	.....	.....
450° C	.....	.....	.....	..... mV

5. Täiendavaid küsimusi

1. Missuguses suurusjärgus on termoelektromotoorne jõud, mida tekitab ühekraadine temperatuuride vahe?
2. Missugused paremused on termoelemendil tavalise termomeetriga võrreldes?
3. Graafikul, mis kujutab termopinge langust sulatatud tsingi (või seatina) jahtumisel, on horisontaalne koht. Millest on see tingitud?
4. Missuguseks praktiliseks otstarbeks saab kasutada E ja t graafikut?
5. Kas iga termoelementi saab kasutada igasuguses temperatuuride vahemikus?

6. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 55—57.
Mihelson, Füüsika II, ptk. VI, § 7.

86. TERMOELEMENDI VÕRDLEMINE TERMOMEETRIGA

1. Tööülesanne

Termoelemendi võrdlemine termomeetriga temperatuurivahemikus 0 — 100° C.

2. Töövahendid

Kahe jootekohaga termoelement, pöördpoolgalvanomeeter, kaks anumat jootekohtadele soovitava temperatuuri andmiseks, gaasipõleti vee soojendamiseks, elavhõbetermomeeter 0,1° jaotistega.

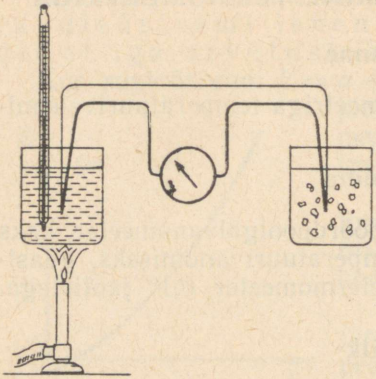
3. Töö käik

Erinevast ainest traatidest koostatud juhtmeringis tekib pinge, kui traatide ühenduskohtade temperatuurid on erinevad. Seda pinget nimetatakse termopingeks ja selle tekitamiseks kasutatavat ainepaari termoelemendiks. Pinge mõjul tekib vool, nn. termovool, mida võime uurida tundliku galvanomeetriga.

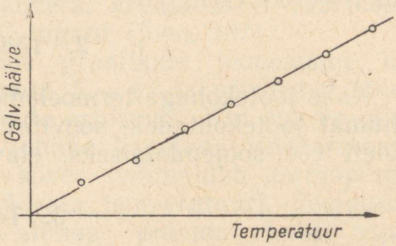
Termopinge suurus oleneb ühe ja sama ainepaari puhul temperatuuride vahest. Hoides ühe ühenduskoha temperatuuri konstantsena, saame termoelementi kasutada temperatuuri mõõtmiseks. Sobivalt valitud ainepaari puhul on termopinge laias temperatuuripiirkonnas peaaegu võrdeline temperatuuride vahega, osutudes seega eriti kohaseks temperatuuri mõõtmise vahendiks. Temperatuuri mõõtmiseks joodame traatide ühenduskohad kokku ja lülitame termoelemendi vooluringi pöördpoolgalvanomeetri (joon. 108) või millivoltmeetri. Kui hoiame mõlemad ühenduskohad samal temperatuuril, ei näita galvanomeeter voolu. Kui aga ühe ühenduskoha hoiame konstantsel temperatuuril ja teist soojendame, siis kasvab galvanomeetri hälve vastavalt temperatuuri tõusule. Tekkinud voolu tugevus sõltub peale pinge veel ahela kogutakistusest ja pole seetõttu piisav nähtuse iseloomustamiseks. Oluliseks tunnuseks on pinge, mis samade ainete ja samade temperatuuride puhul on jääv.

Termopinge suurus on erinevatel ainepaaridel vägagi erinev, nagu selgub raamatu lõpus toodud tabelist (tabel 14), kuid üldiselt on ta väike. Seepärast ongi vajalik tundlik mõõteriist.

Et seadis oleks kasutatav temperatuuride mõõtmiseks, selleks peame ta enne kaliibrima, s. o. määrama temperatuuridele vastavad mõõteriista lugemid. Kaliibrimise teostame joonisel 108 kujutatud skeemi kohaselt. Ühe anuma täidame sulava lume või jääga, mille temperatuur püsib sulamise kestel konstantsena (0° C). Sellesse anumasse, seejuures võimalikult keskele, asetame termoelemendi ühe ühenduskoha. Teise, võimalikult suure anuma täidame külma veega, mida soojendame gaasipõletiga, ja asetame selle keskele teise ühenduskoha. Vee temperatuuri mõõtmiseks kasutame 0,1° jaotistega elavhõbetermomeetrit, mille kuulikest hoiame termoelemendi ühenduskoha lähedal. Vee soojenemisel registreerime iga 5°



Joon. 108. Termoelemendi kaliibrimine.



Joon. 109. Termoelemendi kaliibrimise graafik.

järel vee temperatuuri ja samaaegselt galvanomeetri hälbe. Et vee temperatuur oleks ühtlane, tuleb vett segada. Kui vee temperatuur on tõusnud keemistäpini, siis kustutame põleti ja vett jahtuda lastes registreerime termomeetri ning galvanomeetri lugemid endisel viisil. Saadud andmed kanname graafikule, mille üheks teljeks võtame termomeetrilt loetud temperatuuri ja teiseks teljeks galvanomeetri hälbe (joon.109). Seda graafikut võime kasutada temperatuuri mõõtmiseks sama seadise abil. Selleks asetame termoelemendi ühe ühenduskoha sulavasse jäässe ja teise mõõdetavasse kohta ning loeme galvanomeetri hälbe. Graafikult otsime hälbele vastava temperatuuri kraadides.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Missugused paremused on termoelemendil elavhõbetermomeetriga võrreldes?
2. Miks ei kasutata termoelemente igapäevases elus temperatuuri mõõtmiseks?
3. Kuidas on võimalik termopinget suurendada?
4. Kas termoelemente kasutatakse elektrienergia tootmiseks?

5. Kirjandust

L a n g jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 53—57.
M i h e l s o n, Füüsika II, ptk. VI, § 7.

87. VAHELDUVVOOLU ISELOOMUSTAVATE SUURUSTE MÕÕTMINE

1. Tööülesanne

Vahelduvvoolu iseloomustavate suuruste mõõtmisega tutvumine. Vektordiagrammi rakendamine arvutustel. Pooli induktiivsuse määramine.

2. Töövahendid

Sagedusmõõtja, vattmeeter, ampermeeter, voltmeeter, muudetava induktiivsusega pool, oommeeter ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

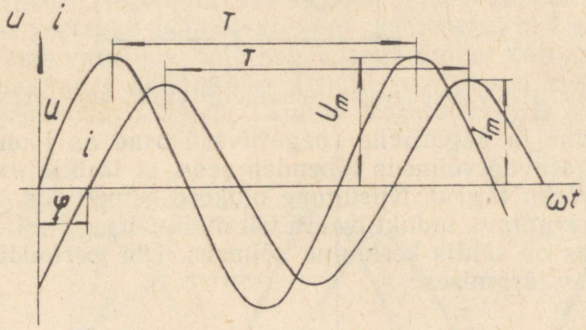
a) Vahelduvvooluks nimetatakse perioodiliselt suunda muutvat voolu. Kui pinge ja voolutugevus muutuvad vastavalt siinusfunktsioonile, siis nimetatakse voolu siinuseliseks vahelduvvooluks. Sellise voolu puhul

$$u = U_m \sin \omega t \tag{1a}$$

ja

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi), \tag{1b}$$

kus i ja u tähendavad vastavalt vahelduvvoolu tugevuse ja pinge hetkväärtusi, I_m ja U_m amplituudväärtusi, ω nurksagedust, ($\omega = 2\pi f$) ja t aega. Sagedus $f = \frac{1}{T}$, kus T tähendab perioodi. Voolutugevuse ja pinge faaside erinevus (faasinihe) φ tekib vahelduvvoolu ahelas siis, kui ahel sisaldab mahtuvust või induktiivsust. Viimaste puudumisel on pinge ja voolutugevus samas faasis; teiste sõnadega, nende vahel puudub faasinihe, s. o. $\varphi = 0$. Joonisel 110 on graafiliselt kujutatud valemitele (1a) ja (1b) vastava vahelduvvoolu tugevuse ja pinge sõltuvust ajast.



Joon. 110. Vahelduvvoolu graafiline kujutamine.

Tavalised vahelduvvoolu volt- ja ampermeetrid näitavad nn. efektiivväärtusi, mida tähistame vastavalt tähtedega U ja I. Siinuselisel vahelduvvoolul

$$U = U_m : \sqrt{2} \text{ ja } I = I_m : \sqrt{2}.$$

Vahelduvvoolu hetkvõimsus n on arvutatav hetkpinge

$$u = U_m \sin \omega t$$

ja hetkvoolutugevuse

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$$

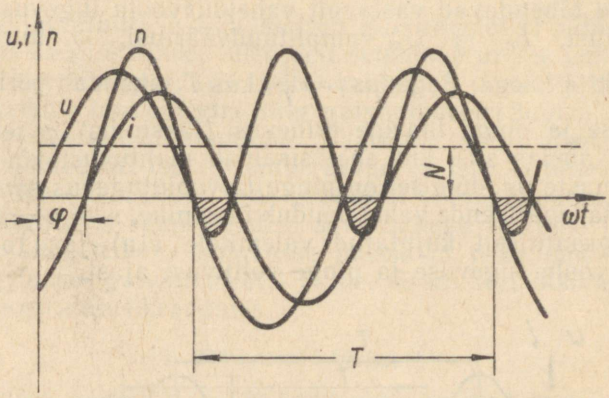
korrutisena:

$$n = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \varphi).$$

Pärast trigonomeetrilist teisendamist võime kirjutada:

$$n = \frac{1}{2} U_m I_m [\cos \varphi - \cos (2\omega t + \varphi)]. \qquad (2)$$

Sulgavaldise esimene liige ei sõltu ajast, teine aga muutub vahelduvvoolu sagedusest kaks korda suurema sagedusega. Joonisel 111 on kujutatud u, i ja n sõltuvus ajast. Võimsus on perioodili-



Joon. 111. Vahelduvvoolu võimsuse graafiline kujutamine.

selt positiivne ja negatiivne (negatiivsed osad on joonisel viirutatud). Negatiivne võimsus tähendab seda, et tarbija annab energiat vooluvõrku tagasi. Niisugune olukord esineb siis, kui vooluringis on märgatava induktiivsuse või mahtuvusega osi.

Praktikas on tähtis keskmine võimsus. Ühe perioodi kohta on see arvutatav järgmiselt:

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_m I_m [\cos \varphi - \cos (2\omega t + \varphi)]\, dt =$$

$$= \frac{U_m I_m}{2T} \int_0^T \cos \varphi \, dt - \int_0^T \cos (2\omega t + \varphi)\, dt.$$

Esimese integraali väärtus on $T \cdot \cos \varphi$, sest φ on ajast sõltu-

matu. Teise integraali arvutamisel leiame, et

$$\int_0^T \cos(2\omega t + \varphi)\,dt = \left[\frac{1}{2\omega}\sin(2\omega t + \varphi)\right]_0^T = \frac{1}{2\omega}[\sin(4\pi + \varphi) -$$

$$-\sin\varphi] = 0, \text{ sest } \sin(4\pi + \varphi) = \sin\varphi.$$

Seega $N = {}^1/_2 U_m I_m \cos\varphi$ ehk efektiivväärtuste kasutamisel

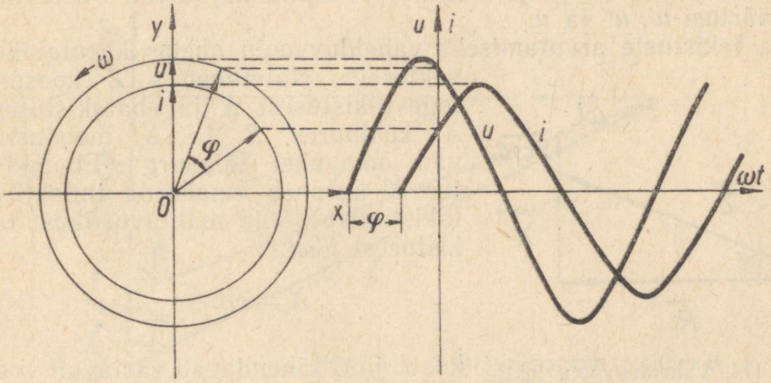
$$N = UI\cos\varphi. \qquad (3)$$

Tegurit cos φ nimetatakse vahelduvvoolu võimsusteguriks. Avaldis (3) tähendab vahelduvvoolu tegevvõimsust ja seda mõõdetakse vattides. Korrutis $UI = N_n$ mõõdab vahelduvvoolu näivvõimsust, mille mõõtühikuks on voltamper (tähis VA). Korrutis $UI \sin\varphi = N_e$ on vahelduvvoolu ebavõimsus. Seega

$$N_n = \sqrt{N^2 + N_e^2}.$$

Samuti nagu võimsus jaotatakse ka pinge ja voolutugevus näiv-, tegev- ja ebakomponentideks. Nii tähendab I vahelduvvoolu näivtugevust, $I\cos\varphi$ tegevtugevust ja $I\sin\varphi$ ebatugevust. (Voolutugevus on siin arvestatud efektiivväärtustest lähtudes ja φ tähendab voolutugevuse faasinihet pinge suhtes.) Voolu tegevtugevus tähendab pingega samas faasis olevat ja ebatugevus pingega 90-kraadist faasinihet omavat komponenti.

Siinuselise vahelduvvoolu kujutamiseks kasutatakse nn. vektordiagramme. Vahelduvvoolu iseloomustava suuruse (pinge või voolutugevuse) amplituudväärtus, mida vaadeldakse vektorina, kujutatakse vastavas mõõtkavas ringi raadiusena, mis pöörleb positiivses suunas vahelduvvoolu sagedusega ümber keskpunkti. Pöördenurga mõõtmist alustatakse X-telje positiivsest suunast. Raadiuse projektsioon Y-teljele kujutab vahelduvvoolu hetkväärtust.



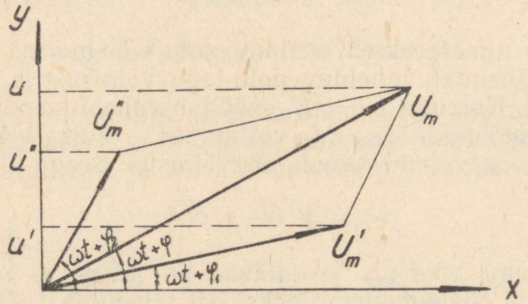
Joon. 112. Vahelduvvoolu kujutamine vektordiagrammiga.

Joonisel 112 on vektordiagrammi abil kujutatud joonisel 110 esitatud vahelduvvool. Vektorid on kujutatud algfaasis.

Vektordiagrammide abil on võimalik lihtsalt teostada mitmesuguseid arvutusi. Olgu näiteks vaja liita vahelduvpinged

$$u' = U_m' \sin(\omega t + \varphi_1) \quad \text{ja} \quad u'' = U_m'' \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Selleks pole tarvis joonestada ringe, vaid ainult XY-teljestik, milles kujutame vektoritena U_m', U_m'' ja summa U_m vastavalt nende



Joon. 113. Kahe vahelduvpinge liitmine vektoritena.

suurusele ja suunale (joon. 113). Otsitavad suurused U_m ja algfaas φ on jooniselt mõõdetavad või joonise põhjal kergesti arvutatavad:

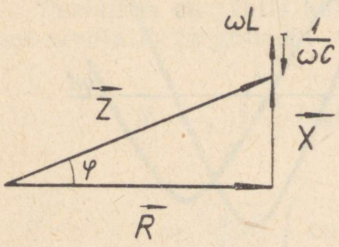
$$U_m = \sqrt{U_m'^2 + U_m''^2 + 2U_m' U_m'' \cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

$$\tan\varphi = \frac{U_m' \sin\varphi_1 + U_m'' \sin\varphi_2}{U_m' \cos\varphi_1 + U_m'' \cos\varphi_2}.$$

Amplituudväärtuste projektsioonid Y-teljele kujutavad vastavaid hetkväärtusi u', u'' ja u.

Ka takistuste arvutamiseks vahelduvvoolu ahelas kasutatakse vektoreid. Näivtakistus Z koosneb tegevtakistusest R ja ebatakistusest X, kusjuures R ja X moodustavad omavahel täisnurga. Ebatakistus X koosneb omakorda induktiivtakistusest ωL ja mahtuvuslikust takistusest $1/\omega C$:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$



Joon. 114. Vahelduvvoolu takistuste kolmnurk.

kus L ja C tähendavad vastavalt vooluahela induktiivsust ja mahtuvust.

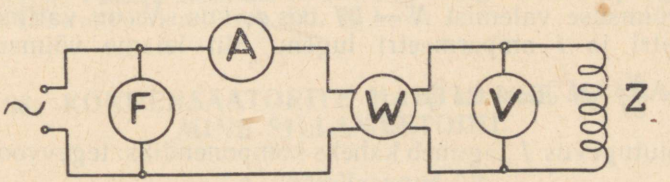
Erinevalt pinge ja voolutugevuse vektoreist on takistusi kujutavad vektorid seisvad, sest takistus ei muutu perioodiliselt. Takistusvektorid moodustavad täisnurkse kolmnurga, mille kaatetiteks on tegevtakistus R ja ebatakistus X ning hüpotenuusiks näivtakistus Z (joon. 114). Faasinihe φ ilmneb takistuskolmnurgas R ja Z vahelise nurgana. Seega

$$\tan\varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \tag{4}$$

ja

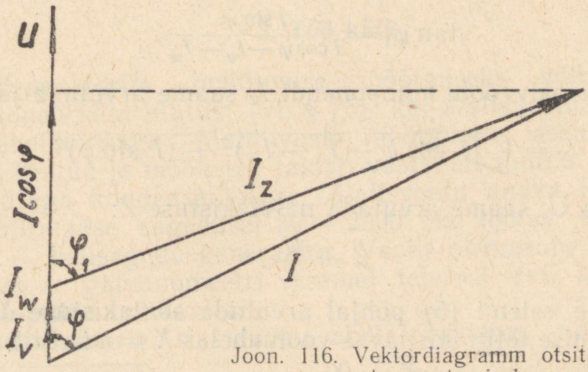
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \tag{5}$$

b) Käesolevas töös tuleb mõõta vahelduvvoolu ahelasse lülitatud pooli puhul takistust, voolutugevust, pinget, võimsust ja sagedust. Selleks koostame mõõtmisseadeldise joonisel 115 esitatud skeemi kohaselt, kus W, A ja V tähendavad järjekorras vatt-,



Joon. 115. Mõõtmisseadeldise skeem.

amper- ja voltmeetrit, F sagedusmõõtjat ja Z pooli induktiivsusega L ning oomilise takistusega R. Vattmeetri lülitamise ja ehituse kohta vt. § 71. Esitatud skeemis mõõdab ampermeeter nii voltmeetrit kui ka vattmeetri pingepooli läbiva voolu tugevust. Nende voolude tugevused on samas faasis pingega, sest poolide induktiivsused on väga väikesed. Pooli Z läbiva voolu tugevus hilineb pinge suhtes, sest poolil on mõõdetav induktiivsus. Ülevaatlikult võime seda kujutada vektordiagrammi abil (joon. 116).



Joon. 116. Vektordiagramm otsitavate suuruste arvutamiseks.

Et vahelduvvoolu kujutavate diagrammvektorite liitmisel pole oluline algfaasi teadmine, siis kujutame pingevektori vertikaalsena ja selle suhtes faasinihet omavad voolutugevuse vektorid faasinihke φ võrra paremale suunatutena. Mahtuvust sisaldavas vooluahelas oleks voolutugevuse vektor suunatud pingevektorist vasakule. Siin kasutame arvutusteks ja vektordiagrammi koostamiseks vahelduvvoolu efektiivväärtusi, sest need on mõõteriistadelt otseselt loetavad. Efektiivväärtuste kasutamine amplituudväärtuste asemel muudab ainult vektordiagrammi mõõtkava ($1/\sqrt{2}$ korda), mitte aga kuju.

Ampermeetrilt loetav voolu näivtugevus I on kolme voolutugevuse vektoriline summa:

$$\vec{I} = \vec{I}_z + \vec{I}_v + \vec{I}_w,$$

kus indeksid tähendavad järjekorras pooli, volt- ja vattmeetrit.

Pinge- ja voolutugevuse vahelise faasinihke arvutamiseks lähtume võimsuse valemist $N = UI \cos \varphi$, kus N on vattmeetri, U voltmeetri ja I ampermeetri lugem. Siit leiame võimsusteguri $\cos \varphi = \frac{N}{UI}$ ja edasi ka φ.

Voolutugevus I jaguneb kaheks komponendiks: tegevvoolu komponendiks $I \cos \varphi = \frac{N}{U}$, mis on pingega samas faasis, ja ebavoolu komponendiks $I \sin \varphi$. Esimene koosneb voltmeetrit läbivast voolust $I_v = \frac{U}{R_v}$, vattmeetri pingepooli läbivast voolust $I_w = \frac{U}{R_w}$ ja pooli Z läbivast tegevvoolu komponendist $I \cos \varphi - I_v - I_w$. Siin R_v ja R_w tähendavad vastavalt volt- ja vattmeetri pingepooli takistust.

Jooniselt 116 nähtub, et pinge ja voolutugevuse vaheline faasinihe φ_1 poolis Z on arvutatav järgmisest seosest:

$$\tan \varphi_1 = \frac{I \sin \varphi}{I \cos \varphi - I_v - I_w}.$$

Pooli läbiva näivvoolu komponendi I_z saame arvutada järgmiselt:

$$I_z = \sqrt{(I \cos \varphi - I_v - I_w)^2 + (I \sin \varphi)^2}.$$

Teades I_z ja U, saame arvutada näivtakistuse Z:

$$Z = \frac{U}{I_z}.$$

Edasi saame valemi (5) põhjal arvutada ebatakistuse X. Mahtuvuse puudumise tõttu uuritavas vooluahelas $X = \omega L$. Siit arvutame pooli induktiivsuse $L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f}$.

Otsese mõõtmise teel määrame f, U, I, N, R_v, R_w ja R, millede põhjal arvutame I_z, $\cos\varphi$, φ, φ_1, Z, X ja L vähemalt kolmel L ja R väärtusel. L ja R muutmiseks kasutame pooli erinevaid mähiseid. Saadud tulemuste põhjal konstrueerime katseandmeile vastavad vektordiagrammid ja takistuste kolmnurgad.

Kui pooli ning volt- ja vattmeetri pingepooli takistused ei ole antud, siis tuleb nad mõõta Wheatstone'i silla (vt. § 75) või oommeetri abil.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Miks pole raudsüdamikuga pooli induktiivsus konstantne?
2. Kas induktiivtakistus on kasutatav vahelduvvoolu ahelas voolutugevuse reguleerimiseks?
3. Kirjeldada mahtuvuse mõju faasinihkele.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 102—107.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XII, §§ 1—7.

88. KONDENSAATORITE MAHTUVUSE MÄÄRAMINE SILLAMEETODIL

1. Tööülesanne

Kondensaatorite mahtuvuse määramine sillameetodil. Paralleelselt ja järjestikku lülitatud kondensaatorite mahtuvuste liitumisreeglite kontrollimine.

2. Töövahendid

Reohord, helisagedusgeneraator, peatelefon, tuntud mahtuvusega ja mõõdetavad kondensaatorid, kaks lülitit ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

3. Töö käik

Kondensaatorite mahtuvuse mõõtmiseks võib rakendada Wheatstone'i silla lülitust (vt. § 75), kui alalisvoolu asemel kasutada vahelduvvoolu. Mahtuvuste mõõtmiseks asendatakse silla skeemis tuntud ja mõõdetav takisti vastavalt tuntud ja mõõdetava mahtuvusega kondensaatoriga. Alalisvoolu andva elemendi asemele lülitatakse sagedusel 500—2000 Hz töötav vahelduvvoolu allikas — helisagedusgeneraator. Voolu olemasolu indikaatorina kasutatakse galvanomeetri asemel telefoni (vt. ka § 76) või elektronoptilist indikaatorit.

Kondensaatorit sisaldava ahela takistus vahelduvvoolule $Z=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$, kus R tähendab ahela oomilist takistust, C kon-

densaatori mahtuvust ja ω vahelduvvoolu nurksagedust. Kui mahtuvus C ja nurksagedus ω pole eriti suured, siis meie katsetingimustes, kus juhtmete takistus on väike, $R \ll \frac{1}{\omega C}$ ja võime ilma suurema veata kirjutada:

$$Z = \frac{1}{\omega C}.$$

Olgu silla lülituses takistuse r asemel tuntud mahtuvusega kondensaator C_0 ja määratava takistuse x asemel kondensaator mahtuvusega C. Siis on kondensaatorite C_0 ja C takistused vahelduvvoolule vastavalt $Z_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ ja $Z = \frac{1}{\omega C}$.

Voolu puudumisel sillas kehtib paragrahvis 75 esitatud seos $\frac{x}{r} = \frac{l_1}{l_2}$, kus x asemel on Z ja r asemel Z_0. Seega

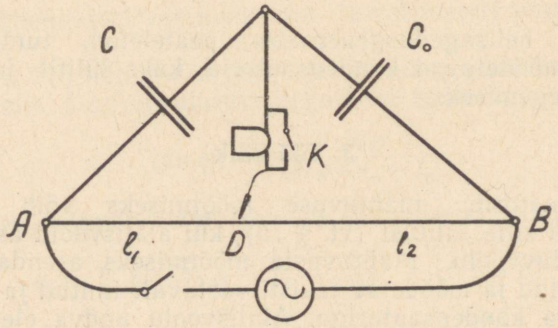
$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{l_1}{l_2} \text{ ehk } \frac{\omega C_0}{\omega C} = \frac{l_1}{l_2},$$

millest

$$C = C_0 \frac{l_2}{l_1}.$$

Voolu puudumisel peab vooluahelasse lülitatud telefon vaikima. Tavaliselt aga ei saavutata täielikku vaikimist, vaid ainult minimaalne tugevus, kui tuletatud tingimus on täidetud.

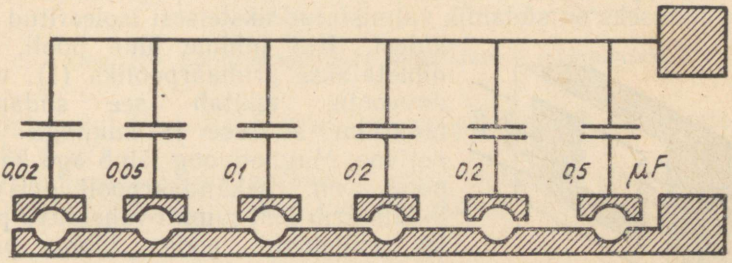
Enne katse teostamist tutvuda paragrahvis 75 kirjeldatud tööga ja alles siis koostada seadeldis joonisel 117 esitatud skeemi



Joon. 117. Mahtuvuste mõõtmine sildlülituses.

kohaselt. Liugkontakti D nihutamisega määrata heli tugevuse miinimum. Telefoniga paralleelse lüliti K sulgemine ja avamine võimaldab miinimumi täpsemalt määrata, sest kõrv reageerib hästi nõrkade helide tekkimisele ja kadumisele. Mida kvaliteetse-

mad on kondensaatorid, seda teravam on heli tugevuse miinimum. Täpsemate mõõtmistulemuste saavutamiseks valitakse magasinist tuntud mahtuvus nii, et kontakti *D* nullseis on võimalikult takistustraadi keskel. Mahtuvuste magasini kasutamisel tuleb silmas pidada, et mahtuvus on sisse lülitatud siis, kui pistik on vastavas pesas (joon. 118). Täpsuse suurendamiseks vahetada kondensaa-



Joon. 118. Mahtuvuste magasini skeem.

torite asukohad sillas, teostada kummaski asendis kolm mõõtmist ja võtta nendest aritmeetiline keskmine. Samasugused mõõtmised teostada ka teise uuritava kondensaatoriga, samuti uuritavaid kondensaatoreid järjestikku ja paralleelselt lülitades. Arvutada järjestikku ja paralleelselt lülitatud kondensaatorite mahtuvused üksikute kondensaatorite mahtuvustest lähtudes ja võrrelda nii saadud andmeid mõõtmistulemustega.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas töös kirjeldatud meetod on rakendatav induktiivsuste määramiseks?
2. Kas telefoni ja helisagedusgeneraatori asukohad on vahetatavad?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 104.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XII, § 3 ja ptk. VII, § 6.

89. TRANSFORMAATORI ÜLEKANDEARVU JA KASUTEGURI MÄÄRAMINE

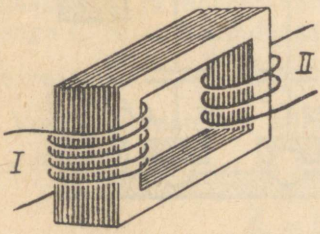
1. Tööülesanne

Transformaatori kasutamine pinge muutmiseks. Ülekandearvu ja kasuteguri määramine.

2. Töövahendid

Transformaator, kaks voltmeetrit, ampermeeter, vattmeeter, reguleeritav takisti, lüliti ja juhtmeid ühenduste tegemiseks.

Vahelduvvoolu laialdase tehnilise kasutamise põhjuseks on asjaolu, et ta pinge on lihtsalt ja peaaegu kadudeta muudetav. Pinge muutmiseks kasutatakse transformaatorit ehk trafot. Transformaator koosneb põhiliselt kahest poolist ja poolide südamikuks olevast raudraamist (joon. 119). Keerisvoolude vähendamiseks on südamik valmistatud üksteisest isoleeritud plekkidest. Kui juhime ühte pooli, mida nimetatakse primaarpooliks (I), vahelduvvoolu, tekitab see südamikus muutliku suuruse ja suunaga magnetivoo. Magnetivoog läbib aga ka teist pooli, nn. sekundaarpooli (II) ja indutseerib seal samuti vahelduva pinge. Et mõlemaid poole läbib praktiliselt sama magnetivoog, siis on indutseeritud pinge suurus iga keeru kohta võrdne ja pooli otstes valitsev pinge on võrdeline pooli keerdude arvuga. Sekundaarpooli ja primaarpooli otstes valitsevate pingete suhet nimetatakse transformaatori ülekandearvuks. Et keerdude arv on võrdeline pingega, siis on ülekandearv võrdne poolide keerdude arvude suhtega. Kui sekundaarpoolis on rohkem keerde, siis on sekundaarpoolist saadav pinge kõrgem primaarpingest, ja vastupidi.



Joon. 119. Trafo.

Kui primaarpooli keerdude arv on n_1 ja pinge U_1 ning sekundaarpooli vastavad suurused n_2 ja U_2, siis suhe

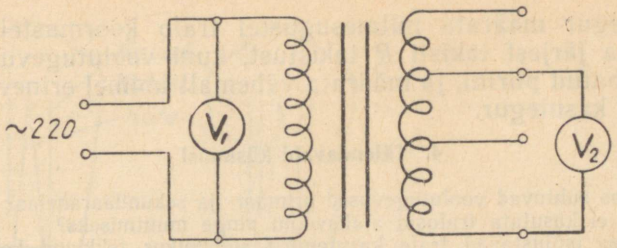
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} \qquad (1)$$

ongi trafo ülekandearv.

Kui vooluvõrguga ühendatud trafo sekundaarpooli klemmid pole omavahel ühendatud, siis puudub sekundaarpoolis vool. Primaarpoolis võime samal ajal kindlaks teha nõrga voolu olemasolu, mida nimetatakse tühijooksuvooluks. Selle voolu tugevus sõltub primaarpooli induktiivsusest.

Kui ühendame sekundaarpooliga mingi voolu tarbiva riista, näiteks hõõglambi, siis tekib sekundaarpoolis vool, mis Lenz'i reegli põhjal vähendab primaarpooli magnetivoomuutust. Seetõttu suureneb voolutugevus ka primaarpoolis. Üldiselt esineb voolutugevuse ja pinge vahel nii primaar- kui ka sekundaarpoolis faasinihe.

Kui sekundaarpooli koormata ainult oomilise takistusega, siis seal faasinihet ei esine ja me võime sekundaarahela võimsuse kohta kirjutada $N_2 = I_2U_2$, kus U_2 ja I_2 tähendavad sekundaarahelasse lülitatud volt- ja ampermeetri lugemeid. Primaarahelas esineb aga voolutugevuse I_1 ja pinge U_1 vahel faasinihe φ ning vastav võimsus



Joon. 120. Lülitusskeem trafo ülekandearvu määramiseks.

avaldub kujul $N_1 = I_1 U_1 \cos \varphi$, kus $\cos \varphi$ tähendab võimsustegurit (vt. ka § 87).

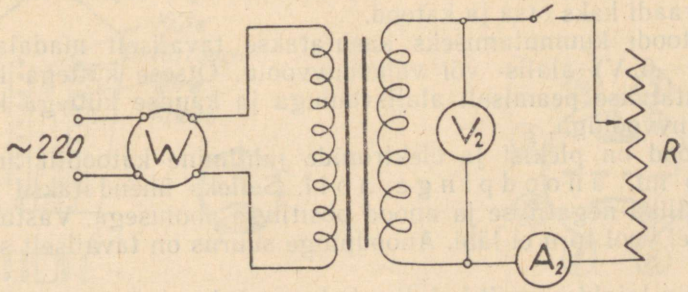
Transformaatorisse antava ja sealt saadava võimsuse suhet nimetatakse transformaatori kasuteguriks. Kasutegur

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1 \cos \varphi}. \qquad (2)$$

Kasutegur sõltub trafo koormusest ja nimikoormusel ulatub 90%-ni. Kaotsimineva energia arvel soojenevad trafo mähised ja raudsüdamik.

Ülekandearvu määramiseks kasutame joonisel 120 kujutatud lülitusskeemi. Primaarpooli ühendame vahelduvvoolu võrguga (~ 220 V), mille pinget täpsemalt näitab voltmeeter V_1. Sekundaarpooli ühendame voltmeetriga V_2. Et uuritaval trafol on mitu sekundaarpooli, siis määrame kõikide poolide ülekandearvud valemi (1) põhjal.

Kasuteguri määramiseks koostame katseseadme joonisel 121 esitatud skeemi kohaselt. Sekundaarahela võimsuse määrame voltmeetri V_2 ja ampermeetri A_2 abil. Voolutugevust sekundaarahelas reguleerime takisti R abil. Et primaarahela võimsuse määramiseks on tarvis peale voolutugevuse ja pinge teada veel võimsustegurit $\cos \varphi$, siis on otstarbekohasem mõõta primaarahela võimsust vattmeetriga (vt. § 71). Vattmeetrilt loeme otseselt primaarahela võimsuse ja kasutades valemit (2) arvutame kasuteguri.



Joon. 121. Lülitusskeem trafo kasuteguri määramiseks.

Kasutegur määrata mitmesugustel trafo koormustel. Selleks vähendada järjest takisti R takistust, kuni voolutugevus kasvab trafole lubatud piirini, ja määrata vähemalt kolmel erineval voolutugevusel kasutegur.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas suhtuvad voolutugevused primaar- ja sekundaarahelas?
2. Miks ei kasutata trafosid alalisvoolu pinge muutmiseks?
3. Kuidas mõjustavad trafo kasutegurit südamikus tekkivad keerisvoolud?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 109.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XII, § 10.

90. ELEKTRONTORU

Põhiliselt koosneb elektrontoru katoodist, anoodist ja võrest, mis asetsevad kõrgvaakuumis. Toru väliskest on kas klaasist või metallist. Torust väljuvad juhtmed on toru paremaks käsitsemiseks koondatud soklisse.

Lihtsaimal elektrontorul on ainult kaks elektroodi — katood ja anood — ning teda nimetatakse *dioodiks* (*di* — kreeka k. kaks).

Elektrivooluga kuumutatavast katoodist väljub elektrone (nn. *elektronide termoemissioon*). Katoodiks võib olla kuumutatav traat ise (nn. *otsese küttega* elektrontoru). Rohkem kasutatakse aga nn. *kaudse küttega* torusid, kus kuumutatav traat on ümbritsetud isolatsioonikihiga ja alles sellele on paigutatud elektrone emiteeriv kiht, mis on katoodiks. Niisuguse ehitusviisi tõttu suureneb katoodi soojuslik inerts ja katood muutub sõltumatuks küttevoolu allika potentsiaalist.

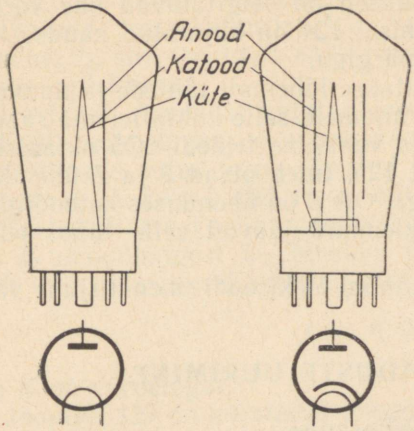
Otsese küttega katood hakkab küllaldaselt elektrone eraldama juba mõni sekund pärast küttevoolu lülitamist. Kaudse kütte puhul hilineb elektronide eraldumine märgatavalt.

Otsese küttega toru kesta läbib kolm juhet: anood ja küttetraadi kaks otsa. Kaudse kütte puhul on vaja nelja juhet: anood, küttetraadi kaks otsa ja katood.

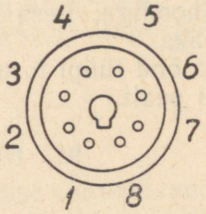
Katoodi kuumutamiseks kasutatakse tavaliselt madalapingelist (1—6 V) alalis- või vahelduvvoolu. Otsese küttega katoodi kuumutatakse peamiselt alalisvooluga ja kaudse küttega katoodi vahelduvvooluga.

Anood on plekist ja elektronide juhtimine katoodilt anoodile toimub nn. *anoodpinge abil*. Selleks ühendatakse katood pingeallika negatiivse ja anood positiivse poolusega. Vastupidisel lülitusel vool toru ei läbi. Anoodpinge suurus on tavaliselt sadasid volte.

Palju laialdasemalt kui dioode kasutatakse kolme, nelja ja rohkema elektroodiga torusid — trioode, tetroode, pentoode jne.



Joon. 122. Otsese ja kaudse küttega dioodi läbilõige ja tingmärgid.

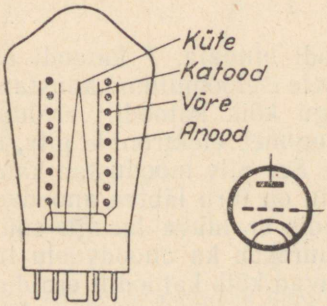


Joon. 123. Oktaalpesa.

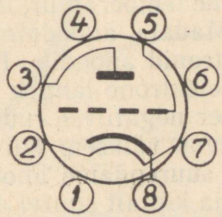
Neis torudes on katoodi ja anoodi vahele paigutatud lisaelektroodid, mida nimetatakse võredeks. Seega on trioodil üks, tetroodil kaks, pentoodil kolm võret jne. Võred valmistatakse aukudega plekist või kruvina mähitud traadist.

Vastavalt elektroodide arvu suurenemisele suureneb ka toru kesta läbivate juhtmete arv. Et hõlbustada mitmesuguste elektrontorude rakendamist, kasutatakse kõigi torude jaoks ühesuguseid standardsokleid, sõltumatult kasutatavate elektroodide arvust. Soklitele vastavad pesad, mis ei võimalda toru valesti pessa asetamist. NSV Liidus kasutatakse enamasti nn. oktaalsokleid ja -pesi.

Oktaalpesa pealtvaates on kujutatud joonisel 123. Pesa keskel on võtmeaugu kujuline ava ja toru soklil samasugune pulk, mistõttu toru mahub pessa ainult ühes asendis. Pesa äärel asub kaheksa nummerdatud kontakti, milledesse mahuvad toru sokli küljes olevad elektroodidega ühendatud jalad.



Joon. 124. Kaudse küttega triood.



Joon. 125. Elektrontoru 6C5 sokli lülitus.

Elektrontoru põhilised omadused on selgitatavad ühe võrega toru — t r i o o d i — abil. Joonisel 124 on kujutatud kaudse küttega triood koos vastava tingmärgiga.

Elektrontorude tüüpe tähistatakse lühemalt tähtede ja numbrite kombinatsioonidega. Lähemaid andmeid selle kohta leiame raadiotehnika käsiraamatuist. Näitena vaatleme trioodi 6C5 oktaalsokli lülitust. Nagu nähtub jooniselt 125, tuleb otsad *2* ja *7* ühendada küttepingega ning *5* võrepingega. Ots *8* on ühenduses katoodiga ja *3* anoodiga. Pesa ülejäänud klemmid jäävad selle tüübi puhul vabaks.

Mõnd tüüpi torudel tuuakse mõni elektroodi ühendusjuhe välja toru pealt.

91. DIOODI OMADUSTE UURIMINE

1. Tööülesanne

Uurida emissioonvoolu tugevuse sõltuvust küttevoolu tugevusest ja anoodvoolu tugevuse sõltuvust anoodpingest.

2. Töövahendid

Uuritav elektrontoru lülitusklemmidega alusel, milliampermeeter anoodvoolu tugevuse mõõtmiseks, voltmeeter anoodpinge mõõtmiseks, reostaat küttevoolu reguleerimiseks, potentsiomeeter anoodpinge reguleerimiseks, kütte- ja anoodpinge allikad ning ühendusjuhtmed.

3. Töö käik

a) Kuumenenud katoodilt ajaühikus eralduvate elektronide arv sõltub katoodi ainest ja temperatuurist. Sekundis eralduvate elektronide laengut, s. o. emissioon- ehk küllastusvoolu tugevust võimaldab praktiliselt küllaldase täpsusega arvutada vene teadlase V. L. Volõnkini poolt antud valem

$$I = SA\ 10^{-\frac{b}{T}},$$

kus S on elektrone emiteeriva katoodi pindala, T katoodi absoluutne temperatuur, A ja b katoodi ainele iseloomulikud konstandid.

Madala anoodpinge puhul ei liigu kõik katoodilt eralduvad elektronid anoodile. Katoodi ümber koguneb elektronide pilv, kust osa elektrone langeb katoodile tagasi. See pilv moodustab katoodi ümber negatiivse ruumlaengu. Seetõttu on toru läbiva anoodvoolu tugevus väiksem kui katoodilt sekundis eralduva laengu suurus. Kui suurendame anoodpinget, siis suureneb ka anoodvoolu tugevus ja küllalt suurel anoodpingel liiguvad kõik katoodilt eralduvad elektronid anoodile. Siis on anoodvoolu tugevus saavutanud oma maksimaalse väärtuse ja võrdub küllastusvoolu tugevusega.

Nagu eelmisest valemist nähtub, sõltub küllastusvoolu tugevus katoodi temperatuurist. Kui suurendame ühtlaselt küttevoolu tugevust I_f, siis suureneb emissioonvoolu tugevus algul aeglaselt, hiljem aga kiiresti.

Vastavat olenevust kujutab joonis 126.

Küttevoolu tugevuse suurendamisel tuleb olla ettevaatlik ja mitte ületada antud torule lubatud piire. Vastasel korral kas sulab küttetraat või rikneb elektrone emiteeriv kiht.

Enne küllastusvoolu saabumist sõltub dioodi anoodvoolu tugevus I_a anoodpingest U_a Moskva ülikooli professori Boguslavski poolt tuletatud valemi kohaselt järgmiselt:

$$I_a = K \sqrt{U_a^3},$$

kus K on võrdetegur.

Joonisel 127 on kujutatud anoodvoolu tugevuse sõltuvus anoodpingest mitmesugustel küttevoolu tugevustel. Neid nimetatakse I_a—U_a tunnuskõverateks.

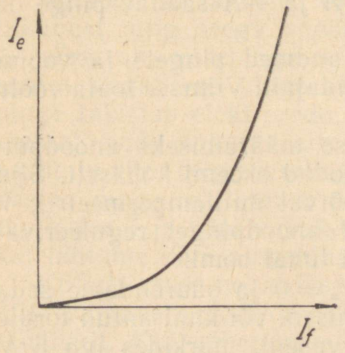
Praktiliselt osutub tunnuskõvera keskosa nii sirgeks, et sellele saab rakendada Ohmi seadust. Kõvera tõusu määrab suhe $\frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$

Selle avaldise pöördväärtus on analoogiline Ohmi seadusega ja määrab toru sisetakistuse R_i:

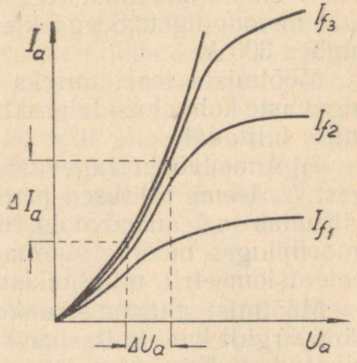
$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Sisetakistus kuulub antud toru iseloomustavate suuruste hulka. Kui tahame sisetakistust avaldada oomides, siis peame anoodvoolu tugevuse avaldama amprites.

b) Emissioonvoolu tugevuse sõltuvuse määramiseks küttevoolu tugevusest teeme lülitused joonisel 128 toodud skeemi koha-



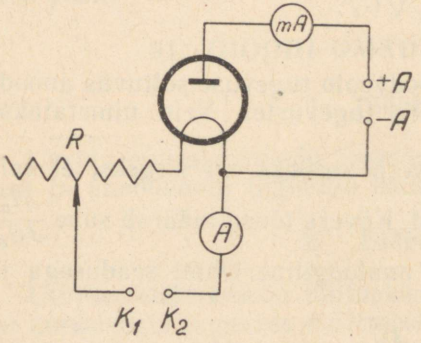
Joon. 126. Emissioonvoolu tugevuse sõltuvus küttevoolu tugevusest.



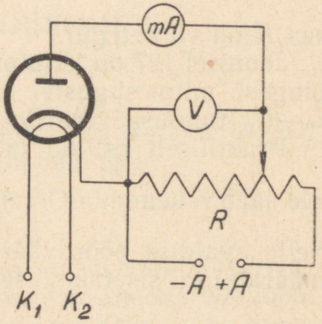
Joon. 127. I_a—U_a tunnuskõverad.

selt, kus A tähendab küttevoolu tugevust mõõtvat ampermeetrit, mA emissioonvoolu tugevust mõõtvat milliampermeetrit ja R küttevoolu tugevust reguleerivat reostaati. Klemmid $+A$, $-A$, K_1 ja K_2 tähendavad järjekorras anoodi, katoodi ja küttepinge klemme, mis ühendatakse kas vastavate patareidega või selleks ette nähtud alaldaja klemmidega.

Alaldaja põhilisteks osadeks on transformaator, diood ja silumisfiilter. Alaldajasse juhime vooluvõrgust vahelduvvoolu ja sealt väljub dioodi abil alaldatud ning filtri abil silutud alalisvool klemmidel $+A$ ja $-A$ elektrontoru anoodahela toiteks ja trans-



Joon. 128. Lülitusskeem emissioonvoolu tugevuse sõltuvuse määramiseks küttevoolu tugevusest.



Joon. 129. Lülitusskeem I_a—U_a tunnuskõvera määramiseks.

formaatori abil madaldatud vahelduvpinge klemmidel K_1 ja K_2 elektrontoru kütteks. Tavaliselt transformeeritakse võrgupinge 220 V enne alaldamist veel üles umbes 350 voldini, et saada suuremat anoodpinget. Seega klemmidelt $+A$ ja $-A$ saadav pinge on umbes 300 V.

Mõõtmiste teostamiseks vajalikud andmed pingete ja voolutugevuste kohta küsida praktikumi juhendajalt! Viimase loata voolu mitte lülitada!

c) Anoodvoolu tugevuse I_a sõltuvuse määramiseks anoodpingest U_a teeme lülitused joonisel 129 toodud skeemi kohaselt. Siin tähendab mA anoodvoolu tugevust mõõtvat milliampermeetrit, V anoodpinget mõõtvat voltmeetrit ja R anoodpinget reguleerivat potentsiomeetrit, mille takistus on mõni tuhat oomi.

Mõõtmist alustame anoodpingest $U_a = 0$ ja suurendame seda järk-järgult kuni küllastusvoolu saabumiseni või kuni antud torule lubatud maksimaalse anoodvoolu tugevuseni, märkides iga 5 V tagant anoodvoolu tugevuse milliamprites. Saadud andmete põhjal konstrueerime millimeetripaberil I_a—U_a tunnuskõvera ja määrame toru sisetakistuse R_i.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas mõjustab katoodi ümber tekkiv ruumlaeng anoodvoolu tugevust?
2. Miks ei hakka kaudse küttega elektrontoru tööle kohe pärast pingete lülitamist?
3. Kuidas tuleb lülitada diood, et selle abil alaldada vahelduvvoolu?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 127.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XV, § 7.

92. TRIOODI OMADUSTE UURIMINE

1. Tööülesanne

Uurida anoodvoolu tugevuse sõltuvust anood- ja võrepingest ning määrata trioodi parameetrid.

2. Töövahendid

Uuritav triood lülitusklemmidega alusel, milliampermeeter anoodvoolu tugevuse mõõtmiseks, voltmeeter anoodpinge mõõtmiseks, potentsiomeeter anoodpinge reguleerimiseks, voltmeeter võrepinge mõõtmiseks, potentsiomeeter võrepinge reguleerimiseks, võrepinge ümberlüliti, anood-, kütte- ja võrepinge allikad ning ühendusjuhtmed.

3. Töö käik

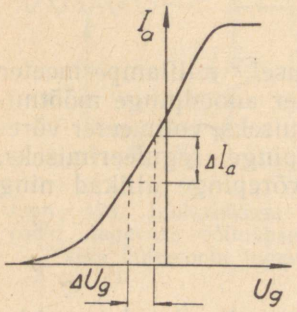
a) Mitmed dioodi seaduspärasused on otseselt rakendatavad ka trioodile. Ka siin kehtivad Volõnkini ja Boguslavski valemid. Täiendavalt tuleb aga tutvuda võre ülesannetega ja sellest tingitud erinevustega.

Katoodi ja anoodi vahel asuv võre mõjustab elektronide liikumist ning seega anoodvoolu. Tavaliselt ühendatakse katood ja võre nn. võrepinge allikaga nii, et võre omandab katoodi suhtes negatiivse pinge (kuni mõnikümmend volti). Negatiivne pinge takistab elektronide liikumist katoodilt anoodile seda tugevamini, mida negatiivsem on võrepinge katoodi suhtes. Sageli ei kasutata võre negatiivseks pingestamiseks eraldi pingeallikat, vaid vastav pinge tekitatakse pinge langusega takistil, mis on lülitatud katoodi ja võre vahele. Küsimuse selgitamine on aga lihtsam, kui lähtume võre pingestamisest patarei abil.

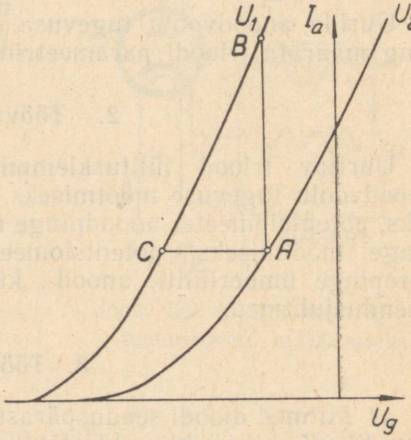
Küllalt suure negatiivse võrepinge puhul tõrjutakse kõik katoodilt eralduvad elektronid katoodile tagasi ja anoodvool puudub täielikult. Kui vähendame võrepinge negatiivsust, siis tekib teatava pinge puhul nõrk anoodvool, mis võrepinge edasisel vähendamisel tugevneb algul aeglaselt, hiljem kiiresti. Kui võrepinge katoodi suhtes on null, siis võre praktiliselt elektronide liikumist

ei mõjusta ja triood töötab dioodina. Kui aga jätta võre üldse ühendamata, siis laadub ta katoodilt eralduvate elektronide toimel varsti negatiivselt ja tõkestab elektronide edasist pääsu anoodile. Võrele antav positiivne pinge kiirendab elektronide liikumist anoodile ja tugevdab seega anoodvoolu. Võrepinge suurendamine positiivses suunas tugevdab küll anoodvoolu, kuid mitte kõik katoodilt eralduvad elektronid ei saabu anoodile, vaid osa neist langeb võrele ja moodustab nn. v õ r e v o o l u. Võrevoolu tugevus suureneb positiivse võrepinge kasvamisel ja lõpuks hakkab anoodvool nõrgenema, sest enamik elektrone langeb võrele.

Negatiivse võrepinge suurus, mis tõkestab täielikult elektronide pääsu anoodile, sõltub toru tüübist ja torule rakendatava anoodpinge suurusest. Mida suurem on anoodpinge, seda negatiivsem peab olema võrepinge anoodvoolu katkestamiseks. Et võre on katoo-



Joon. 130. Anoodvoolu tugevuse sõltuvus võrepingest.



Joon. 131. Läbitavuse määramine.

dile lähemal kui anood, siis mõjustavad võrepinge muutused anoodvoolu tugevust rohkem kui anoodpinge muutused. See omadus põhjustabki võredega elektrontorude laialdast rakendamist. Võrepinge väikeste muutuste abil on võimalik tekitada suuri anoodvoolu tugevuse muutusi.

Joonisel 130 on kujutatud anoodvoolu tugevuse I_a sõltuvus võrepingest U_g mingil konstantsel anoodpingel. Niisuguseid kõveraid nimetatakse I_a—U_g tunnuskõverateks. Kõvera keskosa on küllalt sirge ja selle sirge osa tõusu kasutatakse antud elektrontoru iseloomustamiseks. Suhet $\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = S$ nimetatakse toru tõusuks ja mõõdetakse ühikutes mA/V. Tõus määratakse konstantsel anoodpingel ja küttevoolu tugevusel. Tõus S näitab võrepinge muutuse ja sellele vastava anoodvoolu tugevuse muutuse suhet. Et võrepinge ei vaja praktiliselt voolu ja on oma iseloomult elektrostaatiline, siis toimub anoodvoolu reguleerimine energiakuluta.

Kasutades eelmisest erinevat anoodpinget ja joonestades analoogilise graafiku, leiame, et uus kõver on eelmise suhtes võrepinge telje sihis paralleelselt nihutatud.

Seega saame anoodvoolu tugevust muuta nii võrepinge kui ka anoodpinge muutmisega. Anoodpinge muutus ei pääse aga täiel määral mõjule, sest osa anoodpingega tekitatud elektrivälja tungjoontest suubub võrele ja mõjuma jääb ainult teatav murdosa. Mõjuva osa suurus oleneb võre ehitusest ja võre ning anoodi vahelisest kaugusest, s. o. toru ehitusest, osutudes seega toru iseloomustavaks suuruseks, mida nimetatakse l ä b i t a v u s e k s.

Jooniselt 131 näeme, et anoodpinge suurendamine $\Delta U_a = U_1 - U_2$ võrra suurendab anoodvoolu tugevust punktist A punktini B, s. o. ΔI_a võrra. Seejuures on võrepinge konstantne. Niisama suure muutuse anoodvoolu tugevuses kutsub esile võrepinge muutus ΔU_g, kui anoodpinge U_1 hoiame konstantsena. Viimasel juhul liigume mööda kõverat U_1 punktist C punktini B.

Läbitavuse D määrab seos $D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a}$, kusjuures anoodvoolu tugevus on konstantne.

Läbitavuse pöördväärtust $\frac{1}{D} = \mu$ nimetatakse v õ i m e n d u s t e g u r i k s.

Trioodi iseloomustamiseks on tarvis teada veel sisetakistust R_i, nagu seda nägime juba dioodi puhul. Selleks peame teadma anoodvoolu tugevuse sõltuvust anoodpingest. Trioodi puhul määratakse see mingil konstantsel võrepingel.

Nagu nähtub jooniselt 131, saame sisetakistuse arvutada suhtest $\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = R_i$, kus $\Delta U_a = U_1 - U_2$. Arvutamisel võime näiteks lähtuda joonisel märgitud punktidest A ja B. Nendele punktidele vastav anoodpingete vahe on ΔU_a ja anoodvoolude tugevuste vahe ΔI_a.

Elektrontoru parameetreid määravate suhete võrdlusest näeme, et sisetakistuse R_i, tõusu S ja läbitavuse D korrutis peab võrduma ühega:

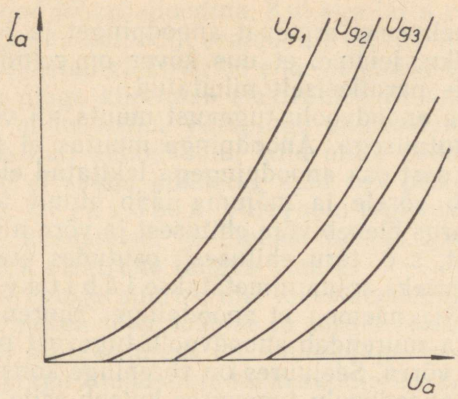
$$R_i \cdot S \cdot D = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \cdot \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} = 1.$$

Viimast seost kasutatakse arvutuste kontrolliks.

Kirjeldatud kõverad I_a ja U_g teljestikus konstantsetel anoodpingetel moodustavad antud elektrontoru I_a—U_g tunnuskõverate sarja.

Elektrontoru parameetrid on arvutatavad ka I_a—U_a tunnuskõverate sarja abil, mille saame, kui kujutame graafiliselt anoodvoolu tugevuse sõltuvuse anoodpingest erinevatel konstantsetel võrepingetel.

Niisuguseid kõveraid kujutab joonis 132, kus $U_{g_1} > U_{g_2} > U_{g_3} \ldots$



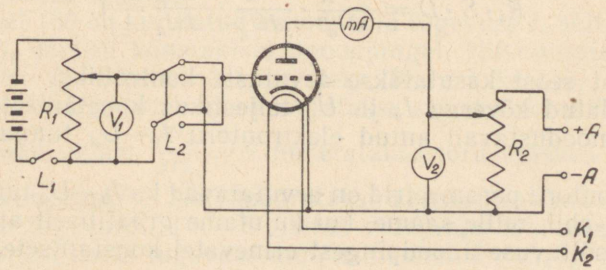
Joon. 132. I_a—U_a tunnuskõverate sari.

b) Tunnuskõverate määramiseks teeme lülitused joonisel 133 esitatud skeemi kohaselt. Joonisel tähendab R_1 võrepinget reguleerivat potentsiomeetrit, L_1 võrepinge lülitit, L_2 võrepinge ümberlülitit, V_1 võrepinget mõõtvat voltmeetrit, R_2 anoodpinget reguleerivat potentsiomeetrit, V_2 anoodpinget mõõtvat voltmeetrit, *mA* anoodvoolu tugevust mõõtvat milliampermeetrit ning $+A$, $-A$, K_1 ja K_2 vastavalt järjekorras anoodpinge positiivset ja negatiivset klemmi ning küttepinge klemme.

Kui lülitused on tehtud, siis tuleb neid lasta kontrollida praktikumi juhendajal!

Kütte- ja anoodpinge lülitamine toimub alaldaja küljes oleva ühise lüliti abil. Umbes minuti möödumisel on elektrontorude (uuritava trioodi ja alaldaja dioodi) katoodid kuumenenud püsiva temperatuurini ja aparatuur on mõõtmiseks valmis.

Anoodvoolu tugevuse sõltuvuse määramiseks anoodpingest reguleerime võrepinge mingile konstantsele negatiivsele väärtusele ning hakkame anoodpinget nullist alates suurendama, registreerides anoodvoolu tugevuse näiteks iga 10 V järel. Anoodpinge suurendamise lõpetame, kui anoodvool on saavutanud antud torule



Joon. 133. Lülitusskeem trioodi tunnuskõverate määramiseks.

lubatud maksimaalse tugevuse. Mõõtmisi kordame vähemalt viiel erineval võrepingel.

Andmed korraldame tabelina ja konstrueerime selle põhjal millimeetripaberil I_a—U_a tunnuskõverad, nagu see on kujutatud joonisel 132.

Anoodvoolu tugevuse sõltuvuse määramiseks võrepingest valime mingi konstantse anoodpinge (näiteks 100 V) ja reguleerime võrepinge nii negatiivseks, et anoodvoolu ei esine. Järk-järgult (näiteks 1 V kaupa) võrepinge negatiivsust vähendades registreerime anoodvoolu tugevuse, mis suureneb võrepinge negatiivsuse vähenemisel. Kui oleme jõudnud võrepingeni null, siis asetame ümberlüliti nii, et võrepinge oleks positiivne, ja suurendame võrepinget positiivses suunas, kuni anoodvoolu tugevus saavutab maksimaalse lubatud väärtuse. Mõõtmisi kordame kirjeldatud viisil veel näiteks pingetel 130, 160, 190 ja 220 volti.

Andmed korraldame tabelina, mille põhjal konstrueerime millimeetripaberil I_a—U_g tunnuskõverate sarja vastavalt joonisele 131.

Graafikute ja tabelite põhjal arvutame R_i, S, D ja μ ning kontrollime, kas $R_i \cdot S \cdot D = 1$.

Mõõtmisandmete tabelite näited:

Anoodpinge U_a	Anoodvoolu tugevus erinevatel võrepingetel				
	U_{g_1}	U_{g_2}	U_{g_3}	U_{g_4}	U_{g_5}
1	.....	.....	.....	.....	.....
10	.....	.....	.....	.....	.....
20	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Võrepinge U_g	Anoodvoolu tugevus erinevatel anoodpingetel				
	U_{a_1}	U_{a_2}	U_{a_3}	U_{a_4}	U_{a_5}
—15	.....	.....	.....	.....	.....
—14	.....	.....	.....	.....	.....
—13	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas ja kuidas on triood rakendatav vahelduvvoolu alaldajana?
2. Kuidas töötab triood võimendajana?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 127.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XV, § 7.

93. TÖID ELEKTRONOSTSILLOGRAAFIGA

1. Tööülesanne

Elektronostsillograafi ehituse ja kasutamisvõimalustega tutvumine.

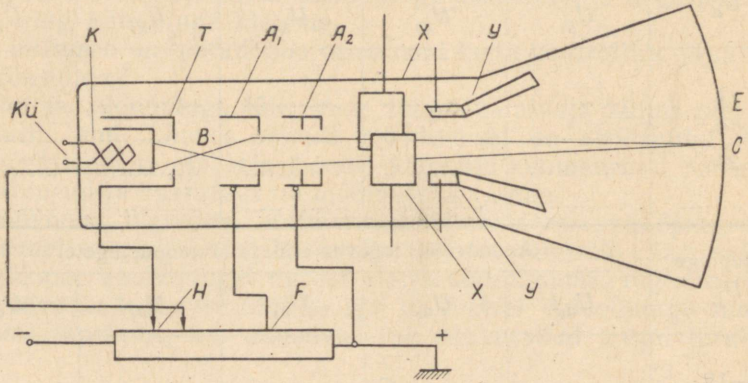
2. Töövahendid

Elektronostsillograaf ЭО-7, vahelduvvoolu voltmeeter 6—30 V, autotrafo ЛАТР-1, kaliibritud helisagedusgeneraator ja helisagedusgeneraator.

3. Töö käik

a) Elektronostsillograafi kasutatakse tänapäeval mitmesuguste probleemide uurimisel. Otseselt on uuritavad elektrilised nähtused. Teisi nähtusi saame elektronostsillograafiga uurida siis, kui need on muundatud elektrilisteks.

Tavalise elektronostsillograafiga saab uurida võnkumisi sageduste vahemikus 2—250 000 Hz; kiireid protsesse, mille kestus ei ületa 25 μs; kahe suuruse vahelist funktsionaalset seost; voolutugevuse ja pinge amplituude ning nendevahelisi faasinihkeid.



Joon. 134. Elektronkiiretoru: K — katood, *Kü* — kütteniit, T — tüüriv elektrood, B — elektronide koondumispunkt, A_1 — esimene anood, A_2 — teine anood, X — vertikaalsed kallutusplaadid, Y — horisontaalsed kallutusplaadid, E — fluorestseeriv ekraan, C — fokuseerumispunkt, F — fokuseerimise juhtimine, H — heleduse juhtimine.

Protsesside uurimisel tekitame ostsillograafi ekraanil kõvera, mis kujutab uuritava suuruse ajalist muutumist.

Tööstuslikult toodetav elektronostsillograaf ЭО-7 koosneb elektronkiiretorust, alaldajast kõikide ostsillograafi osade toiteks, muudetava sagedusega kallutuspinge generaatorist ning uuritavate pingete võimendajatest X- ja Y-teljel.

Elektronostsillograafi põhiliseks osaks on elektronkiiretoru. Siin tutvume nn. elektrostaatilise toruga, mille puhul elektronide tüürimine toimub elektriväljade abil.

Elektronkiiretoru ehitus on järgmine (joon. 134). Elektronide allikaks on kaudse küttega katood *K*. Katoodi kütteniiti *Kü* ümbritseva metallsilindri esipinnale on kantud leelismuldmetallide (Ba, Sr jt.) oksüüdide kiht, mis kuumendatult eraldabki elektrone. Katoodi ümbritseb väikese avaga varustatud tüüriv elektrood *T*, millele antakse väike negatiivne pinge. Mida suurem on see pinge, seda vähem elektrone läbib ava. Muutes elektroodi *T* negatiivset pinget, muudame silindri pinnalt eralduvate elektronide arvu, millest sõltub toru fluorestseerival ekraanil *E* tekkiva elektronkiire jälje *C* heledus.

Elektroodid A_1 ja A_2 moodustavad anoodide süsteemi ja neile antakse kõrge (800—6000 V) positiivne pinge. Elektrivälja toimel, mis tekib katoodile, tüürivale elektroodile *T* ja esimesele anoodile A_1 rakendatud pinge tõttu, koonduvad katoodi pinnalt eraldunud elektronid pärast tüüriva elektroodi ava läbimist punkti *B* esimese anoodi lähedal. Pärast punkti *B* elektronkiirte kimp laieneb, sest väljatugevus esimese anoodi sees on lähedane nullile. Esimese ja teise anoodi vahel kõverdab väli uuesti elektronide trajektoore, lähendades neid toru teljele, ja elektronkiirte kimp fokuseerub ekraanil punktis *C*. Anoodid annavad elektronidele küllaldase kiiruse, et tekitada fluorestseerival ekraanil helendust, ja koondavad elektronide kimbu ekraanil väikeseks täpikeseks. Nende elektroodide toimet elektronkiirte kimbule võib võrrelda optiliste läätsede mõjuga valguskiirtele. Seepärast nimetatakse vastavaid elektriväljade süsteeme elektronoptilisteks läätsedeks.

Kogu kirjeldatud süsteemi, mis koosneb katoodist, tüürivast elektroodist ja anoodidest, nimetatakse elektronkahuriks.

Fluorestseeriv aine, mis on kantud toru klaasi sisemisele küljele, hakkab helendama temale sattuvate kiiresti liikuvate elektronide toimel. Seda nähtust nimetatakse katoodluminestsentsiks. Kiiresti liikuvad elektronid löövad ekraanist välja nn. sekundaarelektrone, mis lendavad anoodile A_2 ja sulevad seega vooluahela. Kui sekundaarelektronide emissioon puuduks, siis omandaks ekraan kiiresti sellise negatiivse pinge, et katoodilt eraldunud elektronid ei suudaks enam lennata ekraanile.

Elektronkiirte tee ja seega ka fokuseerumispunkti asukoha muutmiseks on torus kaks omavahel risti asetatud kallutusplaatide paari: vertikaal- ehk *X*-plaadid ja horisontaal- ehk *Y*-plaadid.

Kallutusplaatide paari pingestamisel tekib plaatide vahel elektriväli, mille toimel elektronkiirte kimp hälbib oma algsuunast. Hälve on võrdeline plaatidevahelise pingega. *X*-plaatide pingestamisel kaldub kiirte kimp horisontaalsuunas, *Y*-plaatide pingestamisel aga vertikaalsuunas.

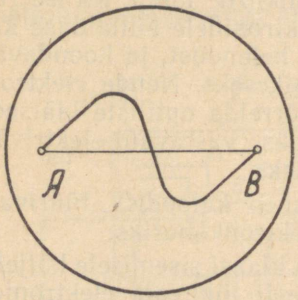
Andes ühele plaatide paarile võrdlemisi kiire (sagedus vähemalt

10 Hz) vahelduvpinge, näeme ekraanil helendavat vertikaal- või horisontaalsirget sõltuvalt sellest, kumb plaatide paar on pingestatud.

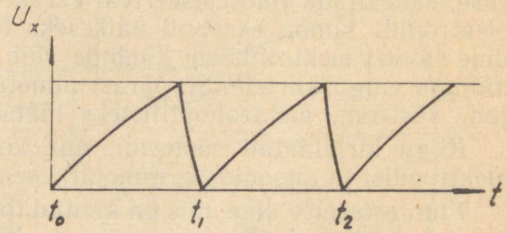
Kui pingestame mõlemad plaatide paarid vahelduvpingega, siis ilmub ekraanile kõver, mis vastab kahe ristsihilise pingekõvera liitumisele. Siinuseliste pingete liitumise tulemuseks on nn. Lissajous' kujundid.

Anname X-plaatidele hetkel t_0 pinge U_x, mis muutub lineaarselt ajaga, s. o. $\frac{dU_x}{dt} = \text{const}$. Sel juhul valgustäpp liigub ekraanil jääva kiirusega $\left(\frac{dy}{dt} = \text{const.}\right)$ horisontaalsuunas. Kui Y-plaatidele anname samal hetkel t_0 uuritava pinge $U(t)$, siis näeme ekraanil pingele $U(t)$ vastavat kõverat sõltuvalt ajast ajavahemikus t_0 kuni t_1, kus t_1 on ajahetk, mil valgustäpp jõuab ekraani äärele.

Kui $U(t)$ on perioodiliselt muutuv funktsioon perioodiga $T = t_1 - t_0$, siis sundides kiirt hetkel t_1 kiiresti tagasi kalduma algasendisse A (joon. 135) ja korrates kallutamist jääva kiirusega kuni punktini B, näeme ekraanil suuruse $U(t)$ muutumist teisel perioodil.



Joon. 135. Uuritava funktsiooni käigukõver ekraanil.



Joon. 136. Hammaspinge.

Teostades korduvalt sellist kallutamist, näeme ekraanil funktsiooni $U(t)$ muutumise liikumatut pilti ühe perioodi vältel, kui täpi liikumise aeg $t_1 - t_0$ ekraanil punktist A punkti B võrdub funktsiooni $U(t)$ perioodiga. Kui $t_1 - t_0 = nT$, kus n on täisarv, siis saame ekraanil suuruse $U(t)$ muutumise n perioodi.

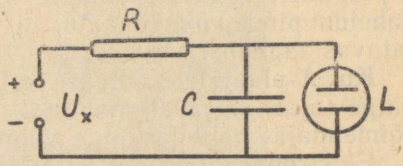
Liikumatu kujutise tekkimiseks ekraanil on tarvilik, et valgustäpi liikumise aeg ekraanil oleks uuritava pinge perioodi kordne ja et X-plaatidele antav pinge valgustäpi jõudmisel punkti B väheneks algsuuruseni. Sellele nõudele vastab nn. hammaspinge perioodiga $t_1 - t_0$ (joon. 136). Pinge aeglase tõusu vältel toimub kõvera kujutumine ekraanil ja järsu languse ajal tuuakse elektronkiir algasendisse tagasi.

Kui hammaspinge ja uuritava pinge perioodid on võrdsed ja uuritav pinge kordub täpselt, siis saame ekraanil seisva kujutise. Kui need tingimused ei ole täidetud, siis liigub kujutis ühes või teises suunas.

Hammaspinge saamiseks on ostsillograafi monteeritud kallutuspinge generaator. Lihtsaima hammaspinge generaatori skeem on kujutatud joonisel 137. Pinge lülitamisel laadub kondensaator C ja pinge kondensaatoril tõuseb eksponentsiaalselt seaduse

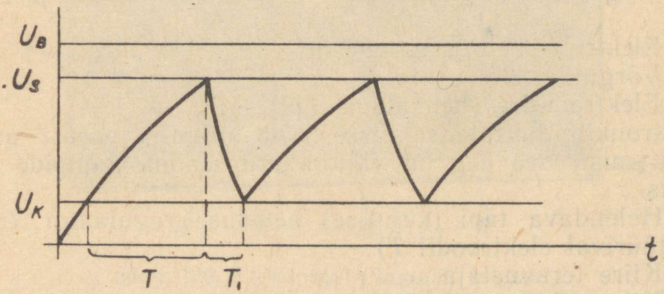
$$U = U_B\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

järgi, kus U ja U_B on vastavalt kondensaatori ja pingeallika pinged, R takistus, C kondensaatori mahtuvus, t lülitamisest möödunud aeg ja e naturaallogaritmide alus.



Joon. 137.. Hammaspinge generaator.

Pinge tõus lakkab huumlambi L süttimispinge U_s saabumisel. Lambi süttimisel tema takistus langeb järsku ja kondensaator tühjeneb läbi huumlambi. Pinge kondensaatoril langeb eksponentsiaalselt kuni huumlambi kustumispingeni U_k. Pärast lambi kustumist algab kondensaatori laadumine uuesti. Sel viisil saame ligikaudu hammaspinge (joon. 138), kus üksikud pingekõvera lõigud



Joon. 138. Joonisel 137 kujutatud skeemi abil tekitatud hammaspinge.

on eksponentsiaalkõverad. Kui $R \gg R_i$, kus R_i on süttinud huumlambi sisetakistus, siis pinge tõusu ajavahemik T on märgatavalt suurem languse ajavahemikust T_1.

Skeemi parameetrite vastava valikuga on võimalik saavutada olukorda, kus teatavas sagedusvahemikus eksponentsiaalkõvera lõigud on väga lähedased sirglõikudele. Siis on võimalik uuritavat kõverat saada ekraanil moonutuseta.

Sirglõikudega hammaspinge saamiseks laias sagedustevahemikus kasutatakse kallutuspinge generaatoris keerukamaid lülitusi, kuid nende põhimõte on siiski sama.

Alaldajatena kasutatakse tavaliselt kenotrone või pooljuhtalaldajaid. Anoodile antav pinge sõltub toru konstruktsioonist ja on 800—6000 V. Sama alaldaja abil pingestatakse ka toru teised elektroodid.

Kallutusgeneraatori ja võimendajate toiteks on ostsillograafis tavaliselt teine alaldaja.

Enamikul ostsillograafidel on kaks võimendajat eraldi *X*- ja *Y*-plaatidele antavate pingete võimendamiseks. Need on tavalised vahelduvpinge võimendajad, mis võimendavad ühtlaselt kogu kasutatavas sagedusribas.

Kui *X*-plaatidele antakse kallutuspinge generaatorilt hammaspinge (ajast sõltuvate nähtuste uurimisel), siis kasutatakse *X*-telje võimendajat hammaspinge võimendamiseks.

Elektronostsillograafi ЭО-7 üksikosad on monteeritud metallkastis asuvale šassiile ja juhtimisseadised on välja toodud esiplaadile.

Kiirte kõrvalekalde mõõtmise hõlbustamiseks võib ekraani ette asetada 2-millimeetriste jaotistega ruutvõrgu läbipaistval tselluloidil.

Ostsillograafil on ka sünkronisatsiooniseadis. Sünkronisatsiooniks nimetatakse elektrilist lülitust, mille abil hoitakse sageduste suhe konstantne. Sünkronisatsiooniseadise abil hoitakse uuritava pinge ja hammaspinge sageduste suhe konstantne, mis võimaldab ekraanil saada liikumatut kujutist.

Ostsillograafi ЭО-7 esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid:

1. Elektronkiiretoru ekraan.

2. Võrgulüliti.

3. Elektronkiire (helendava täpi) lüliti.

Elektronkiir lülitatakse sisse 2—3 minutit pärast aparaadi sisselülitamist. See aeg on vajalik toiteseadme lampide kuumenemiseks.

4. Helendava täpi (kujutise) heleduse regulaator (muudab pinget tüürival elektroodil *T*).

5. Kiire teravustaja.

6. Kiire nihutaja *Y*-teljel.

7. Kiire nihutaja *X*-teljel.

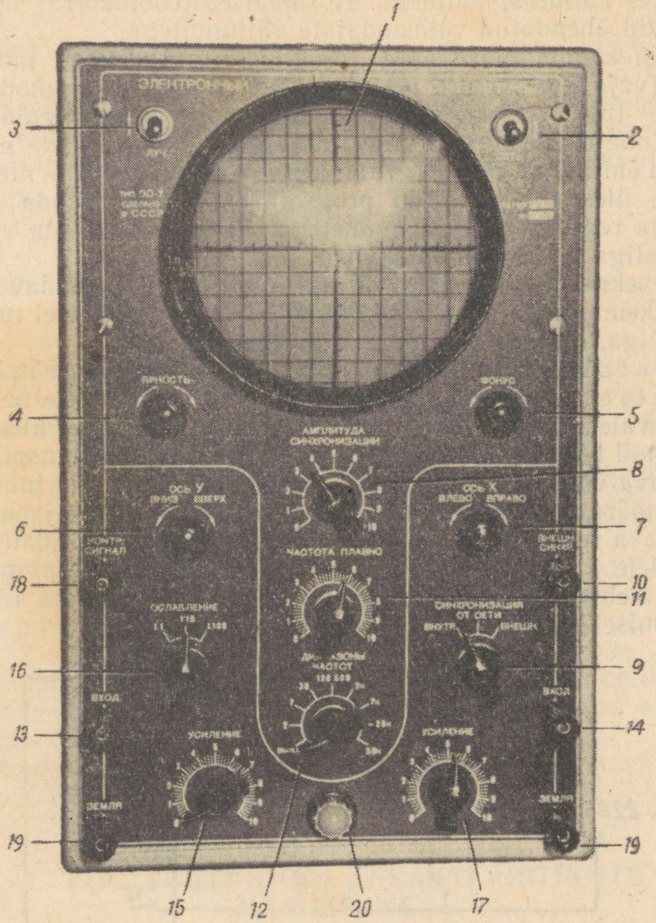
8. Sünkroniseeriva pinge amplituudi regulaator kõikide sünkronisatsiooniliikide jaoks.

9. Sünkroniseerivate pingeallikate ümberlüliti: sünkronisatsioon välisest pingeallikast, sünkronisatsioon võrgust ja sisemine sünkronisatsioon kallutusgeneraatori ahelast.

10. Klemm välise sünkronisatsiooni ühendamiseks.

11. Kallutuspinge pidev reguleerija.

12. Kallutuspinge generaatori sageduse astmeline lüliti 2 Hz kuni 50 KHz. Kui lüliti on näiteks asendis *7*, siis kallutuspinge pidev reguleerija *11* katab vahemiku 7 Hz kuni 30 Hz (arv paremal) jne. Asendis «выкл.» on kallutuspinge generaator välja lüli-



Joon. 139. Elektronostsillograafi esiplaat.

tatud ja *X*-teljele antav signaal antakse võimendaja kaudu *X*-kallutusplaatidele.

13. *Y*-telje klemmid } uuritava pinge ühendamiseks.
14. *X*-telje klemmid }

15. *Y*-telje võimendaja võimenduse pidev regulaator.
16. *Y*-telje võimendaja võimenduse astmeline regulaator.
17. *X*-telje võimendaja võimenduse pidev regulaator.
18. Kontrollsignaali klemm (50 Hz ja 2,5 V).
19. Maandusklemmid.
20. Signaallamp.

Ostsillograafi tagaseinal on klemmlaud, mille klemmid on otse-

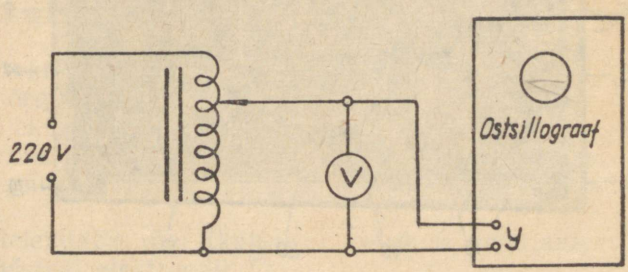
ühenduses kallutusplaatidega. Normaalses tööolukorras on kallutusplaadid ühendatud võimendajate väljunditega.

Samal klemmlaual asuvad klemmid kiire heleduse moduleerimiseks (vajaduse korral). Normaalses tööolukorras on modulaator, heledust tüüriv elektrood, ühendatud heleduse regulaatoriga.

b) Enne ostsillograafi võrku lülitamist tuleb tutvuda elektronkiiretoru ehitusega, ostsillograafi kirjeldusega ja lülitite ning regulaatorite ülesannetega. Töö protokolli tuleb joonistada esiplaat lülitite ja regulaatorite tähendustega. Alles pärast seda võib ostsillograafiga tutvuda tööolukorras.

Toru ekraani riknemise vältimiseks ei tohi helendavat täppi hoida pikemat aega ühel ja samal kohal. Samal põhjusel tuleb töötada täpiga, mille heledus on võimalikult väike.

c) Ostsillograafi tundlikkuse määramine *X*- ja *Y*-teljel. Ostsillograafi tundlikkuseks nimetatakse helendava täpi kõrvalekallet ekraanil millimeetreis vastavatele klemmidele rakendatud 1-voldise pinge mõjul. Et pinge satub kallutusplaatidele muudetava võimendusteguriga võimendaja kaudu, siis tuleb tundlikkus määrata vähemalt 10 erineva võimendusastme jaoks, muutes vastava regulaatori asendit. Katsetamisel ei tohi ostsillograafi klemmidele *13* antav pinge ületada 5—6 V. Kallutuspinge generaator tuleb selle ülesande teostamisel välja lülitada. Lülitused teha joonisel 140 antud skeemi järgi.



Joon. 140. Lülitusskeem ostsillograafi tundlikkuse määramiseks.

Tundlikkuse määrame valemi

$$\gamma_y = \frac{L}{2\sqrt{2}U_y}$$

järgi, kus L on helendava joone pikkus ekraanil ja U_y efektiivpinge amplituud Y-klemmidel (mõõdab voltmeeter). Et $U_y = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, siis $U_m = \sqrt{2}U_y$ on vahelduvpinge amplituud. Kordaja 2 on tingitud sellest, et pikkus L vastab kahekordsele pinge amplituudile.

Tundlikkuse määramiseks X-teljel lülitame pinge klemmidele *14*

ja muudame võimendust regulaatoriga *17* (lüliti *12* asendis «выкл.»).

d) Helisagedusgeneraatori pinge mõõtmine mitmel sagedusel (20, 100, 500, 1000, 5000 ja 15 000 Hz). Lülitame mõõdetava pinge *X*-telje klemmidele ja mõõdame helendava joone pikkuse millimeetrites. Olles enne seda määranud ostsillograafi tundlikkuse, arvutame otsitava pinge amplituudi valemi

$$U_x = \frac{L}{2\sqrt{2}\gamma_x}$$

järgi. Mõõtmiste kestel tuleb kontrollida ka uuritava pingekõvera kuju.

e) Lissajous' kujundite uurimine. Andes *X*-teljele pinge helisagedusgeneraatorilt ja *Y*-teljele võrgusageduspinge 3—4 V autotrafolt, saame ekraanil liikumatud Lissajous' kujundid vastavalt sageduste suhtele 1 : 1, 1 : 2, 2 : 3, 1 : 3 ja 1 : 5. Seejärel lülitame *Y*-teljele teise helisagedusgeneraatori ja kaliibrime selle skaala hertsides esimese helisagedusgeneraatori skaala järgi, kasutades selleks Lissajous' kujundite tabelist kujundeid sageduste suhtega 1 : 1 ja 1 : 2.

f) Ostsillograafi kallutuspinge generaatori kaliibrimine kaliibritud helisagedusgeneraatori abil. Kaliibrimine teostada kallutuspinge generaatori lüliti *12* 3.—5. asendis ja reguleerija *11* kõigis kümnes asendis.

Kallutuspinge generaatori sagedus on võrdne helisagedusgeneraatori sagedusega siis, kui ostsillograafi ekraanil on sinusoidi üks täisperiood.

Vaatluste teostamisel peab sünkronisatsioon olema välja lülitatud (lüliti *9* asendis «внешн.»).

94. POOLJUHTDIOODI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Mõõta pooljuhtdioodi pärisuunaline ja vastassuunaline takistus mitmesugustel voolutugevustel (mitmesugustel pingetel) ja kujutada saadud andmete põhjal graafiliselt takistuse olenevus voolutugevusest (pingest).

2. Töövahendid

Pooljuhtdiood, peegelgalvanomeeter tundlikkusega $10^{-9}\ \frac{A}{mm/m}$, galvanomeetrile vastav šunt 1 : 10 : 100 : 1000, takistusmagasin 10^4 Ω, pingejagaja-takistusmagasin 1 : 10^5, pingeallikas 1—2 V, milliampermeeter 0,1—1000 mA šuntidega, millivoltmeeter eeltakistitega 0,1—100 V, kaks lükatreostaati 100 Ω, 1 A.

3. Töö käik

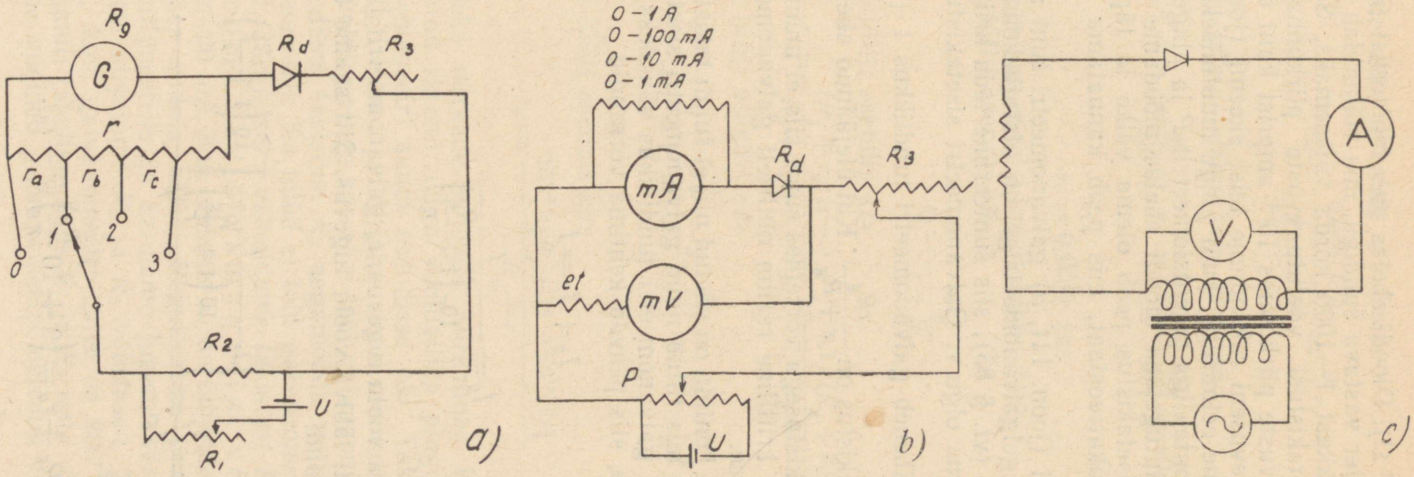
Tänapäeva tehnika võimaldab valmistada pooljuhte, milledel on põhiliselt kas elektrooniline juhtivus või aukjuhtivus. Parimad lähtematerjalid selleks on puhas germaanium (Ge) ja puhas räni (Si). Mõlemad elemendid asuvad Mendelejevi elementide tabeli neljandas rühmas. Kui lisada neile mõnda viienda rühma elementi (näiteks Sb, As) kontsentratsiooniga ca 10^{-6}, siis suureneb nende juhtivus mitu järku. Voolukandjateks on sel juhul elektronid. Selliseid pooljuhte nimetatakse elektroonilisteks pooljuhtideks ehk n-tüüpi pooljuhtideks («n» vihjab sellele, et voolukandjateks on negatiivsed elektronid). Kui aga puhtale germaaniumile või ränile lisada mõnda kolmanda rühma elementi (Ga, In) kontsentratsiooniga ca 10^{-6}, siis suureneb nende juhtivus samuti mitu järku, kuid katse näitab, et voolukandjad on sel korral positiivsed, mistõttu selliseid pooljuhte nimetatakse p-tüüpi pooljuhtideks. Teooria seletab seda nähtust sellega, et lisand võtab enesele germaaniumilt ühe elektroni. Selle elektroni olek germaaniumi elektronide energeetilises tsoonis (mis puhtal germaaniumil on täielikult elektronidega täidetud) jääb vabaks, s. o. germaaniumi elektronide olekutesse tekib «auk», mida teised tsooni elektronid kasutavad kiirenemiseks elektrivälja mõjul. Kui vaadelda täpsemalt, kuidas üks elektron elektrivälja mõjul kiirenedes läheb oma energeetilisest olekust vabaks jäänud olekusse, s. o. «auku», ning järgmine elektron kiireneb, minnes esimese elektroni vabanenud olekusse, siis selgub, et selline «auk» käitub täpselt nii nagu positiivse laenguga elektron.

Kui valmistame pooljuhi nii, et näiteks tema parempoolne osa on n-tüüpi ja vasakpoolne osa p-tüüpi, siis üleminekukiht laseb ühes suunas (pärisuunas) voolu kergesti läbi. Pärisuunaline vool on selline, mille suund on p-tüüpi pooljuhist n-tüüpi pooljuhti. Vastassuunalisele voolule on p—n üleminek väga suureks takistuseks.

Pooljuhtdioodi töö põhinebki p—n üleminekukihi (lühemalt: tõkkekihi) omadusel lasta voolu ühes suunas (pärisuunas) läbi võrdlemisi kergesti, vastassuunas aga praktiliselt tõkestada voolu. Tõkkekihi takistus erisuunalistele vooludele on seega erinev. See takistus oleneb mitte üksnes voolu suunast, vaid ka tugevusest. Käesoleva töö ülesandeks ongi määrata tõkkekihi takistuse olenevus voolu suunast ja tugevusest.

Et me peame mõõtma dioodi läbiva voolu tugevuse ja samaaegselt ka takistuse, siis ei ole mõtet takistust mõõta sillaga, vaid lülitame ta vooluahelasse nii, et saaksime mõõta voolutugevuse ja pinge dioodi ahelas. Nendest andmetest saame arvutada ka takistuse.

Lülitusskeem on esitatud joonisel 141, *a*. Pinget anname dioodi ahelasse pingejagajast, mille takistused on täpselt teada. Takistus R_2 on 0,1—0,01 Ω. Takistus R_1 on muudetav 100 oomist 10 000 oomini (täpne takistusmagasin). Takistus R_3 on samuti takistus-



Joon. 141. a) Lülitusskeem takistuste mõõtmiseks voolutugevuste piirkonnas 10^{-9}—10^{-4} A; b) lülitusskeem takistuste mõõtmiseks voolutugevuste piirkonnas 10^{-4}—1 A; c) lülitusskeem kadude teguri mõõtmiseks.

magasin (kuni 10^4 Ω). Dioodi ahelas olev mõõteriist G on tundlik peegelgalvanomeeter vastava šundiga, mis võimaldab muuta galvanomeetri tundlikkust 1—1000 korda väiksemaks. Sellise skeemiga mõõdame takistusi voolutugevuste piirkonnas 10^{-9} — 10^{-4} A. Voolutugevuste piirkonnas 10^{-4} amprist kuni dioodi maksimaalse voolutugevuseni rakendame teist skeemi (joon. 141, *b*), mis on analoogiline eelmisega, kuid pinge muutmiseks kasutame siin tavalist liugkontaktiga potentsiomeetrit P ja pinget mõõdame voltmeetriga. Voolutugevust dioodi ahelas mõõdame milliampermeetriga, mille sisetakistus peab olema väike ja täpselt teada. Takistus R_3 on lükatreostaat, mis peab kannatama voolu kuni 1 amper.

Esimese skeemi (joon. 141, *a*) galvanomeetri šunt arvutatakse järgmiselt. Et peegelgalvanomeetriga on otstarbekohane töötada kriitilises režiimis (vt. § 83), siis šunteerime teda kriitilise takistusega, mille suurus olgu r. Galvanomeetri sisetakistus olgu R_g. Selle tagajärjel väheneb galvanomeetri tundlikkus $1+\frac{R_g}{r}$ korda ja süsteemi kogutakistus on $\frac{rR_g}{r+R_g}$. Kui ülejäänud ahelaosa takistus on kriitilise takistusega võrreldes suur, siis ei muutu šunteeritud galvanomeetri kriitiline režiim oluliselt galvanomeetri lülitamisel mõõteahelasse.

Šundi järgmine kontakt on võetud nii, et šundi takistus väheneb takistuse r_a võrra, mis liitub nüüd galvanomeetri sisetakistusega.

Kui tahame, et galvanomeetri tundlikkus väheneks esialgsega võrreldes 10 korda, siis peavad kehtima võrrandid

$$I_g+I_š=I \tag{1}$$

ja

$$I_g=\frac{I}{10\cdot\left(1+\frac{R_g}{r}\right)}, \tag{2}$$

kus I on mõõdetava voolu tugevus, I_g galvanomeetrit läbiva voolu tugevus ja $I_š$ šunti läbiva voolu tugevus. Siit saame takistuse r_a arvutamiseks võrrandi

$$\frac{R_g+r_a}{r-r_a}=\frac{I_š}{I_g}=\frac{\left[I-\frac{I}{10\left(1+\frac{R_g}{r}\right)}\right]\cdot 10\left(1+\frac{R_g}{r}\right)}{I}. \tag{3}$$

Teisendades saame:

$$R_g+r_a=\left(9+10\frac{R_g}{r}\right)(r-r_a). \tag{4}$$

Lahendame selle võrrandi r_a suhtes:

$$r_a = \frac{9(r+R_g)}{10\left(1+\frac{R_g}{r}\right)} = \frac{9}{10}r. \tag{5}$$

Analoogia põhjal võime kohe kirjutada:

$$r_a + r_b = \frac{99}{100}r; \quad r_b = \left(\frac{99}{100} - \frac{9}{10}\right)r = 0{,}09r, \tag{6}$$

samuti

$$r_c = 0{,}009r \text{ jne.} \tag{7}$$

Šundi ja galvanomeetri kogutakistus (r_n):

a) šundi lüliti asendis «*0*»

$$r_0 = \frac{rR_g}{r+R_g}; \tag{8}$$

b) šundi lüliti asendis «*1*»

$$r_1 = \frac{(R_g+r_a)(r-r_a)}{R_g+r_a+r-r_a} = \frac{0{,}1\,r\,(R_g+0{,}9\,r)}{R_g+r}; \tag{9}$$

c) šundi lüliti asendis «*2*»

$$r_2 = \frac{(R_g+r_a+r_b)(r-r_a-r_b)}{R_g+r_a+r_b+r-r_a-r_b} = \frac{0{,}01\,r(R_g+0{,}99\,r)}{R_g+r}; \tag{10}$$

üldiselt:

d) šundi lüliti asendis «*n*»

$$r_n = \frac{10^{-n}\,r\,[R_g+(1-10^{-n})\,r]}{R_g+r}. \tag{11}$$

Mõõtmiseks nõrkade voolude piirkonnas koostame joonisel 141, *a* esitatud skeemi. Olgu vooluallika pinge U (1—2 volti). Viime galvanomeetri šundi asendisse «*3*». Takistused R_1 ja R_3 võtame maksimaalsed ja lülitame sisse vooluallika pinge. Vooluallika 1—2-voldise pinge korral ei tohi galvanomeeter hälvet anda. Nüüd vähendame takistust R_3 aegamööda nullini, jälgides kogu aeg galvanomeetrit. Ka nüüd ei tohi galvanomeeter anda märgatavat hälvet. Järgmiseks vähendame takistust R_1, kuid mitte alla 100 oomi. Takistusmagasini võib koormata ainult 10—20 mA. Kui takistus R_1 on tuhande oomi piires, peab galvanomeeter andma hälbe. Reguleerime galvanomeetri hälbe 250—300 millimeetrile ja kanname lugemi vastavasse tabelisse. Samasse ritta kirjutame R_1 ja R_3 väärtused. Nüüd suurendame takistust R_3, kuni galvanomeetri hälve on 200 mm. Selle lugemi kanname samuti tabelisse koos R_1 ja R_3 uute väärtustega. Samal viisil võtame andmed galvanomeetri hälvetel 100, 50 ja 30 mm.

Kui takistust R_3 enam suurendada ei saa, siis tuleb suurendada takistust R_1. Kui 30-millimeetrise hälbe puhul on andmed fikseeritud, siis tuleb üle minna galvanomeetri tundlikumale piirkonnale. Üleminekuks tuleb välja lülitada kas pingeallikas või galvanomeeter ja alles siis viia šundi lüliti uude positsiooni (*1*). Galvanomeeter peab seejuures uuesti näitama ligi 300 mm. Samade hälvete puhul nagu eespoolgi kanname tabelisse R_1 ja R_3 väärtused. Samuti talitame šundi teise ja kolmanda positsiooni korral. Kui andmed on võetud, lülitame pingeallika välja, muudame dioodi suunda ja alustame mõõtmistega jälle otsast peale. Kui andmed on kõik saadud, arvutame nendest dioodi takistuse ja voolutugevuse. Voolutugevuse arvutame galvanomeetri konstandist ja šuntide vahekorrast:

$$I_n = 10^{-n}\left(1 + \frac{R_g}{r}\right) C_i, \tag{12}$$

kus C_i on galvanomeetri konstant A/mm/m, n šundi asend, R_g galvanomeetri sisetakistus ja r galvanomeetri kriitiline välistakistus.

Kogu ahela takistuse saame Ohmi seadusest:

$$I_n = \frac{U}{R_d + R_2 + r_n + R_3}, \tag{13}$$

kus R_d on dioodi takistus, R_2 pingejagaja osa takistus (et see on väike, siis võib selle teiste takistuste kõrval tähele panemata jätta), r_n šundi ja galvanomeetri kogutakistus šundi lüliti asendis «*n*» [antud valemitega (8), (9), (10) ja (11)], I_n mõõdetud voolutugevus šundi lüliti asendis «*n*» ja $U = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$ pingejagajast saadav pinge (U_1 on pingeallika pinge). Viimane valem kehtib küllaldase täpsusega, kui pingeallika sisetakistus ja samuti takistus R_2 on takistusega R_1 võrreldes väike.

Seega

$$R_d = \frac{U}{I_n} - r_n - R_3 = \frac{U_1}{I_n} \cdot \frac{R_2}{R_1} - r_n - R_3. \tag{14}$$

Valemitest (12) ja (14) arvutame voolutugevuse ja dioodi takistuse ning kanname saadud väärtused samasse tabelisse. Tabel võiks olla järgmine:

Šundi lüliti asend	Galvanomeetri hälve	R_1	R_3	U	I_n	R_d
3	300	.....	.....	.....	.....	.....
3	200	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Galvanomeetri sisetakistus $R_g = \ldots\ldots \Omega$.
Galvanomeetri kriitiline välistakistus $R = \ldots\ldots \Omega$.
Galvanomeetri voolukonstant $C_i = \ldots\ldots \frac{A}{mm/m}$.
Takistus $R_2 = \ldots\ldots \Omega$.

Mõõtmiseks voolutugevuste piirkonnas 10^{-4} — 1 A koostame joonisel 141, *b* esitatud skeemi. Selles skeemis tuleb kasutada šuntidega milliampermeetrit mõõtepiirkondadega kuni 1 mA, 10 mA, 100 mA ja 1 A. Kui voltmeeter mõõdab pingelangust dioodil ja milliampermeetril nii, nagu on kujutatud skeemil, siis peame dioodi takistuse arvutamisel arvesse võtma milliampermeetri ja šundi takistused. Voltmeetriks peab olema millivoltmeeter eeltakistitega, mis võimaldavad laiendada mõõtepiirkonda kuni 100 voldini (germaaniumdioodi korral). Mõõtmist alustame ligikaudu samast voolutugevusest, millega varem lõpetasime. Mõõteriistade igas mõõtepiirkonnas võtame 4—5 punkti. Andmed kanname järgmisse tabelisse:

Pinge U	Voolutugevus I	Kogutakistus R	Milliampermeetri takistus r_n	Dioodi takistus R_d
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....

Milliampermeetri ja šundi kogutakistused arvutame valemist

$$r_n = 10^{-n} R_{mA},$$

kus 10^n on milliampermeetri piirkonna laiendamise tegur ja R_{mA} milliampermeetri takistus. Kui r_n on alla 1% kogutakistusest, siis võime ta arvestamata jätta.

Mõõtmised tuleb teostada dioodi mõlema suuna puhul.

Saadud tabeli andmetel koostame graafiku logaritmilises mastaabis. Selleks on kõige otstarbekohasem tabelisse kirjutada takistuse ja voolutugevuse kolmekohalised kümnendlogaritmid.

Lõpuks arvutame dioodi kadude teguri töötamisel voolualaldajana kolmel kindlal pingel, näiteks 10^{-3} V, 1 V ja 10 V. Kadude tegurit defineerime kui kahjulike võimsuste jagatist kasuliku võimsusega:

$$K = \frac{\frac{1}{2}\left(I'U + \frac{U^2}{R_d}\right)}{\frac{1}{2}\left(IU - \frac{U^2}{R_d}\right)}, \qquad (15)$$

kus U on alaldatav pinge, I ja R_d voolutugevus ja dioodi takistus pärisuunas ning I' voolutugevus vastassuunas. Valem kehtib täisnurksete vooluimpulsside puhul.

Kui dioodi kaod on üle ühe vati, siis saab neid küllaldase täpsusega mõõta suhteliselt lihtsal kalorimeetrilisel teel. Selleks koostame alaldusskeemi vahelduvvoolule (joon. 141, *c*). Dioodile tuleb luua normaalsed töötingimused, s. t. valida koormistakistus R ja pinge U (pöördtrafo abil) nii, nagu on ette nähtud dioodi passis. Vee eest klaas- või metallkestaga kaitstud dioodi asetame kalorimeetrisse (Dewari anumasse) mahuga ca 250 cm³, kus on 100 cm³ destilleeritud vett. Lülitame voolu sisse umbes 10 minutiks. Registreerime vee algtemperatuuri t_1, pinge, voolutugevuse, voolu kestuse τ ja lõpptemperatuuri t_2 (temperatuuri tuleb mõõta 0,1° C täpsusega).

Katse kestel tarvitatud vooluenergia

$$A = IU\tau.$$

Kaod dioodis

$$A' = \frac{M(t_2 - t_1)}{0{,}24},$$

kus M on vee mass kalorimeetris.

Kadude tegur

$$K = \frac{A'}{A - A'}. \qquad (16)$$

Võrrelda seda väärtust valemi (15) alusel saadud väärtusega! Et valemis (16) ei ole arvestatud soojuse kadusid kalorimeetris, siis on tegelik kadude tegur mõne protsendi võrra suurem kui valemi (16) alusel saadud tegur.

95. GAASLAHENDUSLOENDAJA KARAKTERISTIKU MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Gaaslahendusloendaja tööprintsiibiga tutvumine ja loendaja karakteristiku ning tööpinge määramine.

2. Töövahendid

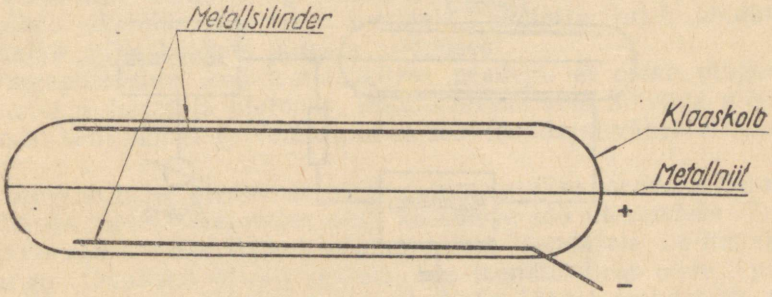
Gaaslahendusloendaja, radiomeeter, radioaktiivse kiirguse allikas, sekundomeeter.

3. Gaaslahendusloendaja tööprintsiip

Aatomite radioaktiivsel lagunemisel tekkiva kiirguse (α-, β- ja γ-kiirte) registreerimine toimub selle kiirguse poolt tekitatava ionisatsiooni põhjal. α- ja β-kiired koosnevad elektriliselt laetud osa-

kestest, mis möödudes küllalt ligidalt aine, antud juhul gaasi neutraalsetest aatomitest (või molekulidest) mõjustavad oma elektriväljaga nende elektrone niivõrd, et võib toimuda elektronide vabanemine — aatomite ioniseerumine. Ioonid ja elektronid aga muudavad gaasi elektrit juhtivaks. Mõõtes mingite pingestatud elektroodide vahel gaasis tekkiva ionisatsioonivoolu suurust, on võimalik määrata ionisatsiooni tekitava kiirguse intensiivsust.

γ-kiired, mis on laenguta, otseselt ionisatsiooni ei tekita, kuid γ-kvantide neeldumisel aines (fotoefekt, Comptoni efekt) tekivad suure energiaga sekundaarelektronid, mis põhjustavad ionisatsiooni analoogiliselt β-osakestele. Nii on ka γ-kiirgust võimalik avastada ionisatsiooni põhjal.

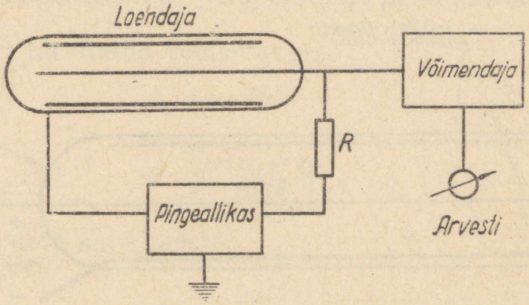


Joon. 142. Loendaja pikilõikes.

Arvukate ionisatsiooniefektil põhinevate radioaktiivse kiirguse registreerimise vahendite (näiteks ionisatsioonikamber, Wilsoni kamber) seas on tänapäeval üheks levinumaks gaaslahendusloendaja (nimetatakse sageli ka Geiger-Mülleri loendajaks). Gaaslahendusloendaja on hõrendatud gaasiga täidetud metallsilinder, mille teljel asetseb silindrist isoleeritud metallniit (joon. 142). Kogu süsteem on hermeetiliselt suletud, näiteks asetatud kinnijoodetud klaastorru, mille seina läbivad vaid pingestamiseks vajalikud traadid. Radioaktiivse kiirguse avastamiseks tuleb loendaja pingestada, kusjuures anoodiks (positiivseks elektroodiks) on metallniit ja katoodiks (negatiivseks elektroodiks) metallsilinder. Sõltuvalt loendaja ehitusest, täitegaasi omadustest ja rõhust tuleb kasutada pingeid paarsada kuni paar tuhat volti.

Loendaja tööprintsiip lihtsustatud kujul on järgmine. Et gaas, mis ei sisalda ioone, ei juhi elektrit, siis pingestatud loendajat vool ei läbi. Kui loendajasse tungib mingi laetud osake, mis tekitab seal ionisatsiooni, siis algab gaaslahendus — loendajat läbib elektrivool. Tekkinud ioonid ja elektronid kiirenevad elektroodidevahelises elektriväljas, mille tugevus on suurim niidikujulise anoodi vahetus läheduses. Anoodile suunduvad elektronid omandavad siin kahe põrke vahel aatomitega nii suure energia, et on suutelised neid aatomeid omakorda ioniseerima ja vabastama uusi elekt-

rone (tõukeionisatsioon). Nii toimub ioonide arvu laviinitaoline suurenemine. Küllalt suure pinge korral levib lahendus piki anoodi kogu loendaja pikkuses, mille tulemusena vabanev elektrilaeng on hoopis suurem (miljoneid kordi) kui laeng, mille vahetult tekitas seda protsessi esile kutsunud osake. Vastavalt sellele tekib ka loendaja ahelas palju tugevam vool. Gaaslahendus ei ole aga püsiv, vaid kustub tavalistes (isekustuvates) loendajates sisemiste põhjuste tõttu, kestes vaid ca 10^{-4} s. Seetõttu iga osake, mis tekitab loendajas ionisatsiooni, põhjustab ühe vooluimpulsi. Neid vooluimpulsse registreerides on võimalik määrata loendajasse sattuvate ioniseerivate osakeste arvu. Vooluimpulsside registreerimiseks lülitatakse loendajaga järjestikku takisti R (joon. 143),



Joon. 143. Radiomeetri skeem.

millel vooluimpulss muudetakse vastavalt Ohmi seadusele pingeimpulsiks. Vajaduse korral võimendatakse seda elektronlampvõimendajas ning registreeritakse vastavas arvestis. Aparaat radioaktiivse kiirguse registreerimiseks loendaja abil (radiomeeter) peab seega sisaldama kiirgustundliku elemendi (gaaslahendusloendaja), elektronseadme saadud impulsside võimendamiseks, arvesti nende registreerimiseks ja pingeallika loendaja pingestamiseks (joon. 143).

Kuigi ionisatsiooni tekitab iga loendajasse sattuv laetud osake, on nende registreerimine võimalik ainult küllalt suure elektroodidevahelise pinge olemasolul, sest väikese pinge korral on tekkivad vooluimpulsid liiga väikesed registreeriva süsteemi käivitamiseks. Algul registreeritakse vaid see osa loendajas ionisatsiooni põhjustavatest osakestest, mis tekitavad teistest suurema algionisatsiooni ja seega ka suurema vooluimpulsi. Pinge suurendamisel ajaühikus registreeritavate impulsside arv (loenduskiirus) esialgu kasvab, sest registreeritakse üha rohkem väiksemat algionisatsiooni tekitavaid osakesi. Sellest pinge väärtusest alates, mil iga ionisatsiooni põhjustav osake tekitab küllalt suure vooluimpulsi, registreeritakse nad kõik. Et ajaühikus loendajale langevate osakeste arv ei muutu, siis ei muutu pinge tõstmisel ka loenduskiirus. Tõsi küll, radioaktiivse lagunemise statistilise iseloomu tõttu (võrdseis

ajavahemikes ei lagune tegelikult võrdne arv aatomeid) kõigub ajaühikus lagunevate aatomite arv, seega ka loendajale langevate osakeste arv, mingi keskväärtuse ümber. Need kõikumised on suhteliselt seda väiksemad, mida rohkem aatomeid vaadeldavais võrdseis ajavahemikes laguneb. Selle tõttu kõiguvad ka võrdseis ajavahemikes loendatud impulsside arvud mingi keskmise ümber, kusjuures suhtelised hälbed on seda väiksemad, mida rohkem impulsse võrreldavais ajavahemikes registreeriti (suhteline ruutkeskmine viga protsentides on pöördvõrdeline ruutjuurega registreeritud osakeste arvust).

Loenduskiirus hakkab aga kiiresti kasvama, kui pinget suurendada niivõrd, et loendajas tekkiv lahendus iga kord ei kustu. Siis võib registreeriv aparatuur ühe osakese poolt tekitatud lahendust arvestada mitu korda. Pinge edasisel suurendamisel tekib loendajas pidev lahendus, mis rikub loendaja. Seetõttu tuleb hoiduda loendajale liiga kõrgete pingete andmisest.

Pingepiirkonda, kus loenduskiirus peaaegu ei olene pingest, nimetatakse loendaja platooks. Platoo ulatus võib kõikuda mõnekümnest kuni mõnesaja voldini, olles heal loendajal vähemalt sada volti.

Loenduskiiruse olenevust pingest nimetatakse loendaja karakteristikuks. Selle määramine ongi käesoleva töö ülesandeks. Teades loendaja karakteristikut, saame valida loendajale optimaalse tööpinge (tavaliselt platoo keskel), kus loenduskiirus oleneb pingest kõige vähem. Igasugustel praktilistel töödel loendajaga on seetõttu tarvis teada tema karakteristikut.

4. Töö käik

a) Töötamine lihtsa radiomeetriga. Lihtne radiomeeter koosneb loendaja hoidjast, elektronlamp-võimendajast, elektromehaanilisest arvestist ja pingeallikast, mis annab loendaja pingestamiseks vajalikku positiivset pinget kuni 600 V. Radiomeetri esiplaadil asetsevad võrgulüliti, indikaatorlamp, loendaja pinget mõõtev voltmeeter ja pingeregulaator. Elektromehaanilise arvesti esiküljel on lüliti tema avamiseks, tagaküljel kaks nuppu skaalade nullistamiseks. Elektromehaaniline arvesti registreerib iga impulsi osuti ($\times 1$) nihkega ühe skaalajaotise võrra. Teine osuti ($\times$ 100) nihkub ühe jaotise võrra siis, kui esimene on registreerinud 100 impulssi. Töö alustamisel asetatakse loendaja hoidjasse (silmas pidada loendaja polaarsust!) ja radioaktiivne preparaat vastavale alusele loendajast umbes 0,5 m, töötajast ning teistest ruumis viibijaist aga võimalikult kaugele.[1] Siis tuleb pingeregulaator pöörata minimaalsele pingele (äärmine asend vastu kella-osuti liikumise suunda), mille järel võib radiomeetri sisse lülitada.

[1] Praktikumis kasutatavad radioaktiivse kiirguse allikad on nii nõrgad, et nad mingisuguseid tervisekahjustusi ei tekita.

Indikaatorlamp hakkab seejuures helendama ning mõne aja pärast näitab voltmeeter algpinget 250—300 V. Aparatuuri tuleb lasta soojeneda umbes 5 min. Elektromehaanilise arvesti sisselülitamise järel tuleb alustada pinge tõstmisega 25 V kaupa, et leida registreerimise algusele vastavat pinget. Kasutatavatel madalapingelistel loendajatel on see 300 V piirkonnas. Olles selle leidnud, tuleb suurendada pinget umbes 100 V võrra, et leida mõõtmisteks sobiv loenduskiirus, mis on reguleeritav radioaktiivse preparaadi ja loendaja vahelise kauguse muutmise teel. Lihtsa radiomeetri korral ei ole soovitatav kasutada suuremaid loenduskiirusi kui 500 impulssi minutis, sest suurte loenduskiiruste korral ei jõua mehaaniline arvesti oma inertsi tõttu kõiki impulsse registreerida. Optimaalne loenduskiirus on paarsada impulssi minutis.

Pärast paraja loenduskiiruse valimist tuleb alustada karakteristiku määramisega. Selleks vähendatakse pinget registreerimise algusele vastava pingeni ning määratakse 5 minuti jooksul registreeritud impulsside arv. Edasi teostatakse mõõtmisi, tõstes pinget 25 V kaupa. Pinget tõstetakse seni, kuni ilmneb platoo lõpp — loenduskiirus hakkab järsku süstemaatiliselt kasvama. Jõudes platoo lõpuni, tuleb pinget kohe vähendada, et kaitsta loendajat kahjuliku ülekoormamise eest.

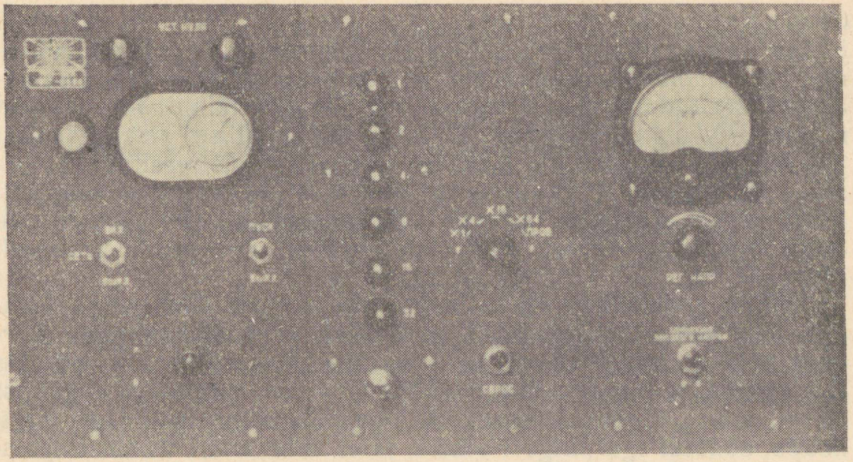
Mõõtmistulemused kantakse järgmisse tabelisse:

Pinge, V	Registreerimise kestus, min	Registreeritud impulsside arv	Loenduskiirus, imp./min
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....

Selle põhjal kujutatakse graafiliselt seos pinge ja loenduskiiruse vahel, s. o. koostatakse loendaja karakteristik, märkides abstsissteljele pinge ja ordinaatteljele loenduskiiruse väärtused. Lõpuks määratakse loendaja optimaalne tööpinge.

b) Töötamine radiomeetriga Б-2. Levinuimaks registreerimisaparaadiks on Б-2 tüüpi radiomeeter, mis koosneb loendaja hoidjast koos võimendajaga, elektroonilisest impulsside arvu jagajast, elektromehaanilisest arvestist ja kõrgepingeallikast loendaja pingestamiseks.

Impulsside arvu jagaja võimaldab sisenevate impulsside arvu jagada kas 1, 4, 16 või 64-ga. Seetõttu võimaldab ta kasutada palju suuremaid loenduskiirusi kui aeglane elektromehaaniline arvesti, mis registreerib nüüd jagamise tulemuse. Jäägi registreerivad elektroonilise jagajaga seostatud neoonlambid. Registreeritud impulsside koguarv on elektromehaanilise arvesti näidu korrutis jagaja väärtusega (1, 4, 16 või 64), millele on liidetud helendavate neoonlampide juures olevate arvude summa.



Joon. 144. Radiomeetri Б-2 esiplaat.

Kõrgepingealaldaja võimaldab saada kas positiivset või negatiivset pinget kuni 2500 V, mida mõõdab esiplaadil asuv voltmeeter. Positiivse pinge kasutamisel peab negatiivse pinge klemm olema ühendatud radiomeetri korpusega.

Radiomeetri esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid (vt. joon. 144):

1. Võrgulüliti.
2. Registreerimiskanali lüliti.
3. Elektroonilise jagaja ümberlüliti (1, 4, 16, 64 ja kontroll).
4. Neoonlampide kustuti.
5. Elektromehaanilise arvesti nullistajad.
6. Kõrgepinge regulaator.
7. Kõrgepinge lühistaja.

Radiomeetriga tööle asumisel tuleb ta maandada (vastav klemm on radiomeetri tagaküljel), ühendada loendaja hoidja radiomeetriga spetsiaalsete kaablite abil ja asetada hoidjasse loendaja (silmas pidades polaarsust). Enne radiomeetri sisselülitamist tuleb kontrollida, kas kõrgepinge regulaator on miinimumasendis (äärmine asend vastu kellaosuti liikumise suunda) ja registreerimiskanal välja lülitatud. Võrgupinge sisselülitamisel hakkab helendama roheline indikaatorlamp ning mõne hetke pärast ka osa elektroonilise jagaja neoonlampe. Pärast 5—10-minutilist soojenemist on aparaat töövalmis.

Enne mõõtmistele asumist tuleb kontrollida elektroonilise impulsside arvu jagaja korrasolekut. Lülitades jagaja ümberlüliti kontrollile, antakse jagaja sisendisse impulsse võrgu vahelduvvoolu sagedusega, s. o. 50 imp./s, kusjuures jagaja teostab jagamist

64-ga. Kontrolliks tuleb määrata teatava aja, näiteks 1 minuti jooksul registreeritud impulsside arv. Selleks tuleb (olles kustutanud neoonlambid ja nullistanud mehaanilise arvesti) avada samaaegselt sekundomeeter ja registreeriv kanal, 1 minuti möödumisel registreeriv kanal sulgeda ja leida mehaanilise arvesti näidu ($\times$ 64) ja neoonlampide näitude summana registreeritud impulsside arv. Andmed tuleb kanda töö protokolli. Korrasoleva aparaadi puhul ei tohi tulemus erineda võrgusageduse (50 imp./s ehk 3000 imp./min) põhjal arvutatust rohkem kui paari protsendi võrra.

Pärast radiomeetri korrasolekus veendumist võib asuda loendaja karakteristiku määramisele. Selleks tuleb radioaktiivse kiirguse allikas asetada mõnekümne sentimeetri kaugusele loendajast ja võimalikult kaugele töötajast. Edasi tuleb, kasutades jagamist 64-ga, avada registreerimiskanal ja asuda pinge tõstmisele 50 V kaupa, oodates iga pinge tõstmise järel vähemalt 1 minut impulsside ilmumist. Pinge reguleerimisel tuleb silmas pidada, et kõrgepingealaldaja inerts on võrdlemisi suur, mistõttu lõplik pinge saavutatakse umbes 1 minut pärast regulaatori pööramist. Nii tõstetakse järk-järgult pinget, kuni algab impulsside registreerimine. Edasi tuleb iga 25 V järel määrata loenduskiirus (samuti nagu jagaja kontrollimisel), registreerides iga kord vähemalt 1000 impulssi. Platoo lõpuni jõudmisel, mida iseloomustab loenduskiiruse järsk süstemaatiline tõus, tuleb mõõtmine lõpetada ja pinget vähendada, et vältida loendajas pideva lahenduse tekkimist ja seega loendaja riknemist.

Mõõtmistulemused kantakse järgmisse tabelisse:

Loendaja tüüp . . . . .

Pinge, V	Registreerimise kestus, min	Elektromehaanilise arvesti näit	Neoonlampide näit	Registreeritud impulsside koguarv	Loenduskiirus, imp./min
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Graafiliselt kujutatakse seos pinge ja loenduskiiruse vahel, märkides abstsissteljele pinge ja ordinaatteljele loenduskiiruse väärtused. Saadud karakteristiku põhjal määratakse loendaja optimaalne tööpinge.

5. Täiendavaid küsimusi

1. Miks on γ-kiirguse läbimisvõime palju suurem kui α- ja β-kiirguse läbimisvõime?
2. Miks soovitatakse töös registreerida igal mõõtmisel küllalt suur arv impulsse (vähemalt 1000)?

3. Mis on loenduskiirus?
4. Milleks on radiomeetril Б-2 elektrooniline impulsside arvu jagaja?
5. Miks ei registreerita impulsse väikeste pingete korral?
6. Miks ei või loendajale rakendada väga suurt pinget?
7. Kas loendaja töötaks, kui niidile antaks negatiivne pinge? Põhjendada!
8. Kas võiks koormustakistuse R lülitada ka katoodi ahelapoolde?
9. Missuguse polaarsusega impulss saadakse loendajast? Miks?

96. TERMISTORI TAKISTUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Termistori takistuse määramine temperatuuril 0° C, temperatuuril 100° C, ühes vahepealses konstantses punktis ning temperatuuride vahemikus 0—100° C iga kümne kraadi tagant termomeetri või termoelemendi järgi.

2. Töövahendid

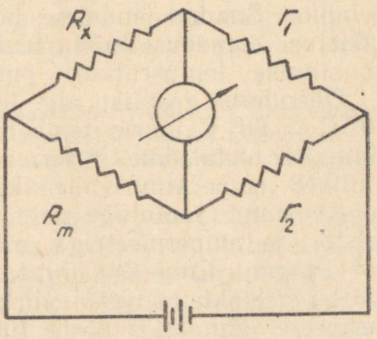
Termistor koos klaaskattega, klaasanum 400 cm³, segaja, termomeeter täpsusega 0,1° C vahemikus 0—100° C, elektripliit, kaks ühesugust takistit, takistusmagasin 10^4 Ω, pingeallikas, null-galvanomeeter, jääd.

3. Töö käik

Termistor on pooljuht, mille takistus suurel määral sõltub temperatuurist. See asjaolu võimaldab väga täpselt mõõta temperatuuri termistori takistuse mõõtmise kaudu. Selleks on aga tarvis tunda termistori takistuse olenevust temperatuurist. Käesoleva töö eesmärgiks ongi selle olenevuse määramine.

Mõõtmiseks koostame sümmeetrilise silla (joon. 145). Takistused $r_1 = r_2$ on samas suurusjärgus kui termistori takistus R_x.

Et $r_1 = r_2$, siis sild on tasakaalus, kui $R_x = R_m$, s. o. silla tasakaalustamiseks muudame takistusmagasini takistust R_m. Kui sild on tasakaalus (galvanomeeter voolu ei näita), siis loeme termistori takistuse takistusmagasinilt.



Joon. 145. Termistori takistuse mõõtmise skeem.

Võtame klaasnõusse, mille maht on ca 400 cm³, kraanivett ja lisame sellele tambitud jääd, kuni jää enam ei sula. Siis on vee ja jää segu temperatuur 0° C. Asetame vee eest klaaskattega kaitstud termistori segusse. Sinnasamasse paigutame termomeetri (või termoelemendi jootekoha). Termistori takistus hakkab suure-

nema. Ootame, kuni termistori takistus enam ei muutu, ja mõõdame siis täpselt takistuse. Mõõtmistulemuse kanname tabelisse:

t °C	R_x	t °C	R_x
0	.....	60	.....
10	.....	70	.....
20	.....	80	.....
30	.....	90	.....
40	.....	100	.....
50	.....		

Siis hakkame anumat soojendama, seejuures tema sisu intensiivselt segades. Mõõtesilla hoiame tasakaalu lähedal, lülitades selleks aeg-ajalt voolu ja reguleerides takistusmagasini. Kui temperatuur on tõusnud 10° C võrra, siis tasakaalustame silla täpselt ja kanname R_x jälle tabelisse. Nii toimime iga kümne kraadi tagant kuni vee keemistemperatuurini (100° C). Ootame, kuni keevas vees oleva termistori takistus enam ei muutu, ja mõõdame siis täpselt tema takistuse.

Lisaks sellele tuleb veel määrata termistori takistus vähemalt ühe konstantse temperatuuri puhul, näiteks kristallilise glaubrisoola sulamispunktis (32,4° C), kus $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O \rightarrow Na_2SO_4 +$ $+$lahus. Saadud andmete põhjal koostame graafiku termistori takistuse olenevuse kohta temperatuurist. Graafikule kanname ka konstantse temperatuuri punktis saadud termistori takistuse.

Ühendame graafiku alg- ja lõpp-punkti sirgega ning määrame 40° C ja 60° C juures temperatuuri mõõtmise vea, mille me teeksime, kui oletaksime, et termistori takistuse ja temperatuuri vahel valitseb temperatuurivahemikus 0—100° C lineaarne seos.

Koostame voolutugevuste tabeli temperatuuri mõõtmiseks termistori ja ampermeetriga, märkides tabelisse voolutugevuse iga 10° C tagant. Enne aga arvutame, kui suur peab olema milliampermeetri sisetakistus, mõõtepiirkond ja toiteallika pinge, et milliampermeeter annaks 0° C ja 100° C vahemikus maksimaalse hälbe muutuse.

V. VALGUS

97. VALGUSALLIKATE VALGUSTUGEVUSE VÕRDLEMINE FOTOMEETRI ABIL

1. Tööülesanne

Valgusallika valgustugevuse ühikutega ja fotomeetrite ehitusega tutvumine. Uuritava valgusallika (hõõglambi) valgustugevuse võrdlemine normaallambi valgustugevusega ja ühe rahvusvahelise küünla kohta tuleva voolu võimsuse määramine.

2. Töövahendid

Bunseni fotomeeter ja normaallamp optilisel pingil, ampermeeter, voltmeeter, reostaat, juhtmeid ühenduste tegemiseks, uuritav valgusallikas, Lummer-Brodhuni fotomeeter.

3. Töö käik

a) Valgusallika valgustugevust mõõdame selle valgusenergia hulga põhjal, mida valgusallikas ühes sekundis välja saadab. Valgustugevuse ühikuna on üldiselt kasutusel nn. rahvusvaheline küünal (rk ehk cd), mis 1939. aasta kokkuleppe kohaselt on määratud nn. absoluutselt musta keha valguskiirguse põhjal puhta plaatina tahkumistemperatuuril (2046° K). Sellise keha 1 cm^2 suuruse pinna valgustugevus (valguskiirgus) pinna normaali suunas võrdub 60 rahvusvahelise küünlaga.

Eespool defineeritud rahvusvaheline küünal erineb (umbes 2% võrra väiksem) varem Nõukogude Liidus, Inglismaal, Prantsusmaal, Ameerika Ühendriikides ja mujal rahvusvahelise küünla (International Candle Power) nime all tarvitusel olnud valgustugevuse ühikust.

Valgusvooks nimetatakse silmaga tajutavat kiirgusvoogu. Valgusvoo ühikuks on luumen. Luumen (lm) on ühtlane valgusvoog, mida kiirgab punktikujuline valgusallikas tugevusega 1 rk ühte ruuminurgaühikusse (sterradiaani). Seega 1 rk poolt kiiratav valgusvoog on 4π lm. Luumenist 10 korda suuremaks valgusvoo ühikuks on dekaluumen (Dlm):

$$1\ \text{Dlm} = 10\ \text{lm}.$$

Pinnavalgustuse ühikuteks on fott (ph) ja luks (lx). Pinnavalgustus on 1 fott, kui ühtlane valgusvoog 1 lm langeb 1 cm^2 suurusele pinnale. Seega

$$1\ \text{ph} = 1\ \frac{\text{lm}}{\text{cm}^2}.$$

Pinnavalgustus on 1 luks, kui ühtlane valgusvoog 1 lm langeb 1 m^2 suurusele pinnale. Järelikult

$$1\ \text{lx} = 1\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}.$$

Eelmistest definitsioonidest järeldub, et

$$1\ \text{ph} = 10^4\ \text{lx}.$$

Pinnavalgustust 1 lx nimetatakse ka meeter-küünlaks, sest kui punktikujuline valgusallikas tugevusega 1 rk on paigutatud 1-meetrise raadiusega kera keskpunkti, siis on selle kera sisepind valgustatud 1 lx tugevuselt.

Pinnaheleduse ühikuks on stilb (sb). Kiirgava pinna heledus on 1 stilb, kui 1 cm^2 suurune pind kiirgab valgust pinna normaali suunas tugevusega 1 rk. Seega

$$1\ \text{sb} = 1\ \frac{\text{rk}}{\text{cm}^2}.$$

Pinnaheleduse ühikuna kasutatakse ka sellist pinnaheledust, mille puhul 1 m^2 suurune pind kiirgab valgust pinna normaali suunas tugevusega 1 rk, s. o. $1\ \frac{\text{rk}}{\text{m}^2}$. Selle ühiku nimetuseks on nitt (nt); $1\ \text{nt} = 10^{-4}$ sb.

Kui valgusallikast väljuv valgusvoog (Φ) ei ole ühtlane, s. o. igas suunas sama intensiivsusega, siis tuleb valgusallika valgustugevuse (I) määramisel arvestada valguse levimise suunda. Väljugu näiteks valgusallikast vaadeldavas suunas (r) ruuminurga elementi $d\Omega$ valgusvoog $d\Phi$ (joon. 146). Siis selles suunas on valgusallika valgustugevus

$$I_r = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \qquad (1)$$

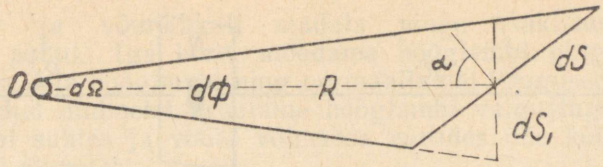
sest luumeni definitsioonist järeldub, et valgusvoog ruuminurga ühiku kohta on arvuliselt võrdne valgustugevusega.

Samal viisil tuleb toimida ka pinnavalgustuse (E) ja pinnaheleduse defineerimisel ebaühtlase valgusvoo puhul.

Väljugu valgusvoog $d\Phi$ punktikujulisest valgusallikast O (joon. 146) ja langegu pinnaelemendile dS nurga α all.

Siis selle pinnaelemendi valgustus

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \qquad (2)$$



Joon. 146. Valgustuse olenevus kiirte langemisnurgast.

Sama valgusvoog langeb ka pinnaelemendile dS_1, mis on risti valguse levimissihiga.

Et pinnaelement $dS_1 = dS \cos \alpha = R^2 d\Omega$, siis sellest

$$dS = \frac{R^2 d\Omega}{\cos \alpha}$$

ja

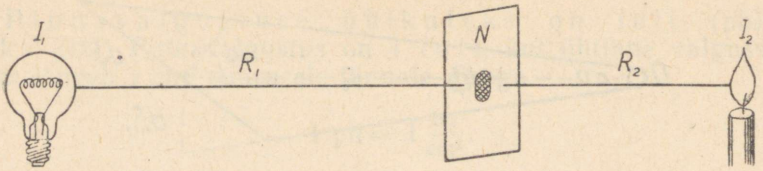
$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{\frac{d\Omega}{R^2} \cos \alpha} = \frac{I}{R^2} \cos \alpha. \qquad (3)$$

b) Valgusallikate valgustugevust võrreldakse eriliste riistade, nn. fotomeetrite abil. Vaatleme Bunseni fotomeetri ehitust ja töötamise põhimõtet.

Valgest paberist ekraani N keskele on tehtud õlilaik, mis laseb valguskiirgust paremini läbi kui ekraani ülejäänud osa. Asetame sellise õlilaiguga ekraani valgustugevuse suhtes võrreldavate valgusallikate vahele. Kui mõlemad valgusallikad (hõõglamp ja normaallamp) valgustavad õlilaiku ühetugevuselt, siis paistab õlilaik mõlemalt poolt vaadatuna enam-vähem niisama heledana kui ülejäänud ekraan. Kui aga õlilaigule langeb ühelt poolt ekraani tugevam valgusvoog kui teiselt poolt, siis paistab õlilaik nõrgema valgusvoo poolelt heledamana. Ekraani (või valgusallikate) edasitagasi nihutamisega tuleb saavutada olukord, kus õlilaik võimalikult ära kaob.

Kui teeb raskusi õlilaigu kadumise vaatlemine mõlemalt poolt ekraani korraga, võib vaadelda õlilaigu kadumist esiteks ainult ühelt poolt ja määrata vastavad kaugused, siis teiselt poolt ja võtta saadud tulemustest aritmeetiline keskmine.

Olgu hõõglambi valgustugevus I_1, normaallambi valgustugevus I_2 ja nende kaugused õlilaigust vastavalt R_1 ja R_2. Kui kaob õlilaigu erinevus muust ekraanist (me ei näe teda), siis on õlilaik mõlemalt poolt ühetugevuselt valgustatud. Ekraani N (joon. 147) 1 ruutsentimeetrile langev valguskiirguse hulk on vasakpoolse valgusallika (I_1) puhul $\frac{I_1}{4\pi R_1^2}$, parempoolse valgusallika (I_2) puhul aga $\frac{I_2}{4\pi R_2^2}$. Kui mõlemad valgusallikad valgustavad ekraani ühe-



Joon. 147. Bunseni fotomeetri skeem.

tugevuselt, siis

$$\frac{I_1}{4\pi R_1^2} = \frac{I_2}{4\pi R_2^2},$$

millest

$$I_1 : I_2 = R_1^2 : R_2^2.$$

Eelmine valem ongi aluseks valgustugevuse määramisel Bunseni fotomeetri abil. Kui näiteks ühe valgusallika (normaallambi) valgustugevus I_2 on teada või kui tema valgustugevus on võetud mõõtühikuks, siis, mõõtes vastavad kaugused R_1 ja R_2, saame arvutada teise valgusallika (hõõglambi) valgustugevuse I_1.

c) Töötamine Bunseni fotomeetriga peab toimuma ruumis, kus kõrvaline valgus ei mõjusta õlilaigu valgustamist võrreldavate valgusallikate poolt.

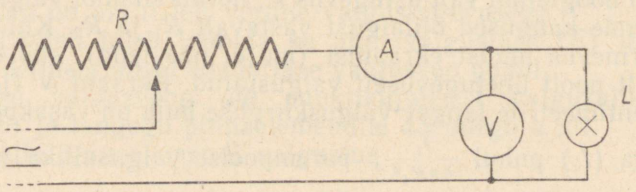
Ekraani õlilaigu mõlema poole üheaegne vaatlemine, mis hõlbustab nende valgustuse võrdlemist, toimub vastavate nurkpeeglite abil.

Hõõglampi läbiva voolu võimsuse arvutamiseks tuleb mõõta selle voolu tugevus I amprites ja pinge U voltides. Nende korrutis (IU) annab voolu võimsuse N vattides, sest

$$N = I \cdot U.$$

Vastavate lülituste tegemisel tuleb silmas pidada, et ampermeeter oleks lülitatud vooluahelasse järjestikku, voltmeeter aga paralleelselt.

Kui tahame uurida hõõglambi valgustugevuse olenevust pingest, siis lülitame vooluahelasse samuti järjestikku takistuse (reostaadid). Vaatlusi toimetame kolmel juhul: kõige suurema pinge (takistus välja lülitatud), keskmise pinge (osa takistust ahelasse



Joon. 148. Hõõglambi ja mõõteriistade lülitusskeem.

lülitatud) ja võimalikult madala pinge (takistust juurde lisada!) puhul. Iga kord mõõdame hõõglambi pinge U, voolutugevuse I ja hõõglambi ning normaallambi kaugused fotomeetrist. Saadud andmeist arvutame hõõglambi valgustugevuse normaallambi suhtes ja voolu võimsuse vattides ühe küünla kohta erinevatel pingetel.

Vaatlustulemused märgime tabelisse järgmiselt:

Vaatluse jrk. nr.	Pinge U voltides	Voolutugevus I amprites	Hõõglambi asendi lugem	Õlilaigu asendi lugem	Normaallambi asendi lugem
1	.....	.....	.....	.....	.....
2	.....	.....	.....	.....	.....
3	.....	.....	.....	.....	.....

Vaatlusandmete põhjal toimetame vastavad arvutused, mille tulemused paigutame järgmisse tabelisse:

Vaatluse jrk. nr.	Hõõglambi kaugus õlilaigust R_1 cm	Normaallambi kaugus õlilaigust R_2 cm	$\frac{R_1^2}{R_2^2} = L$	Hõõglambi valgustugevus $I_1 = LI_2$	Hõõglambi võimsus $N = IU$	$\frac{N}{I_1}$
1	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Saadud tulemuste alusel joonestame $\frac{N}{I_1}$ ja U graafiku.

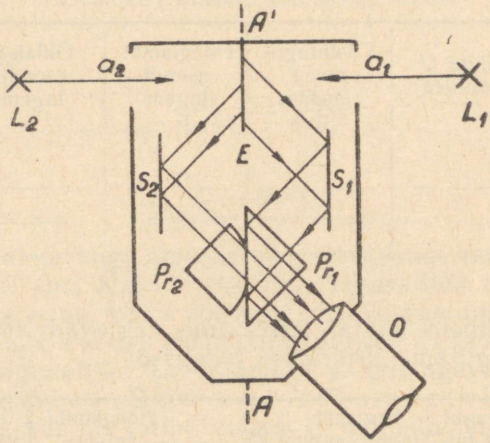
d) Lummer-Brodhuni fotomeeter. Et Bunseni fotomeetri õlilaigus valgus osalt peegeldub, osalt läbib laiku, kusjuures ta tugevasti nõrgeneb absorptsiooni tagajärjel, siis ei ole mõõtmistulemuste täpsus Bunseni fotomeetri kasutamisel kuigi suur.

Kui vaatleme õlilaiku peeglitega mõlemalt poolt, siis näeme, et mõlemal pool korraga ei kao õlilaik kunagi (mis on tingitud absorptsioonist laigus). Me peame valima sellise asendi, et õlilaik paistaks mõlemalt poolt ühetugevusena. Õlilaigu tugevus oleneb vaatesuunast — me peame hoidma oma silmad ekraani suhtes alati samas kohas. Teiseks, laigu kujutised on teineteisest eemal, mistõttu nende võrdsuse momenti ei saa kuigi täpselt kindlaks teha.

Kui orienteeruda õlilaigu kadumise momendile, siis tuleks kõne alla võrreldavate valgusallikate asendamise meetod. Õlilaigu kadumine aga oleneb vaatenurgast, mis toob uuesti sisse vaatlusvigu.

Kõik mainitud vead on kõrvaldatud nn. Lummer-Brodhuni foto-

meetris, mille skeem on esitatud joonisel 149. Fotomeeter asetatakse võrreldavate valgusallikate vahele. Valgusallikatest tulev valgus pääseb läbi avauste a_1 ja a_2 valgele ekraanile E (kriidist või alabasterkipsist plaat), kust ta hajub kõikides suundades. Osa paremalt poolt tulnud valgusest satub peeglile S_1 ja sealt täieliku sisepeegelduse prismasse Pr_1, mille aluse keskpaigaga on optilises



Joon. 149. Lummer-Brodhuni fotomeetri skeem.

kontaktis teine täieliku sisepeegelduse prisma Pr_2. Optilise kontakti laik on ümmargune. Sellest laigust läheb valgus läbi, laiku ümbritsevast piirkonnast aga peegeldub okulaari. Vasakult poolt tulnud valgus hajub samuti valgelt ekraanilt, kusjuures osa temast satub peeglile S_2 ja sealt prismasse Pr_2. Prismade optilise kontakti kohal läheb ta prismasse Pr_1 ja sealt okulaari, ülejäänud osa temast aga peegeldub tagasi. Okulaaris, mis on fookustatud optilise kontakti pinnale, paistab rõngas, mis on valgustatud valgusallikast L_1. Rõnga keskel olev ketas on valgustatud valgusallikast L_2. Ketta äärelt algab vahetult rõngas, mistõttu mõlema valgustuse võrdsustamine võib siin toimuda palju täpsemalt, sest silm eraldab ebavõrdsust palju teravamini. Pealegi on mõlemalt poolt tulnud kiirte teed sümmeetrilised, välja arvatud esimese kiire täielik sisepeegeldus. Kui esineb siiski riista väike ebasümmeetria (näiteks ekraani mõlemad pooled ei hajuta valgust ühteviisi jne.), siis korrigeeritakse see sel teel, et tehakse alati kaks mõõtmist: üks fotomeetri sellises asendis, nagu on näidatud joonisel 149, teine 180° võrra pööratud fotomeetriga (mis pöördub telje AA' ümber). Siis on kiirte osad vahetatud. Saadud tulemustest võetakse aritmeetiline keskmine.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Mis on ruuminurk ja missugustes ühikutes seda mõõdetakse?
2. Missugustes ühikutes mõõdetakse valgusvoogu? Defineerida need ühikud.
3. Defineerida pinnavalgustuse ühikud luks ja fott.
4. Kui suur on valgusallikate kasutegur?
5. Tõestada, et 1 rk 1 m pikkuse raadiusega kera tsentris valgustab selle kera sisepinda tugevusega 1 lx.
6. Miks õlilaik ekraanil kaob, kui ekraan on mõlemalt poolt ühetugevuselt valgustatud?
7. Miks paistab valgustatud õlilaik valgusallika poolt vaadatuna tumedam, vastaspoolelt vaadatuna aga heledam?
8. Kuidas oleneb hõõglambi valgustugevuse ühe küünla kohta tulev võimsus pingest? Missuguse pinge puhul on valgustus kõige odavam?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 230.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XVIII, §§ 6—8.

98. FOTOELEMENDI KALIIBRIMINE JA PINNAVALGUSTUSE MÕÕTMINE

1. Tööülesanne

Fotoelemendi kaliibrimine ja pinnavalgustuse mõõtmine.

2. Töövahendid

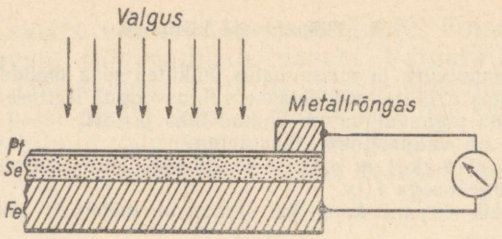
Tõkkekiht-fotoelement, mikroampermeeter, tuntud valgustugevusega elektrihõõglamp, voltmeeter lambile antava pinge mõõtmiseks ja optiline pink või mõõtpael.

3. Töö käik

Eelmises töös võrdlesime valgusallikate valgustugevusi, hinnates valgustatud pindade heledust silmaga. Objektiivseteks mõõtmisteks osutub silm aga sageli puudulikuks. Siis kasutatakse valguse omadust kutsuda aineis esile elektrilisi nähtusi.

Lihtsa vahendi pinnavalgustuse mõõtmiseks võime koostada fotoelemendist ja mikroampermeetrist.

Me kasutame oma katse puhul nn. tõkkekiht-fotoelementi (joon. 150), mis koosneb raudplaadist, sellel asetsevast seleenikihist ja viimast katvast õhukesest läbipaistvast metallikihist. Valguse mõjul vabanevad seleenist elektronid ja rändavad pealmisse metallikihti, mistõttu kihtide vahel tekib pinge. Kui ühendada pealmine metallikiht alumise raudplaadiga läbi mikroampermeetri, siis näitab viimane voolu. Nimetus tõkkekiht-fotoelement on tuletatud nähtusest, et kihtide niisuguse järjestuse puhul pääseb vool läbi ainult ühes suunas. Sama nähtust kasutatakse ka elektrivoolu alaldajate ehitamisel.



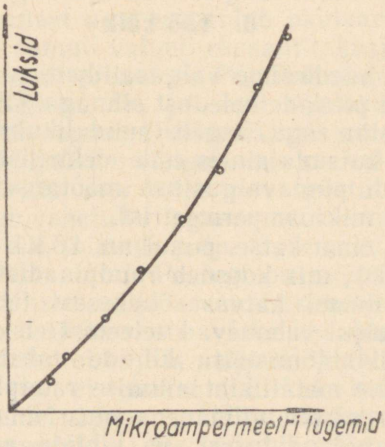
Joon. 150. Tõkkekiht-fotoelement.

Et seadeldist rakendada pinnavalgustuse mõõtmiseks, peame teda vastavalt kaliibrima. Selleks kasutame tuntud valgustugevusega lampi, millega valgustame fotoelementi. Muutes lambi kaugust r fotoelemendist, muudame fotoelemendi pinnavalgustust E valemi

$$E = \frac{I}{r^2}$$

kohaselt, kus I tähendab valgusallika valgustugevust. Häirivate valguse peegelduste vältimiseks tuleb mõõtmisi teostada mustade seintega toas või paigutada fotoelement seest musta pika toru ühte otsa ja valgustada teda lambiga teisest otsast. Kui valgustame fotoelementi 1,00; 1,41; 1,73; 2,00 jne. meetri kauguselt, siis suhtuvad fotoelemendi pinnavalgustused nagu $1/2 : 1/3 : 1/4$ jne. Vastavalt vähenevad ka mikroampermeetri lugemid. Et lambi heledus sõltub tugevasti temale rakendatud pingest, siis tuleb õigete tulemuste saamiseks lampi toita täpselt lambi passis ette nähtud pingega.

Mõõtmistulemuste põhjal koostame graafiku, mille ühele tel-



Joon. 151. Luksmeetri kaliibrimise kõver.

jele kanname mikroampermeetri lugemid ja teisele pinnavalgustused luksides (joon. 151). Saadud graafikut võime kasutada näiteks oma töökoha pinnavalgustuse mõõtmiseks.

Selleks asetame mõõdetavale kohale fotoelemendi (tundliku kihiga valguse poole) ja loeme mikroampermeetri vastava hälbe. Graafikult leiame sellele vastava pinnavalgustuse luksides. Kui mõõteriista skaala on kaliibritud luksides, siis nimetatakse niisugust seadeldist l u k s m e e t r i k s.

Kogu katse kestel tuleb fotoelementi käsitseda äärmiselt ettevaatlikult! Aktiivset pinda mitte puudutada! Valgustada ainult mõõtmiseks hädavajalik aeg! Lähemalt ja tugeva valgusega valgustamine rikub fotoelemendi parandamatult. Aja jooksul fotoelemendi tundlikkus väheneb.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas veenduda, kas fotoelemendi tundlikkus sõltub kasutatava valguse lainepikkusest?
2. Nimetada mõningaid teisi fotoelemendi rakendusi.

99. TÕKKEKIHT-FOTOELEMENDI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

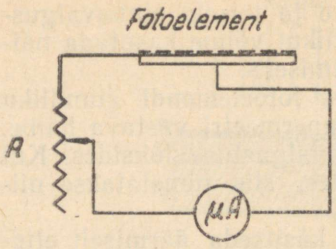
Kujutada graafiliselt voolutugevuse olenevus pinnavalgustusest ja välisahela takistusest. Mõõta tõkkekiht-fotoelemendi päri- suunaline ja vastassuunaline takistus olenevalt fotoelementi läbiva voolu tugevusest.

2. Töövahendid

Tõkkekiht-fotoelement, mikroampermeeter kuni 100 μA sisetakistusega mõnisada oomi, šunt 1 mA jaoks, pöördpoolgalvanomeeter tundlikkusega ca $10^{-10}\ \frac{A}{mm/m}$, takistusmagasin kuni 10^5 oomi, pingejagaja voolule kuni 10 mA, hõõglamp, stabilisaator, pingeallikas 1 V.

3. Töö käik

Fotoelement kujutab endast pooljuhtsüsteemi, kus p—n üleminekukiht asub peaaegu pinnal. Pinnakihis fotoefekti tõttu kiirendatud elektronid läbivad tõkkekihi päripidises suunas. Et tõkkekiht takistab nende tagasitulekut, siis koguneb mõlemale poole tõkkekihti elektrilaeng ja tekib potentsiaalide vahe. Kui moodustada kinnine vooluring, milles on väikese sisetakistusega mõõteriist, siis lähevad kõik elektronid läbi mõõteriista ja see elektronide vool on suures pinnavalgustuste diapasoonis võrdeline pinnavalgustusega. Kui aga ahela takistus on suurusjärgult võrdne tõkkekihi



Joon. 152. Fotoelemendi lülitusskeem.

vastassuunalise takistusega, siis läheb osa elektrone läbi tõkkekihi ka vastassuunas ja mõõteriista läbiva voolu tugevus ei ole enam lineaarses seoses pinnavalgustusega.

Mõõtmisteks koostame ahela mikroampermeetrist, takistusmagasinist ja fotoelemendist (joon. 152). Valgusallikana kasutame hõõglampi, mida toidame ferroresonants-stabilisaatorist (näiteks tüüp CH-350). Lambi kaugust fotoelemendist saab muuta lambi nihutamisega prismakujulisel alusel. Muutes lambi kaugust fotoelemendist, muudame ühtlasi fotoelemendi pinnavalgustust, mida arvutame valemi

$$E = \frac{I}{r^2} \qquad (1)$$

abil, kus I on lambi valgustugevus ja r lambi kaugus fotoelemendist. Lambi valgustugevus on märgitud lambi passis.

Et ära hoida hajunud valguse sattumist fotoelemendile, peab töö toimuma pimendatud ruumis, mille seinad on mustaks värvitud. Fotoelement asetatakse seest mustaks värvitud (mustast paberist) torusse, mille pikkuse ja läbimõõdu suhe on vähemalt 10. Kui ruumi seinad on heledad, peab lamp asuma samuti seest mustaks värvitud torus. Toru ise peab olema aga plekist, sest lamp kuumeneb töötamisel.

Mõõtmisi alustades seame takistusmagasini väärtusele null. Toome lambi fotoelemendile nii lähedale, et mõõteriist näitaks maksimaalset hälvet. Mõõdame fotoelemendi kauguse lambist ja kanname selle koos voolutugevusega vastavasse tabelisse. Muudame takistusmagasini takistust, loeme mõõteriistalt voolutugevuse ja kanname mõlemad väärtused tabelisse. Tabeli kuju võiks olla järgmine:

Magasini takistus		0 Ω	100 Ω	1000 Ω	5000 Ω	10000 Ω
Mõõteriista takistus						
Välisahela takistus						
Kaugus r	Pinnavalgustus E	Voolutugevus	Voolutugevus	Voolutugevus	Voolutugevus	Voolutugevus

Voolutugevuse võtame 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1; 0,08; 0,06; 0,04 ja 0,02 maksimaalsest. Mikroampermeeter peab olema kahe piirkonnaga: 1 mA ja 100 μA. Saadud kaugustest arvutame pinnavalgustuse. Välisahela takistuse arvutamisel liidame takistusmagasini takistusele mõõteriista takistuse. Kui mõõteriista mõõtepiirkond on šundiga laiendatud 10-kordseks, siis peame tema takistuse arvutama.

Saadud andmete põhjal kujutame graafiliselt voolutugevuse olenevuse pinnavalgustusest välisahela kõige väiksema ja kõige suurema takistuse puhul. Graafiku sirgjoonelisest osast arvutame fotoelemendi tundlikkuse (A/lm). Samuti koostame graafiku voolutugevuse olenevuse kohta välisahela takistusest kõige suurema pinnavalgustuse puhul.

Valgustamata fotoelemendi takistuse pärisuunalise ja vastassuunalise pinge korral määrame samuti nagu dioodi takistuse (vt. § 94), kasutades joonisel 141, *a* esitatud skeemi. Saadud andmete põhjal koostame graafiku vastavalt paragrahvis 94 antud juhistele.

Saadud andmeid kasutame selleks, et kindlaks teha, missuguse välisahela takistuse R_v ja fotoelemendi vastassuunalise takistuse $R_{vast.}$ vahekorra puhul voolutugevuse olenevus pinnavalgustusest muutub märgatavalt mittelineaarseks ja kui suur pinge on siis tõkkekihil.

Selle pinge saame kindlaks teha väga lihtsalt. Otsime pinnavalgustuse graafikult, mis on saadud kõige suurema välisahela takistuse korral, voolutugevuse I_e, mille puhul kõver kaldub tugevasti sirgest kõrvale. Ohmi seaduse põhjal

$$U_e = R_v I_e,$$

kus U_e on pinge tõkkekihil, mille puhul tekib märgatav mittelineaarsus. Edasi otsime sellele pingele vastava fotoelemendi vastassuunalise takistuse väärtuse $R_{vast.}$. Suurused $\frac{R_v}{R_{vast.}}$ ja U_e iseloomustavad fotoelementi selle poolest, et lineaarsuse säilitamiseks ei tohi neid väärtusi kunagi ületada.

100. FOTOTAKISTI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Määrata fototakisti takistuse olenevus pinnavalgustusest ja takistuse temperatuuritegur toatemperatuuri piirkonnas.

2. Töövahendid

Fototakisti, mikroampermeeter 0—100 μA, šundid mõõtepiirkonna muutmiseks kuni 10 mA, voltmeeter 15 V, pingeallikad kuni

15 V ja kuni 2 V, tundlik pöördpoolgalvanomeeter šundiga 1 : 10 : 100 : 1000, pingejagaja muutliku vahekorraga, silindriline Dewari anum 200—500 cm^3, kollimaator reguleeritava piluga.

3. Töö käik

Paljude metallide sulfiidide, seleniidide, telluriidide ja rea teiste ainete eritakistus muutub tugevasti, kui nendele langeb valgus. Seda asjaolu kasutatakse valguse indikaatorite konstrueerimisel. Nimetatud ained on pooljuhid ja nende takistus sõltub tugevasti ka temperatuurist. Seepärast ei ole nad eriti kohased täpseteks mõõtmisteks, kuid vastavate ettevaatusabinõude rakendamisel võib fototakisteid edukalt kasutada ka pinnavalgustuse mõõtmiseks, kui on teada takistuse olenevus pinnavalgustusest. Nende suur eelis fotoelementide ja fotorakkudega võrreldes on see, et nendele võib rakendada pingeid kuni mõnisada volti ja keskmiste pinnavalgustuste puhul saada voolusid, mille tugevus ulatub kümnete milliampriteni. Sellise vooluga saab käitada elektromagnetilisi releesid, kuna fotoraku ja fotoelemendi voolusid tuleb enne võimendada elektrontorudega.

Töö teostamiseks koostame joonisel 153, *a* esitatud skeemi. Fototakisti monteerime mustast paberist torusse ja asetame ta Dewari anuma põhja, et vältida märgatavat temperatuuri muutumist mõõtmiste vältel. Valgusallikaks on tuntud valgustugevusega hõõglamp, mida toidetakse suurest akumulaatorist. Lambi kauguse muutmise teel muudame fototakisti pinnavalgustust. Mõõtmise tulemused kanname tabelisse:

Lambi kaugus fototakistist, cm	Pinnavalgustus, lx	Voolutugevus I_1, μA	Pinge U_1, V	Takistus R_f, Ω
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....

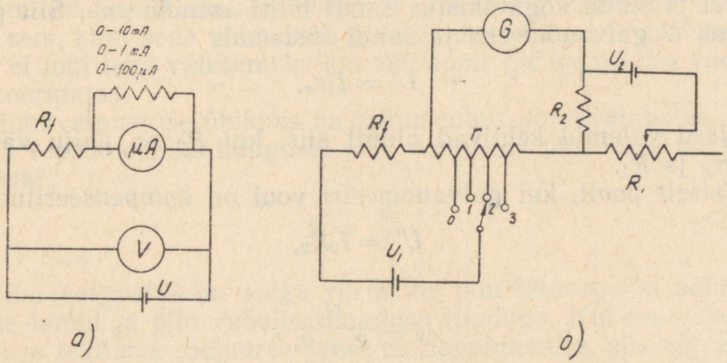
Fototakistuse suuruse arvutamisel peame arvestama mikroampermeetri takistust:

$$R_f = \frac{U_1}{I_1} - 10^{-n} R_{\mu A}, \qquad (1)$$

kus $R_{\mu A}$ on mikroampermeetri sisetakistus ja 10^{-n} mõõtepiirkonna laiendamise tegur.

Temperatuuriteguri määramiseks asetame fototakisti õhukeste seintega vasktorusse, mille üks ots on veekindlalt kinni joodetud. Dewari anumasse valame vett, mille temperatuur on umbes 10° C,

ja laseme sellesse vasktoru koos fototakistiga. Fototakistit tuleb nüüd valgustada ülaltpoolt. Takistus hakkab suurenema. Segame kogu aeg vett Dewari anumas ja mõõdame termomeetriga temperatuuri. Kui mõõteriist voolu muutust enam ei näita, siis on fototakisti omandanud vee temperatuuri. Loeme termomeetrilt selle temperatuuri ning mõõteriistadelt voolutugevuse ja pinge, millest arvutame takistuse. Samuti määrame fotoelemendi takistuse kõrgemal temperatuuril, näiteks 30° C. Fototakistuse suurust antud temperatuuril on soovitatav määrata mitmesuguste pinnavalgustuste puhul. Sellest selgub, kas takistuse olenevus pinnavalgustusest temperatuuri muutumisel oluliselt muutub või mitte. Andmed kanname vastavasse tabelisse.



Joon. 153. Fototakisti lülitusskeemid.

Suure tundlikkuse tõttu võib fototakistit rakendada ka väga väikeste valgusvoogude suhteliseks mõõtmiseks, näiteks mõne värvaine spektraalse karakteristiku määramiseks monokromaatoriga. Selleks peab aga takisti olema kaliibritud väikeste pinnavalgustuste piirkonnas. Vastava kaliibrimisgraafiku saamiseks kasutatakse joonisel 153, *b* esitatud skeemi. See on põhiliselt kompensatsiooniskeem. Fototakisti asub samuti Dewari anumas. Seekord kasutame aga väga väikest hõõglampi, mis asub fototakistist suures kauguses. Valgus satub fototakistile läbi kitsa reguleeritava pilu ja läätse. Pilu laiusega on võimalik reguleerida fototakistile sattuvat valgusvoogu. Pilu asub läätse fookuses ja tekitab seega paralleelsete kiirte kimbu, mis langeb fototakistile. Suhtelise pinnavalgustuse arvutamisel tuleb lambi kaugust lugeda kuni piluni.

Mõõtmiseks koostame joonisel 153, *b* esitatud skeemi. Galvanomeetri šundi kohta vt. üksikasjalisemalt § 94. Seame galvanomeetri šundi lüliti asendisse «*3*», pimendame täielikult fototakisti ja lülitame sisse pinge U_1. Galvanomeeter näitab väikest hälvet. Nüüd seame takistusmagasinis R_1 takistuse maksimaalseks, lülitame sisse pinge U_2 ja kompenseerime takistuse vähendamisega

galvanomeetri hälbe. Siis viime galvanomeetri šundi asendisse «*2*» ja kompenseerime täiendavalt galvanomeetri hälbe. Nii jätkame seni, kuni šundi lüliti on asendis «*0*» ja galvanomeetri hälve on kompenseeritud.

Nüüd loeme takistuse suuruse magasinis R_1, mis antud tingimustel on võrdeline fototakistuse suurusega. Võrdelisuse teguri leiame järgmiselt.

Voolutugevus fototakistis on

$$I_1 = \frac{U_1}{R_f + r_n}, \tag{2}$$

kus U_1 on vooluallika pinge, R_f fototakistuse suurus ja r_n galvanomeetri ja šundi kogutakistus šundi lüliti asendis «*n*». Siit pingelangus U galvanomeetri ja šundi süsteemis

$$U' = I_1 r_n. \tag{3}$$

Need valemid kehtivad ainult siis, kui R_2 on palju väiksem kui R_g ja R_1.

Teiselt poolt, kui galvanomeetri vool on kompenseeritud, siis

$$U' = I_2 R_2, \tag{4}$$

kus

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2 + R_1}. \tag{5}$$

Viimased valemid kehtivad samuti ainult siis, kui R_2 on palju väiksem kui R_g.

Nüüd võime kirjutada:

$$I_2 R_2 = I_1 r_n. \tag{6}$$

Paigutame valemisse (6) I_1 ja I_2 valemitest (2) ja (5) ning r_n pooljuhtdioodi karakteristikute määramise tööst [§ 94, valem (11)]. Lahendades selle valemi R_f suhtes, saame:

$$R_f = 10^{-n} r\,[R_g + (1 - 10^{-n})\,r]\,\frac{U_1(R_1 + R_2) - R_2 U_2}{R_2 (R_g + r)\,U_2}. \tag{7}$$

Arvestades, et $U_1 \approx 10$ V, $R_1 \approx 10^3\ \Omega$ ja $R_2 \approx 0{,}1\ \Omega$, võime võrrandi parema poole lugejas ära jätta R_2. Lõpptulemuseks saame:

$$R_f = 10^{-n} r\,[R_g + (1 - 10^{-n})\,r]\,\frac{U_1 R_1}{U_2 R_2 (R_g + r)}. \tag{8}$$

Kui fototakisti pimetakistus on määratud, siis asetame lambi temast võimalikult kaugele ja avame pilu nii palju, et galvanomeetri hälve on 20 mm. Pilu laiuse, samuti lambi kauguse pilust,

märgime vastavasse tabelisse. Takistuse R_1 muutmise teel kompenseerime tekkinud voolu ja loeme takistuse R_1 väärtuse, kandes selle samuti tabelisse. Nüüd nihutame lambi lähemale, kompenseerime tekkinud voolu ja kanname vastavad andmed tabelisse. Nii toimime seni, kuni takistus R_1 on 200 oomi. Siis suurendame takistust R_1, kuni galvanomeetri hälve on ca 300 mm, ja viime galvanomeetri šundi lüliti asendisse «*1*». Nüüd väheneb galvanomeetri hälve ja võib isegi saada negatiivseks. Kompenseerime hälbe takistuse R_1 muutmise teel ja kanname vastavad andmed tabelisse. Nii toimime edasi, kuni lambi kaugus pilust on 30 cm. Nüüd võime pinnavalgustust suurendada veel kas pilu laiendamise või uue, võimsama lambi tarvituselevõtmise teel. Sel juhul reguleerime pilu laiust ja kaugust seni, kuni on saavutatud viimati registreeritud fototakistuse suurus, ja jätkame siis mõõtmisi. Pinnavalgustust võib suurendada seni, kuni seda võimaldab galvanomeetri šunt ja takistus R_1, mida ei tohi teha väiksemaks kui 200 oomi (et teda mitte vooluga üle koormata).

Pinnavalgustuse ühikuks on antud juhul pinnavalgustus, mida annab 1 pikkusühiku kaugusel olev lamp, kui pilu laius on 1 pikkusühik:

$$E = \frac{d}{r^2}. \tag{9}$$

Pinnavalgustus on seega võrdeline pilu laiusega ja pöördvõrdeline lambi ja pilu vahelise kauguse ruuduga. Kui me vahetame lampi ja tekitame seejuures sama pinnavalgustuse, siis võrrandist

$$\frac{d_v}{r_v^2} = a\frac{d_u}{r_u^2}, \tag{10}$$

kus d_v on pilu endine laius, d_u pilu uus laius, r_v lambi endine kaugus ja r_u lambi uus kaugus, leiame teguri a, mis taandab uued meelevaldsed ühikud vanadele ühikutele.

Andmed kanname järgmisse tabelisse:

Galvanomeetri šundi asend	Takistus R_1	Lambi kaugus kollimaatori pilust r	Kollimaatori pilu laius d	Pinnavalgustus E	Fototakistuse suurus R_f
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Peale selle on tarvilikud veel järgmised andmed:

Galvanomeetri sisetakistus R_g = ... Ω.

Galvanomeetri kriitiline välistakistus r = ... Ω.

Vooluallika pinge $U_1 =$ ..... V,
$U_2 =$ ..... V.
Takistus $R_2 =$ ..... Ω.
Lampide andmed: 1) $U =$ ..... V, $J =$ ..... rk,
$I =$ ..... A.
2) $U' =$ ..... V, $J' =$ ..... rk,
$I' =$ ..... A.

Saadud andmete põhjal koostame graafiku, mille ühele teljele kanname pinnavalgustuse E ja teisele teljele fototakistuse suuruse R_f. Erinevatel temperatuuridel saadud andmed kanname ühele ja samale graafikule. Kõveratele märgime juurde vastavad temperatuurid.

101. HÕÕGLAMBI VALGUSVÄLJA MÕÕTMINE

1. Tööülesanne

Mõõta antud hõõglambi valgusvoo jaotus lampi ümbritsevas ruumis ja arvutada lambi kogu valgusvoog.

2. Töövahendid

Fotoelement, mikroampermeeter, goniomeeter lambi pöördenurga määramiseks, pingestabilisaator lambi toitmiseks, mõõdetav lamp.

3. Töö käik

Lambi hõõgniidi asendi ja kuju tõttu ei jagune valgusvoog lambi ümber ühtlaselt. Üldiselt võib arvestada, et lambi sümmeetriatelje suhtes on valgusvoo jaotus enam-vähem ühtlane. Seepärast mõõdame valgusvoo jaotust lambi sümmeetriatelje tasapinnas.

Kinnitame lambi horisontaalses tasapinnas pööratavale goniomeetri kettale nii, et lambi sümmeetriatelg oleks samuti horisontaalne. Lambi hõõgniit peab asuma ketta tsentri kohal.

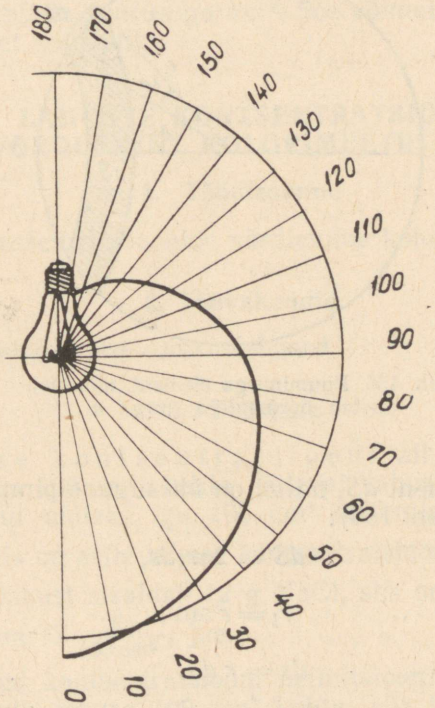
Fotoelemendi kinnitame statiivi, hõõglambiga ühele kõrgusele, nii et fotoelemendi pind oleks risti lambilt langevate kiirtega. Fotoelemendi ja lambi vaheline kaugus peab olema 1—2 meetri piirides. Mõõdame selle kauguse (r) ja kanname ta protokolli.

Ühendame fotoelemendi mikroampermeetriga ja hõõglambi pingestabilisaatoriga ning lülitame sisse lambi toitevoolu. Kanname tabelisse mikroampermeetri lugemid ja nendele vastavad lambi pöördenurgad iga 10° tagant. Mõõtmisel võib piirduda pöördenurkadega 0°—180° sümmeetriateljest. Teisel pool võib võtta kontrolliks lugemid iga 30° tagant.

Protokollimise tabel võiks olla järgmine:

Lambi pöördenurk	Mikroampermeetri lugem	Lambi pöördenurk	Mikroampermeetri lugem
0°	.....	100°	.....
10°	.....	110°	.....
20°	.....	120°	.....
.....	.....	.....	.....

Saadud tabeli alusel konstrueerime vektordiagrammi (joon. 154). Selleks jagame sirkli või malli abil 180-kraadise nurga 18 osaks



Joon. 154. Hõõglambi valgusvoo jaotus.

ja kanname nurga tipust vastavates suundades mikroampermeetri lugemid.

Mikroampermeetri lugemid on võrdelised fotoelemendi pinnavalgustusega:

$$E = aI. \qquad (1)$$

Kui fotoelement on kaliibritud ja konstant a on teada, võime mikroampermeetri lugemid ümber arvutada luksideks.

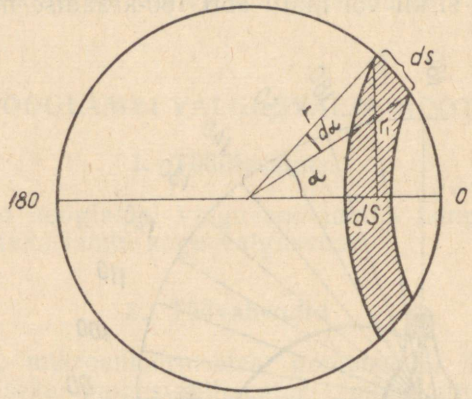
Pinnavalgustuse definitsioon ütleb aga, et

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \tag{2}$$

kus $d\Phi$ on valgusvoog, mis langeb pinnale dS. Siis

$$d\Phi = E dS. \tag{3}$$

Meil on vaja leida kogu valgusvoog, mida lamp saadab ruuminurka 4π, s. o. kogu kerapinnale, mis ümbritseb lampi.



Joon. 155. Ruuminurga element, mis moodustab normaaliga nurga α.

Kerapinna element dS, millel on ühesugune pinnavalgustus, on kerapinna vöö (joon. 155):

$$dS = 2\pi r_1 ds, \tag{4}$$

kus

$$r_1 = r \sin \alpha \tag{5}$$

ja

$$ds = r\, d\alpha. \tag{6}$$

Nendes avaldistes on r fotoelemendi kaugus hõõglambist.

Asetades need avaldised võrrandisse (3), saame:

$$d\Phi = E 2\pi r^2 \sin \alpha\, d\alpha. \tag{7}$$

Paigutades võrrandisse (7) E võrrandist (1), saame:

$$d\Phi = 2\pi a I r^2 \sin \alpha\, d\alpha. \tag{8}$$

Kogu voo saamiseks tuleb viimast avaldist integreerida üle kõikide nurga α väärtuste. Käesoleval juhul peame integreerimise

taandama summeerimisele. Meie andmed on võetud iga 10° tagant, seega absoluutses mõõdus $da = \frac{\pi}{18}$. Summeerimise tulemus ei ole muidugi väga täpne, sest nurga muutus liikmelt liikmele on suur, kuid praktiliseks otstarbeks piisab sellest täpsusest. Seega kogu valgusvoog

$$\Phi = 2\pi ar^2 \frac{\pi}{18} (I_{10} \sin 10° + I_{20} \sin 20° + \ldots + I_{170} \sin 170°),$$

kus I_{10}, I_{20} jne. on vastavate nurkade puhul saadud mikroampermeetri lugemid.

Hõõglambi kogu valgusvoogu võiksime ligikaudu arvutada ka nii, et leiame pinnavalgustuse aritmeetilise keskmise $\bar{E}$ ja korrutame selle kerapinna suurusega $4\pi r^2$. See võimaldab ka summeerimise ligikaudset kontrolli.

102. LAHUSTE KONTSENTRATSIOONIDE VÕRDLEMINE KOLORIMEETRI ABIL

1. Tööülesanne

Lahuste kontsentratsioonide võrdlemine kolorimeetri abil.

2. Töövahendid

Kolorimeeter ja võrreldavad lahused.

3. Töö käik

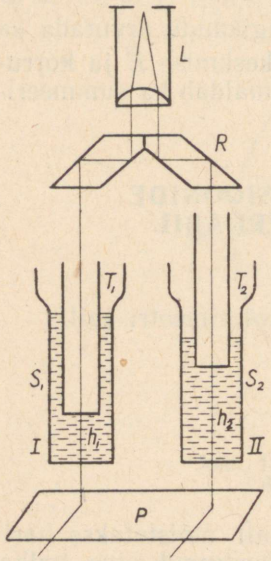
a) L a h u s e k o n t s e n t r a t s i o o n i all mõistetakse harilikult lahuse iga 100 cm³ kohta tulevat lahustunud aine hulka grammides. Kui näiteks iga 100 cm³ suhkrulahuse kohta tuleb 5 g suhkrut, siis on selle lahuse kontsentratsioon $5 \frac{g}{100\ cm^3}$, kui iga 100 cm³ soolalahust sisaldab 12 g NaCl, siis on selle soolalahuse kontsentratsioon $12 \frac{g}{100\ cm^3}$, jne.

Et eeltoodud kontsentratsiooni definitsioonis on antud lahustunud aine hulk lahuse 100 cm³ kohta, siis nimetatakse sellist kontsentratsiooni ka k a a l u l i s - r u u m a l a l i s e k s k o n t s e n t r a t s i o o n i k s.

Teatava etteantud kontsentratsiooniga, näiteks $12 \frac{g}{100\ cm^3}$, lahuse valmistamiseks võtame kontsentratsioonile vastava arvu gramme seda ainet (soola), asetame mõõtklaasi, kallame sinna lahustavat vedelikku (vett), lahustame aine ja valame lahustavat vedelikku juurde, kuni lahuse hulk on 100 cm³. Siis ongi meil valmis lahus kontsentratsiooniga $12 \frac{g}{100\ cm^3}$.

Nagu teada, puudub meil võimalus suurendada lahuse kontsentratsiooni igasuguse määrani, vaid kontsentratsiooni järjest suurendades jõuame lõpuks nn. küllastusolukorrani, kus lahusesse viidud aine enam ei lahustu.

b) Lahuste omadused, näiteks värviliste lahuste läbipaistvus, olenevad lahustunud aine hulgast, täpsemalt lahuse kontsentratsioonist. Seepärast on tarvis osata võrrelda lahuseid nende kontsentratsioonide alusel. Lahuste kontsentratsioonide määramiseks kasutatakse sageli erilisi riistu, nn. kolorimeetreid.



Joon. 156. Kolorimeetri ehituse seem.

Vaatleme kolorimeetri ehitust ja rakendamist, kasutades selleks joonisel 156 antud skeemi.

Lahust sisaldavais silindreis S_1 ja S_2 on tühjad torud T_1 ja T_2, mida on võimalik liigutada üles-alla. Et nii silindrite kui ka torude põhjad on valmistatud läbipaistvast ainest, siis saame sel teel mõlemas silindris eraldada läbipaistvate pindadega piiratud lahusekihi. Torusid T_1 ja T_2 üles-alla nihutades saame soovi kohaselt muuta lahusekihtide paksusi h_1 ja h_2.

Mõlemaid lahusekihte (*I* ja *II*) valgustame alt ühtlaselt peegliga *P*. Valgus tungib läbi lahuse ja langeb prismale *R* ning sealt edasi pikksilma *L*. Prisma *R* ja pikksilm *L* moodustavad fotomeetrilise seadise, mis võimaldab võrrelda mõlema toru (*I* ja *II*) kaudu tuleva valguse heledust.

c) On loomulik, et mõlema lahuse sama kontsentratsiooni puhul paksem lahusekiht neelab rohkem valgust kui õhem kiht. On aga lahuste kontsentratsioonid erinevad, siis muidugi neelab suurema kontsentratsiooniga lahus sama kihipaksuse korral rohkem valgust kui väiksema kontsentratsiooniga lahus.

Siin kehtib järgmine seaduspärasus: kui lahusekihtidest (*I* ja *II*) läbi tunginud valguse intensiivsus on sama, siis nende lahuste kontsentratsioonid c_1 ja c_2 on pöördvõrdelised lahusekihtide paksustega h_1 ja h_2, s. o.

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{h_2}{h_1}. \qquad (1)$$

Saadud valem ongi aluseks lahuste kontsentratsioonide võrdlemisel. Selleks reguleerime kihtide paksused h_1 ja h_2 nii, et mõlemast torust tulev valgus annaks pikksilma *L* vaateväljas

sama heleduse. Määrates kihtide *I* ja *II* paksused h_1 ja h_2 ning asetades need valemisse (1), saame arvutada kontsentratsioonide c_1 ja c_2 suhte. Võttes ühe neist kontsentratsioonidest, näiteks c_2, ühikuks, saame teise lahuse kontsentratsiooni mõõta neis ühikuis. Tõepoolest, kui

$$c_2 = 1, \text{ siis } c_1 = \frac{h_2}{h_1}.$$

Enne tööleasumist tuleb kontrollida, kas mõlema toru vaateväljad on ühtlaselt valgustatud. Kui see ei ole nii, siis tuleb muuta riista või peegli asendit välisvalguse suhtes seni, kuni heleduse vahe vaateväljas kaob; samuti on tarvis kontrollida torude põhjaklaaside puhtust. Pärast sellist kontrolli võib kallata silindritesse S_1 ja S_2 võrreldavad lahused. Nüüd muutub vaateväljas mõlema poole heledus. Kihtide paksuse reguleerimisega saavutame jälle vaatevälja ühtlase heleduse, mõõdame vastavad h_1 ja h_2 väärtused ning asetame need valemisse (1).

Määrata suhe $\frac{c_1}{c_2}$ vedelikukihtide erinevate paksuste puhul kolmel korral ja võtta tulemustest aritmeetiline keskmine. Vaatlusandmed ja tulemused esitada tabeli kujul.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Joonistada kiirte käik valguskiire sihi muutmisel täisnurkse prisma abil.
2. Peale eeltoodud ruumalalise kontsentratsiooni mõiste (*c*) kasutatakse ka kontsentratsiooni lahuse kaalu (massi) suhtes ehk kaalulist kontsentratsiooni (*p*). Selle all mõistetakse lahustunud aine hulka grammides 100 g lahuse kohta. Missugune on seos kontsentratsioonide *c* ja *p* vahel?
3. Kuidas valmistada soolalahust kontsentratsiooniga 5 g 100 g lahuse kohta?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 217.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XXIX, § 7.

103. LÄÄTSE FOOKUSE KAUGUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Optilise (sfäärilise) läätse ja tema fookuse mõistega ning läätse valemiga tutvumine. Fookuse kauguse määramine.

2. Töövahendid

Optiline pink koos valgusallikaga (kujutist andev ese), ekraaniga ja läätsehoidjaga ning kumerlääts.

3. Töö käik

a) Sfääriline läätS on tükk läbipaistvat keskkonda, mis on piiratud kerapindadega. Sirget, mis läbib nende kerapindade tsentreid, nimetatakse läätse optiliseks teljeks. Optilise teljega rööpsed kiired koonduvad pärast murdumist kumerläätses ühte punkti, mida nimetatakse fookuseks ehk tulipunktiks. Nõguslääts puhul näivad optilise teljega rööpsed kiired pärast murdumist väljuvat ühest punktist, mida nimetatakse ebafookuseks ehk ebatulipunktiks.

Kui optilisel teljel võetud valguspunkti kaugus kumerläätsest on a, kujutise kaugus k ja kumerläätse fookuse kaugus f, siis, nagu teame, on need kolm suurust seotud valemiga

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{k}=\frac{1}{f}, \tag{1}$$

millest

$$f=\frac{ak}{a+k}. \tag{2}$$

b) Fookuse kauguse määramisel toimime järgmiselt.

Jätame eseme (valguskriipsud) ja tema kujutise vahelise kauguse ($a+k=l$) muutmatuks ning määrame a mitme (vähemalt kolme) vaatluse keskmisena. Sel puhul peame kujutise teravuse iga vaatluse korral seadma uuesti ja järelikult võime saada ka uued a väärtused. Et a ja k summa püsib kogu aeg konstantsena, siis pole tarvis k väärtust eraldi määrata, vaid selle saame valemist $a+k=l$.

Arvutused teeme järgmiselt:

$$a=\frac{a_1+a_2+a_3}{3}=\ldots\ldots$$

$$k=l-a=\ldots\ldots$$

$$f=\frac{ak}{a+k}=\ldots\ldots$$

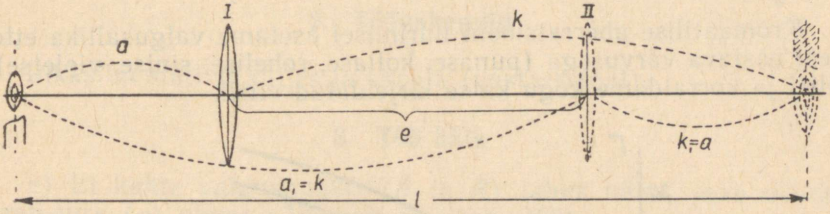
Arvutamise hõlbustamiseks antakse selle vaatlusviisi puhul valemile (2) järgmine kuju. Olgu konstantne $a+k=l$, millest $k=l-a$. Asetades valemisse (2) $a+k$ asemele l ja k asemele $l-a$, saame:

$$f=\frac{a(l-a)}{l}=\frac{al-a^2}{l}=a-\frac{a^2}{l}. \tag{3}$$

Kasutades f arvutamiseks valemi (2) asemel valemit (3), tuleb vaatluste teel määrata ainult eseme kaugus a, sest $a+k=l$ ei muutu.

Määrata sel teel a üks kord vähendatud ja teine kord suurendatud kujutise puhul, arvutada mõlemal korral vastav f ja võtta neist aritmeetiline keskmine. Saadud f väärtuse kontrollimiseks määrata valemist (1) mõnele eespool kasutatud a väärtusele vastav k väärtus. Seejärel asetada lääts ja ekraan vastavalt neile a ja k väärtustele ning vaadata, kas kujutis on terav. Kui kujutis ei ole terav, siis on kusagil viga. Kus nimelt?

c) Besseli meetod fookuse kauguse määramiseks. Nagu nähtub kumerläätse valemist $\frac{1}{a}+\frac{1}{k}=\frac{1}{f}$, on eseme kaugus a ja kujutise kaugus k ümberasetatavad. Sellest võrdus ei muutu. Tähendab, kui konstantsel eseme ja ekraani vahelisel kaugusel l nihutame läätse kohast I kohta II nõnda, et $a_1 = k$ ja $k_1 = a$ (joon. 157), siis saame ekraanil jälle terava kujutise, mis on ainult vähendatud.



Joon. 157. Skeem Besseli meetodi selgitamiseks.

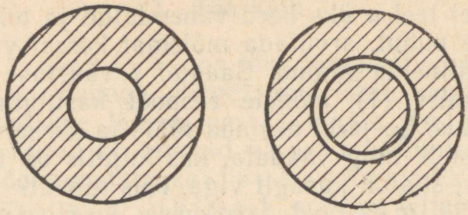
Kui läätse asendite I ja II vahe on e, siis, nagu nähtub jooniselt, $2a+e=l$ ja $2k-e=l$. Siit $a=\frac{1}{2}(l-e)$ ja $k=\frac{1}{2}(l+e)$. Asendades läätse valemis a ja k eelmiste avaldistega, saame:

$$f=\frac{1}{4}\left(l-\frac{e^2}{l}\right). \qquad (4)$$

Võttes $l>4f$, määrata sellele vastav e vähemalt 5 üksikmõõtmise keskmisena. Tulemustest arvutada valemi (4) põhjal f.

d) Kõik kumerläätse optilise teljega paralleelsed kiired ei koondu pärast murdumist läätses ühte punkti. Seda nähtust nimetatakse sfääriliseks aberratsiooniks, kui läätse eri tsoone läbivad kiired koonduvad eri punktidesse, ja kromaatiliseks aberratsiooniks, kui läätse sama tsooni läbivad eri värvusega kiired koonduvad eri punktidesse.

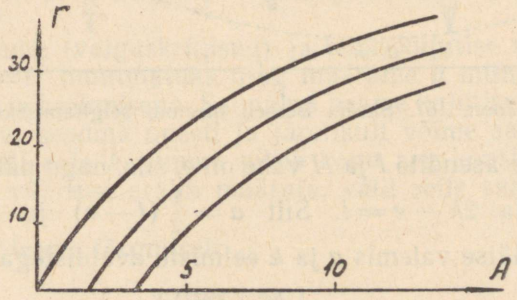
Sfäärilise aberratsiooni uurimiseks määrame läätse eri tsoone läbivate kiirte fookuse kaugused. Selleks katame mustast paberist diafragmadega (joon. 158) enamiku läätse pinnast ja jätame vabaks ainult uuritava tsooni. Kasutades erineva avaga diafragmasid, määrame igale tsoonile vastava fookuse kauguse valemi (4) põhjal, hoides seejuures eseme ja ekraani vahelise kauguse kogu aeg konstantsena. Kauguseks l valime umbes 5 fookuse kaugust.



Joon. 158. Diafragmad.

Kaugusest l tuleb lahutada läätse peapindade vaheline kaugus b. Kaksikkumera läätse puhul $b = \frac{n-1}{n} d$, kus n on klaasi murdumisnäitaja ja d läätse paksus. Tavalisel klaasil on $n = 1{,}5$, seega $b = \frac{1}{3} d$.

Kromaatilise aberratsiooni uurimisel asetame valgusallika ette veel vastava värvusega (punase, kollase, rohelise, sinise, violetse) filtri ja korraldame kogu katse kirjeldatud viisil.



Joon. 159. Kromaatiline ja sfääriline aberratsioon.

Kui f tähistab fookuse kaugust läätse tsentraalset tsooni läbivate punaste kiirte puhul ja f_n vastavalt fookuse kaugust teiste tsoonide ja värvuste puhul, siis vahe $f - f_n = A_n$ iseloomustab aberratsiooni suurust.

Uuritava läätse aberratsioonidest ülevaate saamiseks kanname A ja r teljestikus graafikule vastavad A_n ja r väärtused eri värvuste puhul ning ühendame saadud punktid pideva kõveraga (joon. 159).

4. Täiendavaid küsimusi

1. Defineerida mõisted: optiline telg ja abitelg, fookus ja ebafookus.
2. Kuidas saab määrata nõguslääatse ebafookuse kaugust?
3. Missuguseid kiiri kasutatakse kujutiste ehitamisel kumer- ja nõguslääatses?

4. Milles seisneb sfäärilise ja kromaatilise aberratsiooni nähtus? Kuidas saab neid vähendada?
5. Miks tuleb eseme ja ekraani vahelisest kaugusest lahutada läätse peapindade vaheline kaugus?
6. Kuidas kõrvaldatakse sfäärilist ja kuidas kromaatilist aberratsiooni?
7. Kuidas mõjub diafragma ava suurus mõõtmise täpsusele?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 165—168.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XIX, §§ 14—16.

104. PIKKSILMA SUURENDUSE MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

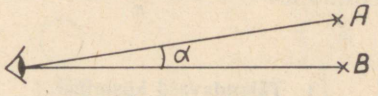
Pikksilma ülesande ja suurendusega tutvumine. Suurenduse määramine.

2. Töövahendid

Pikksilm statiivi küljes ja skaala (vastasseinal).

3. Töö käik

a) Et kahte valguspunkti (A ja B) lahus näha, peab nende vaatenurk (α) olema vähemalt 1′ (joon. 160).



Joon. 160. Vaatenurk.

Pikksilma ehk teleskoobi ülesandeks ongi vaatenurga suurendamine kaugete esemete vaatlemisel. Ta koosneb kahest läätsede süsteemist: objektiivist (esemeläätsest) ja okulaarist (silma poole pööratud läätsest). Objektiiv annab kaugest esemest fookuse lähedal tõelise, vähendatud ning ümberpöördud kujutise. Seda tõelist kujutist vaatleme okulaariga kui luubiga ja saame temast suurendatud päripidise (eseme suhtes ümberpöördud!) ebakujutise. Selle ebakujutise vaatenurga suhet eseme vaatenurgaga eseme vaatlemisel palja silmaga nimetataksegi pikksilma suurenduseks. Matemaatiline arutlus näitab, et pikksilma suurendus

$$s = \frac{\text{objektiivi fookuse kaugus}}{\text{okulaari fookuse kaugus}}.$$

b) Pikksilma suurenduse määrame järgmiselt. Suuname pikksilma vastasseinal olevale skaalale. Reguleerime okulaari

nõnda, et mõni pikksilma telje suunas olev skaalajaotis (vahemik) oleks teravasti näha. Nüüd õpime vaatama seda vahemikku ühe silmaga läbi pikksilma nõnda, et teine silm näeks skaalat otseselt, väljastpoolt pikksilma. Seejuures püüame juhtida pikksilmas nähtava kujutise skaala kohale ja paneme tähele, mitu jaotist ta sellel katab. Kui näiteks 1 skaalajaotis läbi pikksilma vaatamisel annab kujutise, mis katab 40 palja silmaga nähtavat skaalajaotist, siis on vaatenurkade suhe 40 ja pikksilma suurendus järelikult 40-kordne. Tõepoolest, antud juhul taandub vaatenurkade võrdlemine neile nurkadele vastavate kaarepikkuste võrdlemisele. Et võrreldavad nurgad on väikesed, siis võime ilma suurema veata asendada vastava kaareosa sirglõiguga ja teostada mõõtmist sirge skaalaga.

Teeme vähemalt 5 sellist vaatlust, arvutame iga kord vastava suurenduse ja võtame saadud tulemustest aritmeetilise keskmise.

Vaatlus- ja arvutustulemused märgime tabelisse järgmiselt:

Pikksilmas nähtavate skaalajaotiste arv	Kaetud skaalajaotiste arv	Suurendus
$n_1 =$	$N_1 =$	$s_1 = \frac{N_1}{n_1} =$ ....

Keskmine suurendus $s = \frac{s_1 + s_2 + \ldots\ldots + s_n}{n} = \ldots\ldots$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Joonistada kiirte käik pikksilmas.
2. Kuidas liigitatakse pikksilmi nende ehituse alusel (refraktor, reflektor, kiiker, binokkel)?
3. Kas eeltoodud viisil määratud suurendus oleneb skaala kaugusest pikksilmast?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 181.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XX, §§ 1, 2 ja 4.

105. MIKROSKOOBI SUURENDUSE, APERTUURARVU JA LAHUTUSVÕIME MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Mikroskoobi ehituse ja suurendusega tutvumine. Suurenduse, apertuurarvu ja lahutusvõime määramine.

2. Töövahendid

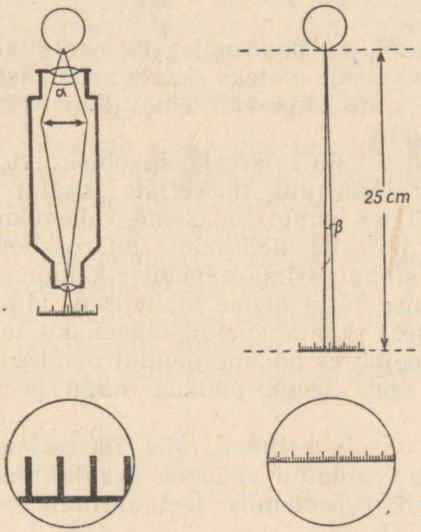
Mikroskoop, skaala, mõõtjoonel, poolläbipaistev peegel ja riba valget paberit.

3. Töö käik

a) Mikroskoobi ülesandeks on vaatenurga suurendamine väikeste lähedaste esemete vaatlemisel. Mikroskoop nagu pikksilmgi koosneb kahest läätsede süsteemist: objektiivist (esemeläätsest) ja okulaarist (silma poole pööratud läätsest). Tugevama suurendusega mikroskoopidel on kolmas läätsede süsteem — kondensor — vaadeldavale esemele valguse koondamiseks. Objektiiv annab vaadeldavast esemest tõelise, suurendatud ja ümberpöördud kujutise. Seda tõelist kujutist vaatleme okulaariga kui luubiga ning saame temast viimase abil päripidise (eseme suhtes ümberpöördud!) ning suurendatud ebakujutise. Selle ebakujutise vaatenurga α suhe eseme vaatenurgaga β eseme vaatlemisel palja silmaga ongi mikroskoobi suurendus (joon. 161).

Kui näiteks objektiiv suurendab vaatenurka s_1 korda, okulaar aga s_2 korda, siis on mikroskoobi kogusuurendus s loomulikult võrdne objektiivi ja okulaari suurenduste korrutisega, s. o.

$$s = s_1 \cdot s_2.$$



Joon. 161. Mikroskoobi suurenduse määramine kahe silmaga vaatamisel (vasakuga läbi mikroskoobi, paremaga otseselt).

Matemaatiline arutlus näitab, et praktiliselt võime mikroskoobi suurendust arvutada järgmise valemi abil:

$$s = \frac{25\,\Delta}{f_1 \cdot f_2},$$

kus Δ on mikroskoobi nn. optiline pikkus sentimeetrites, f_1 objektiivi ja f_2 okulaari fookuse kaugus, mõlemad samuti väljendatud sentimeetrites. Koefitsient 25 tähistab siin normaalsilma parima nägemise kaugust sentimeetrites. Mikroskoobi optilise pikkuse Δ all mõeldakse objektiivi ja okulaari sisemiste fookuste vahelist kaugust.

Valemist nähtub, et mikroskoobi suurendus oleneb eeskätt objektiivi ja okulaari fookuse kaugusest. Seepärast varustatakse mikroskoobid erinevate suurenduste saamiseks mitme vahetatava objektiivi ja okulaariga.

b) Mikroskoobi suurenduse määramine otsese vaatlemise teel toimub samuti nagu pikksilmagi puhul, s. o. vaadeldakse mingit skaalavahemikku (teatavat selgesti fikseeritavat arvu jaotisi) läbi mikroskoobi ja otseselt — palja silmaga (joon. 161). Seejuures tuleb tähele panna, mitu palja silmaga vaadeldavat skaalajaotist katab läbi mikroskoobi nähtav skaalavahemik. Kui näiteks 3 läbi mikroskoobi vaadeldavat skaalajaotist katavad 150 palja silmaga vaadeldavat jaotist, siis on mikroskoobi suurendus

$$s = 150 : 3 = 50 \text{ (korda)}.$$

Enne tegeliku töö juurde asumist tuleb selgitada skaala jaotiste suurus. Selleks mõõdame näiteks skaala kahe hästi nähtava kriipsu vahe ja loendame, mitu kõige väiksemat jaotist (kriipsuvahet) asetseb selles vahemikus.

Nüüd asetame skaala mikroskoobi objektiivi ette, reguleerime valgustuse ja teravuse ning fikseerime skaalal ühe silmaga läbi mikroskoobi vaadates mingi väiksema vahemiku (jaotiste arvu). Ühtaegu hoiame hariliku mõõtjoonla mikroskoobi telje läheduses rööbiti skaalaga silma parima nägemise kaugusel (umbes 25 cm). Vähese harjutamise järel oleme suutelised nägema ühe silmaga (teist pilukil hoides) skaalal võetud vahemikku, teisega aga mõõdujaotisi joonlal. Seejuures hoiame joonlat nõnda, et skaala jaotised kataksid joonla omi. Seega püüame nagu projekteerida skaala jaotisi joonlale.

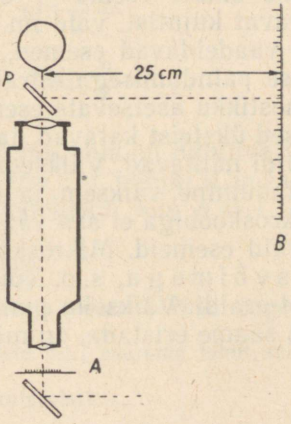
Kui see meil on õnnestunud, siis fikseerime joonla jaotiste arvu, mida katab eraldatud vahemik skaalal. Joonla ning skaala vastavate vahemike võrdlemise teel arvutame mikroskoobi suurenduse.

c) Teatavaid paremusi eelmisega võrreldes pakub järgmine võte. Rööbiti skaalaga asetatakse lauale riba valget paberit, projekteeritakse sellele mikroskoobis vaadeldavad jaotised, märgitakse

nende asukohad pliiatsiga ja mõõdetakse sel teel saadav vahemik skaala jaotistes. Selle võtte puhul asetatakse pabeririba silmast samuti parima nägemise kaugusele.

d) Skaalade võrdlemine osutub eriti lihtsaks ja ühe silmaga teostatavaks, kui kasutada poolläbipaistvat peeglit. Katseseadist kujutab skemaatiliselt joonis 162.

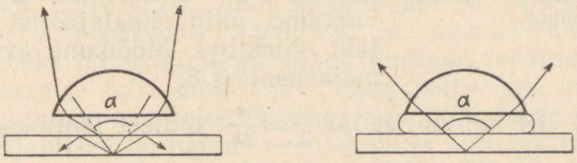
Okulaarile asetatakse mikroskoobi teljega 45°-se nurga all poolläbipaistev peegel *P*. Peegel võimaldab üheaegselt vaadelda mikroskoobi alla asetatud skaalat *A* ja mikroskoobist 25 cm kaugusele asetatud vertikaalset skaalat *B*. Mikroskoobist tulevad kiired läbivad peegli, kuna skaalalt *B* tulevad kiired peegelduvad. Skaalat *A* tuleb nihutada nii, et mõlemate skaalade kujutised kattuvad, ja võrdlus teostada, nagu on kirjeldatud punktis b.



Joon. 162. Suurenduse määramine poolläbipaistva peegliga.

Vaatlusi kordame vähemalt 5 korda, muutes iga kord vahemiku suurust skaalal. Vaatlustulemustest arvutame vastavad suurendused ja võtame neist aritmeetilise keskmise.

e) Mikroskoobis nähtava kujutise heledus oleneb esemest objektiivi pääseva valguse hulgast. See valgushulk on võrdeline esemest objektiivi pääsevate äärmiste kiirte vahelise poole nurga siinusega ja objektiivi ning eseme vahelise keskkonna murdumisnäitajaga. Korrutist $n \sin \frac{\alpha}{2}$ nimetatakse mikroskoobi apertuurarvuks, kus n tähendab keskkonna murdumisnäitajat ja α esemest objektiivi pääsevate äärmiste kiirte vahelist nurka. Seega on kujutise heledus võrdeline apertuurarvuga. Apertuurarvu on võimalik suurendada nurga α ja ka murdumisnäitaja n suurendamise teel. Murdumisnäitaja suurendamiseks asetatakse eseme ja objektiivi vahele suure murdumisnäitajaga vedelik, nn. immersioonivedelik. Selleks sobib näiteks seedriõli. Joonisel 163 on kujutatud objektiivi pääsevate äärmiste kiirte vaheline nurk ilma vedelikuta ja vedelikuga objektiivi puhul. Kuiva objektiivi puhul



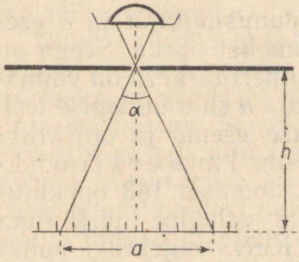
Joon. 163. Kuiv ja immersioonivedelikuga objektiiv.

($n = 1$) on apertuurarv maksimaalselt 0,95, kuna immersioonivedeliku kasutamisel võib see olla kuni 1,5.

f) Mikroskoobiga vaadeldavate väikeste esemete puhul, mille suurus on lähedane valguse lainepikkusele, toimub valguse paindumine ümber eseme — difraktsioon. Esemest ei teki enam teravat kujutist, vaid nn. difraktsiooniringikesed. Mida väiksemad on vaadeldavad esemed, seda suuremad on ringikesed (vrd. valguse paindumisega difraktsioonivõres, § 110). Küllalt väikeste ja lähestikku asetsevate esemete puhul tekib olukord, kus need ringikesed üksteist katavad, ja esemed pole seetõttu enam mikroskoobis eraldi nähtavad. Väiksema lainepikkusega valguse kasutamisel on paindumine väiksem ja esemed eraldatavamad. Siit järeldub, et mikroskoobiga ei saa vaadelda kuitahes väikesi ja lähestikku asetsevaid esemeid. Mikroskoobi suurendus on piiratud tema lahutusvõimega, s. o. võimega näidata kaht lähestikku asetsevat eset eraldi. Väikseim punktidevaheline kaugus d, mida mikroskoobis saame eristada, on määratud valemiga

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \frac{\alpha}{2}}, \qquad (1)$$

kus λ tähendab kasutatava valguse lainepikkust ja $n \sin \frac{\alpha}{2}$ mikroskoobi apertuurarvu. Suuruse d pöördväärtust $\frac{1}{d}$ nimetatakse mikroskoobi lahutusvõimeks. Kui lahutusvõime piir on saavutatud, siis edasine suurendamine uusi üksikasju esemest enam esile ei too ja seda nimetatakse tühjaks suurenduseks.



Joon. 164. Apertuurarvu määramine.

g) Lahutusvõime arvutamiseks peame määrama mikroskoobi apertuurarvu. Selleks määrame $\frac{\alpha}{2}$.

Eemaldame valgustuskondensori, asetame eseme alusele väikese avaga varustatud paberi, mida valgustame tugevasti mikroskoobi peegliga, ning teravustame mikroskoobi avale. Pöörame peegli horisontaalseks ja asetame peeglile tugevasti valgustatud mõõtskaala. Eemaldame okulaari ja vaatame, mitu skaalajaotist a paistab läbi objektiivi. Mõõdame ava kauguse mõõtskaalast h.

Jooniselt 164 nähtub, et $\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{a}{2h}$, millest lähtudes arvutame $\frac{\alpha}{2}$ ja $\sin \frac{\alpha}{2}$, kasutades selleks raamatu lõpus antud trigonomeetriliste funktsioonide tabelit (tabel 16).

Arvutused teeme järgmise skeemi kohaselt:

$a = \ldots\ldots$ cm

$h = \ldots\ldots$ cm

$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{a}{2h} = \ldots\ldots$

$\frac{\alpha}{2} = \ldots\ldots$

$\sin \frac{\alpha}{2} = \ldots\ldots$

$n \sin \frac{\alpha}{2} = \ldots\ldots$

Võttes valguse lainepikkuseks $\lambda = 555$ mμ, mis on nähtava valguse keskmine lainepikkus, arvutame valemi (1) põhjal d ja lahutusvõime. Kui ei kasutata immersioonivedelikku, siis $n = 1$.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas mikroskoobi suurendus oleneb vaatleja silma parima nägemise kaugusest?
2. Kuidas on võimalik kasutada ultravioletseid kiiri suurema lahutusvõime saavutamiseks?
3. Kas mikroskoobi lahutusvõime oleneb okulaarist?
4. Joonistada kiirte käik mikroskoobis.

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 179.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XXIV, § 8.

106. PRISMA MURDVA NURGA MÕÕTMINE

1. Tööülesanne

Goniomeetri ehitusega tutvumine. Prisma murdva nurga mõõtmine.

2. Töövahendid

Goniomeeter (spektromeeter), gaasipõleti koos keedusoolalahuses leotatud asbestitükiga ja klaasprisma.

3. Töö käik

a) Goniomeetri (mida nimetatakse ka spektromeetriks, spektraalaparaadiks ja spektroskoobiks) peaülesandeks on võimalikult täpne nurkade mõõtmine. See toimub vertikaalse telje ümber pööratava ketta abil, mille äär on varustatud nurga mõõtmise ringskaalaga (kraadid ja kraadiosad). Et skaala jaotised on kaunis peened, palja silmaga raskesti tabatavad, siis vaadeldakse neid vastava luubi abil, kusjuures skaala paremaks valgustamiseks kasutatakse erilist valgustusseadist.

Tutvuda skaala valgustusseadise, luubi ja jaotistega! Missugused jaotised on skaalal? Kui suure täpsusega saaksime võtta skaalalt lugemeid otsese vaatluse teel (ilma nooniuseta)? Kus asetseb skaala nulltäpp ja missugune on skaala ulatus?

Õppida kiiresti võtma skaalalt lugemeid ketta mitmesugustes asendites, enne teda vastava kruvi abil sellesse asendisse kinnitades!

Skaalalt suurema täpsusega lugemite saamiseks kasutatakse erilist liikuvat s k a a l a t — n o o n i u s t, mis on ehitatud samal põhimõttel kui pikkuse mõõtmise nooniuski (vt. § 23). Enne nooniuse kasutamist tuleb otseste vaatluste teel selgusele jõuda järgmistes küsimustes:

1) Mitu jaotist (kriipsuvahet) on nooniuse null- ja lõppkriipsu vahel?

2) Mitme skaalajaotisega (kriipsuvahega) võrdub nooniuse null- ja lõppkriipsu vahe?

3) Missuguse murdosa võrra erineb üks nooniusejaotis ühest skaalajaotisest?

4) Mitme minuti või sekundi võrra erineb üks skaalajaotis ühest nooniusejaotisest?

5) Kui suure täpsusega saame antud nooniuse abil võtta skaalalt lugemeid? Võrrelda seda palja silmaga võetava lugemi täpsusega!

Nooniuse ehituse põhimõttest järeldub, et kui üks skaalajaotis on ühest nooniusejaotisest suurem näiteks Δ' (või Δ'') võrra, siis n-nda nooniusekriipsu kõige täielikuma ühtelangemise korral mõne skaalakriipsuga tuleb skaalalt palja silmaga otseselt võetud lugemiga liita $n\Delta'$ (või $n\Delta''$).

Tuleb kindlasti silmas pidada, et kõik nooniused pole ühesuguse ehitusega. Seepärast tuleb iga riista puhul eraldi selgitada, missugune on s e l l e r i i s t a g a ühenduses olev noonius ning k u i s u u r e t ä p s u s e g a ta võimaldab võtta lugemeid.

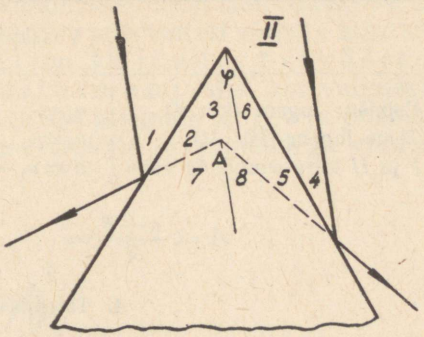
b) G o n i o m e e t r i t e i s e d o s a d. Skaalaga varustatud ketta teljel asetseb teine, väiksem ketas, mida saame pöörata püsttelje ümber iseseisvalt ja samuti koos alumise kettaga, teda vastava kruvi abil sellega ühendades. Mainitud ketast kasutame vaatlusobjekti (prisma) paigutamiseks.

Kiirtekimbu saamiseks kasutame valgusallikana gaasipõleti leeki, millesse on asetatud tükike keedusoolalahuses immutatud asbesti. Leegi tekitame nn. k o l l i m a a t o r i ehk p i l u t o r u pilu ees. See pilu asetseb just kollimaatori läätse fookuse tasandis. Seetõttu kulgevad leegist läbi pilu läätsele langevad kiired pärast murdumist rööpselt läätse optilise teljega. Järelikult on kollimaatori ülesandeks rööpse kiirtekimbu tekitamine. Need rööpsed kiired koonduvad pikksilma objektiivi fookuse tasandis ja annavad seal pilu kujutise. Seda pilu tõelist kujutist vaatlemegi pikksilma okulaariga.

NB! Pikksilma ei tohi kunagi pöörata toru otsast kinni hoides! Süütame kollimaatori pilu ees gaasipõleti ja asetame tema lee-

gisse keedusoolalahuses leotatud asbestitükikese. Seame pikksilma ja kollimaatori optilised teljed samale sihile ning reguleerime pikksilma okulaari seni, kuni saame läbi kollimaatori pilu paistvast leegist terava kujutise.

c) Kasutame nüüd saadud teadmisi ja oskusi prisma murdva nurga määramiseks. Selleks asetame prisma püsti goniomeetri alusele (väiksele kettale) nõnda, et murdev serv oleks pööratud kollimaatori pilu poole ja osa kollimaatorist tulevast rööpsest kiirtekimbust langeks prisma ühele, osa teisele tahule (joon. 165).



Joon. 165. Peegeldumine prisma tahkudelt.

Peegeldudes prisma mõlemalt tahult, moodustavad kiired nurga A. Geomeetriline arutlus näitab, et peegeldunud kiirte vaheline nurk A ja prisma murdev nurk φ on seotud valemiga $\varphi = \frac{A}{2}$. Järelikult, mõõtes A väärtuse, saame sellest otseselt arvutada murdva nurga φ.

Valemi $\varphi = \frac{A}{2}$ tuletamiseks tõmbame nurkade φ ja A tipust sirged rööbiti prismale langevate kiirtega I ja II (joon. 165). Peegeldumisseaduste ja tippnurkade omaduse põhjal $\angle 1 = \angle 2$. Rööpsuse alusel $\angle 1 = \angle 3$. Järelikult $\angle 2 = \angle 3$.

Analoogiliselt saame tõestada, et $\angle 5 = \angle 6$. Seega nurk $\varphi = \angle 3 + \angle 6 = \angle 2 + \angle 5$.

Jooniselt nähtub, et nurk $A = \angle 7 + \angle 8 = (\angle 1 + \angle 2) + (\angle 4 + \angle 5) = 2 \cdot \angle 2 + 2 \cdot \angle 5 = 2(\angle 2 + \angle 5) = 2\varphi$. Siit $\varphi = \frac{A}{2}$.

Asetame prisma võimalikult aluslaua keskele ja reguleerime prisma ning pikksilma nõnda, et prisma murdva nurga tahkudelt peegeldunud kiired annaksid pikksilmas terava kujutise. Fikseerime (kinnistame) selle aluse asendi ja võtame ringskaala lugemid nii ühelt kui ka teiselt prisma tahult peegeldunud kiirte kohta. Seejuures tuleb silmas pidada järgmist: kui pikksilma pööramisel kiirelt I kiirele II minnes ületatakse skaalal 360° kriips, siis tuleb pöördenurgaks võtta lugemite vahe täiendusnurk 360°-ni (mispärast?). Iga lugemi puhul kasutame mõlemat nooniust, nii vasak- kui ka parempoolset. Leiame mõlema nooniuse abil saadavad tulemused eraldi ning võtame neist aritmeetilise keskmise. Nooniuste lugemid registreerime järgmiselt:

	Vasakpoolne noonius	Parempoolne noonius
Esimene lugem (kiir *I*)	$\alpha_1 =$	$\beta_1 =$ .....
Teine lugem (kiir *II*)	$\alpha_2 =$	$\beta_2 =$ .....
I ja *II* kiire suundade vahe	$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 =$	$\beta = \beta_1 - \beta_2 =$ .....

$$A = \frac{\alpha + \beta}{2} = \ldots\ldots \qquad \varphi = \frac{A}{2} = \ldots\ldots$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas levib valgus (hääl) ühtlases keskkonnas? Kui suur on valguse (hääle) levimiskiirus?
2. Sõnastada peegeldumise seadused.
3. Kuidas ehitada valguspunkti kujutis tasa-, nõgus- ja kumerpeeglis?
4. Tuletada valem $\varphi = \frac{A}{2}$ üldjuhul, kui kiired ei lange prismale sümmeetriliselt.
5. Miks asetatakse põleti leeki keedusoolaga immutatud asbestitükike?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 164.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XIX, § 8.

107. KLAASI MURDUMISNÄITAJA MÄÄRAMINE

1. Tööülesanne

Tutvumine valguskiire murdumisega optilises prismas. Prisma aine (klaasi) murdumisnäitaja määramine.

2. Töövahendid

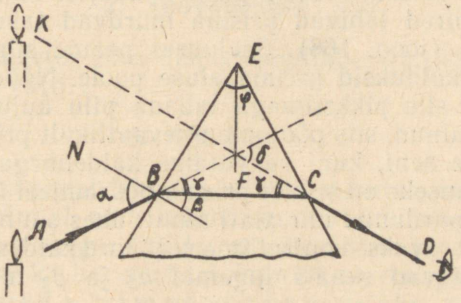
Spektromeeter, gaasipõleti koos keedusoolalahuses leotatud asbestitükiga ja klaasprisma.

3. Töö käik

a) Optiliseks prismaks nimetatakse füüsikas läbipaistvat keha, millel on vähemalt kaks mitteparalleelset tasast tahku. Tahkude lõikuvaid tasapindu nimetatakse murdvateks tasapindadeks, nende lõikejoont murdvaks servaks ja samade tasapindade vahelist joonnurka murdvaks nurgaks. Murdva serva vastaspind on prisma alus.

Katsed ja kiirte käigu ehitamine näitavad, et optilist prismat läbivad valguskiired kalduvad kõrvale prisma aluse poole, kui prisma on optiliselt tihedam teda ümbritse-

vast keskkonnast. Selle kõrvalekaldumise suurust iseloomustab k a l d e n u r k δ, s. o. nurk prismale langeva ja prismast väljuva kiire sihtide vahel. Sama prisma puhul on k a l d e n u r g a v ä ä r t u s k õ i g e v ä i k s e m (k a l d e m i i n i m u m) siis, kui valguskiir läbib prismat sümmeetriliselt, s. o. kui prismale langev ja prismast väljuv kiir moodustavad prisma murdvate tasapindadega võrdsed nurgad (joon. 166).



Joon. 166. Valguskiire kõrvalekaldumine prismas.

b) Matemaatiline arutlus näitab, et prisma aine murdumisnäitaja n, prisma murdev nurk φ ja valguskiire kaldenurga minimaalväärtus δ on seotud valemiga

$$n = \frac{\sin\frac{\varphi+\delta}{2}}{\sin\frac{\varphi}{2}}. \qquad (1)$$

Selle valemi tuletamiseks tõmbame nurga φ poolitaja EF (joon. 166). Siis $\frac{\varphi}{2} = \angle BEF$ ja murdumisnurk $\beta = \angle BEF = \frac{\varphi}{2}$ kui vastastikku risti olevate haaradega nurgad. Jooniselt nähtub, et langemisnurk $\alpha = \beta + \gamma$. Et kiir läbib prisma sümmeetriliselt, siis $\delta = 2\gamma$, millest $\gamma = \frac{\delta}{2}$. Asendades saame:

$$\alpha = \beta + \gamma = \frac{\varphi}{2} + \frac{\delta}{2} = \frac{\varphi+\delta}{2}.$$

Järelikult murdumisnäitaja

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\sin\frac{\varphi+\delta}{2}}{\sin\frac{\varphi}{2}}.$$

Seda valemit kasutamegi murdumisnäitaja n määramiseks. Nagu näha, on selleks tarvis teada kaht suurust: murdvat nurka φ ja

kaldenurga miinimumi δ. Kaldenurga miinimumi määrame järgmiselt:

1) Teeme kindlaks kollimaatorist tulevate rööpsete kiirte sihi. Selleks asetame pikksilma kollimaatoriga rööbiti (samas sihis), reguleerime pilu kujutise teravaks ning fikseerime vastavad skaala lugemid α_1 ja β_1 mõlema nooniuse abil.

NB! Pikksilma ei tohi kunagi pöörata toru otsast kinni hoides!

2) Asetame prisma alusele püsti nõnda, et kollimaatorist tulevad rööpsed kiired läbivad prisma murdvad tahud enam-vähem sümmeetriliselt (joon. 166). Seejuures peame silmas, et prismat läbivad kiired kalduksid prisma aluse poole. Nüüd püüame algul palja silmaga, siis pikksilmaga tabada pilu kujutist. Kui oleme sellega toime tulnud, siis pöörame ettevaatlikult prisma alust ühele ja teisele poole seni, kuni saavutame kaldenurga minimaalväärtuse. Selle tunnuseks on see, et prisma pööramisel ükskõik kummas suunas liigub murdunud kiir alati ainult ühes suunas. Siis reguleerime kujutise teravaks, kontrollime veel kord kaldenurga suurust ja fikseerime vastavad skaala lugemid α_2 ja β_2 mõlema nooniuse abil.

Mõõtmistulemused kanname tabelisse samuti nagu eelmiseski töös, nimelt:

	Vasakpoolne noonius	Parempoolne noonius
Kiirte siht prismat läbimata	$\alpha_1 =$	$\beta_1 =$ .....
Kiirte siht kaldemiinimumi asendis	$\alpha_2 =$	$\beta_2 =$ .....
	$\delta_1 = \alpha_2 - \alpha_1 =$	$\delta_2 = \beta_2 - \beta_1 =$ ...

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}.$$

Olles määranud δ väärtuse, saame valemi (1) põhjal arvutada n, sest murdev nurk φ oli määratud juba eelmises töös. Arvutamise hõlbustamiseks kasutame logaritmide tabeleid.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Sõnastada valguse murdumise seadused.
2. Kui suur on vee ja kui suur klaasi murdumisnäitaja?
3. Määrata klaasi murdumisnäitaja vee suhtes ning ümberpöördult.
4. Joonistada kiirte käik läbi prisma, kui prisma murdumisnäitaja on väiksem ümbritseva keskkonna murdumisnäitajast (õhkprisma vees).

5. Kirjandust

Mihelson, Füüsika II, ptk. XIX, § 10.

108. VEDELIKU MURDUMISNÄITAJA MÄÄRAMINE ABBE REFRAKTOMEETRI ABIL

1. Tööülesanne

Abbe refraktomeetri ehituse põhimõttega tutvumine. Vedeliku murdumisnäitaja ning dispersiooni määramine.

2. Töövahendid

Abbe refraktomeeter koos dispersioonitabeliga, uuritav vedelik, bensiin ja tükike vatti.

3. Töö käik

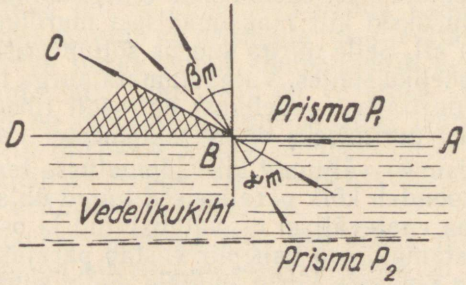
a) Ühest keskkonnast teise üle minnes muudab valguskiir keskkondade lahutuspinnal oma levimissuunda ehk murdub. Valguskiire langemisnurga (α) ja murdumisnurga (β) siinuste suhe on kahe antud keskkonna jaoks konstantne arv, mida nimetatakse selle keskkonna murdumisnäitajaks (n), kuhu kiir läheb, selle keskkonna suhtes, kust kiir tuleb. Seega

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n = \text{const.}$$

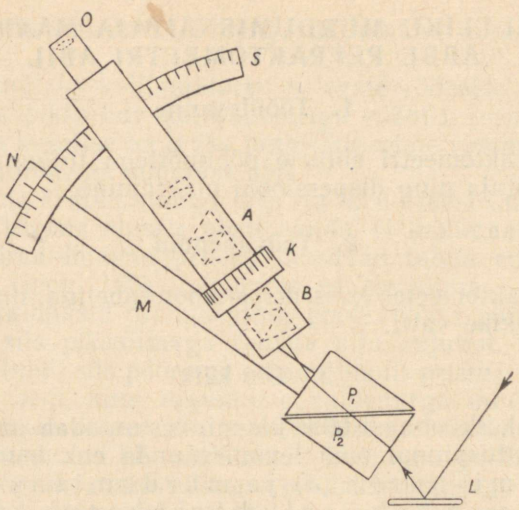
Mingi aine murdumisnäitajat vaakuumi (tühja ruumi) suhtes nimetatakse selle aine absoluutseks murdumisnäitajaks. Absoluutsed murdumisnäitajad ei erine kuigi palju (on umbes 0,03% suuremad) murdumisnäitajatest õhu suhtes. Tabeliandmed on harilikult absoluutsed murdumisnäitajad.

Absoluutne murdumisnäitaja iseloomustab aine optilist tihedust. Suurema murdumisnäitajaga aineid nimetame optiliselt tihedamateks.

Kui valguskiir läheb optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse keskkonda, siis on murdumisnurk alati väiksem kui langemisnurk. Kõige suurem murdumisnurk vastab langemisnurgale 90°. Joonisel 167 on kujutatud keskkondade vahepinnale DA



Joon. 167. Kiirte üleminek vedelikust prismasse.



Joon. 168. Abbe refraktomeetri skeem.

punkti *B* langevate kiirte üleminek optiliselt hõredamast keskkonnast tihedamasse keskkonda. Jooniselt nähtub, et nurka *CBD* ei saa murduda ükski punkti *B* langev kiir. Seega jääb nurk *CBD* valgustamata.

Seda nähtust kasutatakse murdumisnäitaja määramisel Abbe refraktomeetriga. Refraktomeetriteks nimetatakse riistu, millega määratakse ainete murdumisnäitajaid.

b) Abbe refraktomeetri põhiliseks osaks on suure murdumisnäitajaga klaasist (raskest flintklaasist) nelinurkne klaasprisma, mis on diagonaalpinda mööda lõigatud kaheks pooleks P_1 ja P_2 (joon. 168). Alumisel prismal on diagonaalpind mateeritud ja ülemisel poleeritud. Uuritav vedelik paigutatakse prismade vahele, kus ta moodustab õhukese kihi. Valgus juhitakse prismasse alumise poole otsatahust. Mateeritud pinnast tungib valgus vedelikku kõikides suundades. Üleminekul vedelikukihist ülemisse prismasse ei murdu ükski kiir maksimaalsest murdumisnurgast (β_m) suurema nurga all. Selle nurga suurus sõltub prisma aine murdumisnäitajast vedeliku suhtes. Valgustamata nurga tekkimiseks peab prisma olema uuritavast vedelikust optiliselt tihedam. Ainult niisuguste vedelike uurimiseks on refraktomeeter kasutatav.

Jälgides prismast väljunud kiiri lõpmatusse teravustatud pikksilmaga, mis koondab kõik paralleelsed kiired ühte punkti, leiame, et osa pikksilma vaateväljast on valgustatud ja osa pime. Valgustatud ja valgustamata osa vahepiir vastab parajasti maksimaalset murdumisnurka omavate kiirte suunale. Selle suuna täpseks määramiseks on pikksilm varustatud niitristiga. Pikksilmaga on liiku-

matult ühendatud skaala, millele on kantud murdumisnäitaja suurused. Kiirte suuna muutmine toimub prisma pööramise teel. Prismaga on kindlalt ühendatud skaala kohal liikuv märk, mille asukoht määrab murdumisnäitaja suuruse, kui vaatevälja vahepiir on mikroskoobi niitristi kohal.

c) Olles riistaga üldiselt tutvunud, eemaldame prisma pooled P_1 ja P_2 teineteisest ning seame P_2 ülemise tahu enam-vähem rõhtsaks. Sellele tahule tilgutame mõned piisad uuritavat vedelikku. Vedelikku peab olema nii palju, et kokkupandud prismade vahe oleks vedelikukihiga ühtlaselt täidetud. Kui prismade pinnad pole küllalt puhtad, siis tuleb neid bensiinis niisutatud vatitükikesega ettevaatlikult puhastada. Tuleb hoiduda prismade pindu käega või mõne kõva esemega puudutamast, sest flintklaas on pehme ja kriimustub kergesti. Vedeliku tilgutamiseks võib kasutada sulge või puulaastukest.

Kui vedelik on tilgutatud prismade vahele, paneme prismad uuesti kokku, viime riista vaatluseks sobivasse asendisse ja seame peegli L nõnda, et prismasse P_2 tungiks küllaldaselt valgust. Siis on pikksilma vaateväli heledasti valgustatud.

Nüüd reguleerime okulaari O edasi-tagasi nihutamisega niitristi teravaks ja pöörame prismasid pidemest M seni, kuni terav piirjoon vaatevälja valgustatud ja valgustamata osa vahel on just niitristi kohal. Kui see on saavutatud, siis loeme skaalalt S liikuva pideme kriipsu N vastas oleva murdumisnäitaja suuruse.

Esitatud katsekirjeldus on kehtiv ühevärvilise ehk monokromaatse valguse puhul, nagu seda on näiteks naatriumileegi kollane valgus. Kasutades aga valget valgust (päevavalgust), näeme üldjuhul pikksilma vaatevälja valgustatud ja valgustamata osa vahel värviliste äärtega vööti. Värvilise vöödi tekkimist põhjustab erineva lainepikkusega kiirte erinev murdumisnäitaja ja seega ka erinev maksimaalne murdumisnurk (β_m) kiirte siirdumisel vedelikust prismasse P_1.

Värvilise vöödi kaotamiseks on pikksilma torus kompensaator, mis koosneb kahest võrdsest (Na-leegi jaoks) otsevaate-prismast (vt. ka § 112) A ja B. Prismad on teineteise suhtes vastava kruvi abil pikksilma optilise telje ümber pööratavad, nii et nende murdev nurk võib muutuda nullist kuni üksikprisma kahekordse murdva nurgani. Seejuures muutub ka prismade poolt tekitatav dispersioon, mis paraja murdva nurga puhul kompenseerib vedelikukihis tekkiva dispersiooni. Selle tunnuseks on värvilise vöödi kadumine. Prismade asend on määratav kompensaatori trumlil K asetseva skaalaga. Värvitu piirjoone leiame kompensaatori kahes asendis, mis on sümmeetrilised 0-lugemi suhtes. Arvutamisel tuleb neist lugemeist võtta aritmeetiline keskmine.

Kaotanud kompensaatoriga värvilise vöödi, määrame murdumisnäitaja, nagu on kirjeldatud eespool. Riist on ehitatud nii, et sel viisil määratud murdumisnäitaja on õige naatriumi D-joone jaoks.

Mitmesuguseist aineist prismadega võrdseil tingimusil tekitatud spektrite kõrvutamisel leiame, et nende spektrite pikkused on erinevad. Aineid, mis annavad pikemaid spektreid, nimetatakse suurema dispersiooniga aineiks. Dispersiooni arvuliseks määramiseks kasutatakse eri värvusega kiirte murdumisnäitajate vahet. Nii defineeritakse aine eridispersioonina spektri H- ja C-joone murdumisnäitajate vahet $n_H - n_C$ ja keskmise dispersioonina spektri F- ja C-joone murdumisnäitajate vahet $n_F - n_C$. Suhet $\frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$ nimetatakse relatiivseks dispersiooniks.

Kasutades refraktomeetriga kaasas olevat tabelit, saame kompensaatori lugemi ja murdumisnäitaja põhjal arvutada uuritava aine keskmise dispersiooni $n_F - n_C$. Suurema täpsuse saavutamiseks kordame vaatlusi, võttes enne dispersiooni arvutamist vaatlusandmeist aritmeetilise keskmise.

Et refraktomeeter võimaldab murdumisnäitajat määrata suure täpsusega, siis saame määrata ka murdumisnäitaja sõltuvuse temperatuurist. Prismade süsteemi P_1, P_2 ja seega ka uuritava vedeliku temperatuuri määramiseks on prismade hoidjas ava termomeetri paigutamiseks. Temperatuuri muutmiseks juhitakse prismadest mööda vastava temperatuuriga vett. Selleks on prismade hoidjate küljes torud. Konstantse temperatuuriga vett saadakse termostaadist.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kui suur on maksimaalne murdumisnurk valguskiire siirdumisel õhust vette, õhust klaasi ja veest klaasi?
2. Miks läigivad õhumullid vees?
3. Kas kirjeldatud refraktomeeter on rakendatav ka tahkete ainete puhul?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 161.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XIX, § 3, 4 ja 10.

109. SUHKRULAHUSE ERIPÖÖRANGU MÄÄRAMINE SAHHARIMEETRIGA

1. Tööülesanne

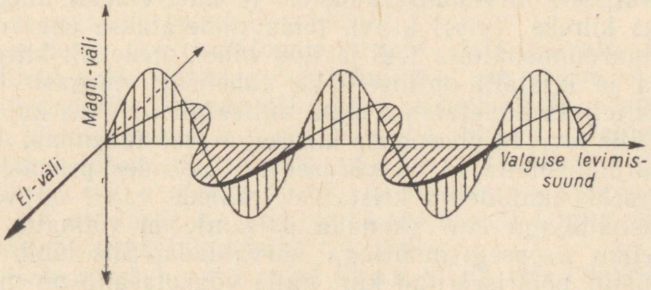
Valguse polarisatsiooni nähtustega tutvumine. Suhkrulahuse eripöörangu määramine sahharimeetriga.

2. Töövahendid

Sahharimeeter, gaasipõleti Na-leegi saamiseks, klaastoru suhkrulahusega täitmiseks, suhkrut, mensuur ja varbsirkel.

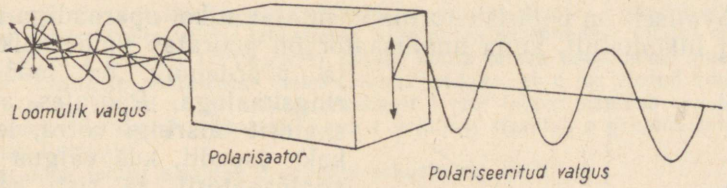
3. Töö käik

a) Valgus on elektromagnetiline lainetus, kusjuures elektri- ja magnetivälja perioodiline muutumine — lainetus — toimub risti valguse levimissuunaga. Seejuures on ka elektri- ja magnetiväli omavahel risti. Kirjeldatud levimisviisi kujutab joonis 169.



Joon. 169. Valguse levimine.

Valguse lainetusest kõneldes mõeldakse tavaliselt elektrivälja muutumist, sest see ärritab silma. Loomulikus valguses toimub võnkumine kõikides suundades, mis on risti valguse levimissuunaga. Võnkumis- ja levimissuunaga määratud tasandit nimetatakse võnketasandiks. Loomuliku valguse võnketasand on muutlik ja selleks võib olla iga kiirt läbiv tasand. Kui võnkumine toimub ainult ühes kindlas tasandis, siis nimetatakse valgust lineaarselt polariseeritud valguseks. Mitmesuguste vahenditega, mida nimetatakse polarisaatoriteks, on loomulikust valgusest võimalik saada polariseeritud valgust (joon. 170). Nii



Joon. 170. Polariseeritud valguse tekkimine loomulikust valgusest.

näiteks tekib polariseeritud valgus peegeldumisel läbipaistvatelt kehadelt. Selle kohta on kehtiv Brewsteri seadus, mis väidab, et peegeldunud kiir on täielikult polariseeritud, kui peegeldunud ja murdunud kiire vaheline nurk on 90° (joon. 171). Siis on murdumisnäitaja

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha.$$

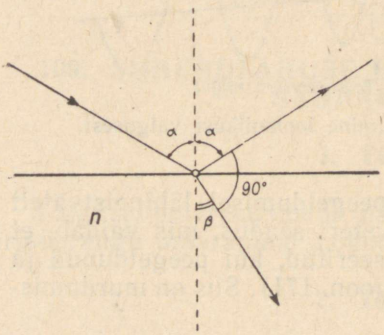
Klaasi puhul, mille murdumisnäitaja $n = 1{,}5$, on vastav langemisnurk 57°. Murdunud kiir on ka polariseeritud, kuid mitte täielikult.

Täielikult polariseerivad neid läbivat valgust mõned kristallid. Lubjapaokristalli läbiv kiir jaguneb kaheks kiireks, kusjuures mõlemad kiired on kindlasuunaliselt polariseeritud ja nende võnketasandid on omavahel risti. Üks kiir murdumisnäitajaga $n = 1{,}66$ allub tavalistele murdumisseadustele ja kiirt ennast nimetatakse tavaliseks kiireks. Teisel kiirel, mida nimetatakse ebatavaliseks, muutub murdumisnäitaja 1,49 ja 1,66 vahel, olenevalt kiire langemissuuna ja kristalli optilise telje vahelisest nurgast. Kristalli optiliseks teljeks nimetatakse sihti, milles nii tavaline kui ka ebatavaline kiir levivad ühesuguse kiirusega (see tähendab, et nende kiirte murdumisnäitajad on võrdsed). Kasutades prismat kahest niisugusest kokkuliidetud kristallist, millede vahel on väiksema murdumisnäitajaga aine (kanada palsam), on võimalik tavalist kiirt täieliku sisepeegeldumisega kõrvaldada. Siis läbib prismat üks täielikult polariseeritud kiir, mille võnketasand on määratud prisma ehitusega. Niisuguseid prismasid nimetatakse nikoliteks (joon. 172).

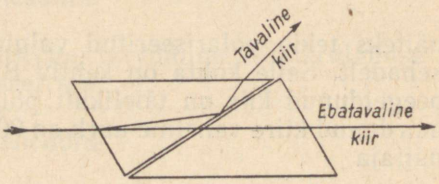
Polariseeritud valgus läbib nikolit tõkestamatult, kui nikoli poolt polariseeritava valguse võnketasand ühtib kasutatava valguse võnketasandiga. Kui mõlemad tasandid on omavahel risti, siis ei pääse valgus üldse läbi. Vahepealsetes asendites pääseb valgus läbi osaliselt. Seega on nikoliga võimalik kindlaks teha, kas valgus on polariseeritud. Kui nikolit pöörates märkame teda läbiva valguse intensiivsuse muutumist, siis on valgus polariseeritud. Valguse polarisatsiooni määramise vahendeid nimetatakse *analüsaatoriteks*.

Kahest nikolist — analüsaatorist ja polarisaatorist — koosnevat aparaati nimetatakse *polarisatsiooniaparaadiks* ehk *polarimeetriks*.

Tavaliselt on polarisaatorina kasutatav nikol aparaadiga ühendatud liikumatult, kuna analüsaator on pööratav ümber pikitelje ja pöördenurk on mõõdetav ringskaalaga. Pöörates analüsaatorit täisringi võrra, leiame kaks asendit, kus valgus läbib analüsaatorit, ja risti eelmistega kaks asendit, kus ta ei



Joon. 171. Polarisatsioon peegeldumisel ja murdumisel.



Joon. 172 Nikol.

läbi. Kui valgus läbib nikoleid tõkestamatult, siis ütleme, et nikolid on paralleelsed, ja kui valgus läbi ei pääse, siis risti.

Polarisatsiooniaparaate kasutatakse edukalt ainete uurimiseks, mis pööravad neid läbiva polariseeritud valguse võnketasandit. Niisuguseid aineid nimetatakse optiliselt aktiivseiks.

Optiliselt aktiivsete ainete hulka kuulub ka suhkur. Mõned suhkruliigid pööravad võnketasandit paremale (roo- ja peedisuhkur), teised vasakule (puuviljasuhkrud).

Kui asetame polarisatsiooniaparaadi risti olevate nikolite vahele näiteks suhkrulahusega täidetud toru, siis selgub, et valgus läbib analüsaatorit. Valguse läbipääsu tõkestamiseks peame analüsaatorit teatava nurga α võrra pöörama. Sellest järeldame, et suhkrulahuse läbimisel pöördub valguse võnketasand nurga α võrra. Pöördenurk α oleneb ainest ja kasutatava valguse lainepikkusest; ta on võrdeline lahusekihi paksusega l ning optiliselt aktiivse aine kontsentratsiooniga c lahuses.

Ainet iseloomustab nn. eripöörang $[\alpha]$, mis lahuste puhul defineeritakse pöördenurgana, mille tekitaks 1 dm paksune lahusekiht kontsentratsiooniga 1. Viimase all mõeldakse lahust, mille 1 cm³ sisaldab 1 g ehk 100 cm³ 100 g optiliselt aktiivset ainet.

Seega pöördenurk

$$\alpha = [\alpha]cl, \tag{1}$$

millest eripöörang

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{cl}. \tag{2}$$

Suurema täpsuse huvides märgitakse eripöörangu sümboli juurde ka kasutatud valguse lainepikkus ning lahuse temperatuur. Nii tähendab $[\alpha]_D^{20}$ eripöörangut Na D-joone lainepikkusel ja temperatuuril $+20°$ C.

Valemile (2) antakse sageli teine kuju, asendades temas kontsentratsiooni c (1 cm³ lahuse kohta tuleva lahustunud aine hulga grammides) lahuse erikaaluga e ja iga 1 grammi (mitte cm³!) lahuse kohta tuleva lahustunud aine hulgaga p. Eksituste vältimiseks tuleb silmas pidada, et c on võetud ruumala (1 cm³), p aga massi (1 g) suhtes. Järelikult 1 cm³ lahust sisaldab c g lahustunud ainet ning kaalub e grammi, kuna 1 g lahust sisaldab p grammi lahustunud ainet. Lühidalt:

e grammi lahust sisaldab c grammi lahustunud ainet
1 gramm „ „ p „ „ „

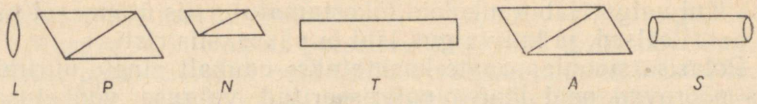
Siit $e = \frac{c}{p}$, millest $c = ep$.

Asetades valemis (2) c asemele temaga võrdse väärtuse ep, saame:

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{epl}. \tag{3}$$

Olles määranud polarisatsiooniaparaadiga pöördenurga α ja teades aine eripöörangut ning kihi paksust, saame valemi (2) põhjal arvutada lahuse kontsentratsiooni.

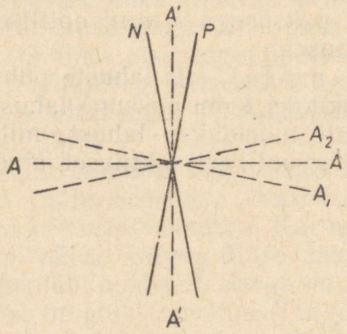
Polarisatsiooniaparaate kasutatakse sageli suhkrulahuste kont-



Joon. 173. Poolvarju-polarimeetri skeem.

sentratsiooni määramiseks ja neid nimetatakse siis sahharimeetriteks.

b) Meil kasutatav poolvarju-polarimeeter (joon. 173) koosneb esiläätsest L paralleelse kiirtekimbu saamiseks, polarisaatorist P, väikesest nikolist N, mis poolitab vaatevälja, analüsaatorist A ja pikksilmast S. Polarisaatorit P ja nikolit N läbiva valguse võnketasandid moodustavad omavahel väikese nurga. Joonisel 174 tähistavad neid tasandeid pidevad jooned N ja P. Kui analüsaatori võnketasand on risti kas polarisaatori P või nikoli N võnketasandiga joonisel katkendlike joontega kujutatud asendis A_1 või A_2, siis on sahharimeetri vaatevälja üks pool pime ja teine pool nõrgalt valgustatud. Nende kahe asendi vahel on asend A, kus mõlemad pooled on võrdselt nõrgalt valgustatud. See on aparaadi nullseis.



Joon. 174. Võnketasandite asendid.

Analüsaatorit 360° võrra pöörates leiame kaks asendit, kus vaateväli on ühtlaselt nõrgalt valgustatud (asendid A), ja kaks asendit, kus see on ühtlaselt tugevalt valgustatud (asendid A'). Nullseisuna võib kasutada ka asendit A', kuid seejuures saavutatav täpsus on väiksem.

c) Töö teostamiseks valmistame suhkrulahuse kontsentratsiooniga mitte üle 10%. Selleks kaalume c g suhkrut mensuuri ja lisame destilleeritud vett, kuni saame 100 cm³ lahust. Hästi segatud lahusega täidame uurimistoru, mille otsad on suletavad klaasplaatidega. Täitmisel tuleb vältida õhumullide jäämist torru. Toru pikkuse l määrame varbsirkliga. Nüüd süütame gaasipõleti Na-leegi *, teravustame pikksilma nikoli N esiservale ja määrame aparaadi nullseisu mõlemaid nooniusi kasutades. Asetame suhkrulahusega täidetud toru T analüsaatori ja polarisaatori vahele ning teravustame pikksilma. Selgub, et vaatevälja endiselt ühtlase valgustuse saamiseks tuleb analüsaatorit pöörata. Registreerime nooniuste lugemid uues asendis. Uue ja endise asendi vahe annabki võnketasandi otsitava pöördenurga α.

* Uuemad seda tüüpi sahharimeetrid võimaldavad ka valge valgusega töötamist. Neil on sisenemisava kaetud värvilise klaasiga, mis laseb läbi ainult kitsa lainepikkuste vahemiku, ja väike nikol asub vaatevälja keskel.

Suurema täpsuse saavutamiseks kordame mõõtmist 180° võrra pööratud analüsaatoriga ja võtame tulemustest aritmeetilise keskmise. Saadud andmeist arvutame valemi (2) põhjal eripöörangu [α]. Pärast katset tuleb toru hoolikalt suhkrulahusest puhastada ja lõpuks destilleeritud veega loputada.

d) Valge valgusega töötamist võimaldava Soleil' sahharimeetri nikolid on liikumatult ühendatud aparaadiga ja seejuures nii, et nende võnketasandid on paralleelsed.

Looduses leiduvast kvartsist pöörab üks osa polariseeritud valguse võnketasandit vasakule, teine paremale. Võnketasandi pöördenurga suurus oleneb läbitud kihi paksusest ja valguse lainepikkusest.

Soleil' sahharimeetris asetatakse nikolite vahele kvartsplaat, millest pool on võnketasandit vasakule ja pool paremale pöörav. Plaadi poolte vahejoon poolitab parajasti aparaadi vaatevälja. Plaadi paksus on 3,75 mm ja ta pöörab kollakasrohelise valguse võnketasandit 90°. Seega ei läbi analüsaatorit mainitud värvusega valgus ja vaateväli paistab punakasvioletsena (kollakasrohelise täiendusvärv). Analüsaatori vähimgi pööramine võimaldab kollakasrohelise valguse läbipääsu, mille tõttu vaatevälja üks pool värvub punakamaks ja teine sinakamaks. Et inimese silm on kollakasrohelisele valgusele kõige tundlikum, siis on võimalik eriti täpselt määrata aparaadi nullseisu, s. o. seisu, kus vaateväli on ühtlaselt punakasvioletne.

Analüsaatori pööramise asemel nihutatakse teineteise suhtes kaht nikolite vahele asetatud kvartskiilu, mis pööravad võnketasandit vasakule. Kiilude nihutamisel muutub kvartsikihi paksus. Kiilude mõju tasakaalustamiseks on aparaadis veel konstantse paksusega kvartsplaat, mis pöörab võnketasandit paremale. Kui skaala on nullseisus, siis on kiilude ja plaadi paksused võrdsed ning vaateväli ühtlase värvusega. Paksuse väikseimagi erinevuse puhul muutub vaatevälja poolte värvus.

Uuritava aine võnketasandi pöörangu määramiseks asetame aine nikolite vahele. Vaatevälja ühtlase värvuse saamiseks peame nüüd kiile reguleerima vasakule poole pöörava aine puhul õhemaks ja paremale poole pöörava aine puhul paksemaks. Kiilude nihkumist näitab skaala, millel on lugemi võtmise täpsuse suurendamiseks ka noonius. Skaala on sageli jaotatud meelevaldseisse ühikuisse, mille ümberarvutamiseks kraadidesse peame teadma vastavat aparaadi konstanti. Kui see pole teada, siis määrame ta tuntud kontsentratsiooniga suhkrulahuse abil.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kas häälelaineid on võimalik polariseerida?
2. Miks kasutatakse poolvarju-sahharimeetri puhul monokromaatset valgust?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., § 206.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XXV, §§ 1—4, 7, 8, 10, 22—24.

110. VALGUSE LAINEPIKKUSE MÄÄRAMINE DIFRAKTSIOONIVÕREGA

1. Tööülesanne

Na-leegi *D*-joone lainepikkuse määramine.

2. Töövahendid

Spektromeeter, difraktsioonivõre, gaasipõleti Na-leek ja mõõtemikroskoop.

3. Töö käik

a) Kohates tõkkeid, paindub valgus oma levimisel sirgest teest kõrvale. Seda nähtust nimetatakse difraktsiooniks. Difraktsioon ilmneb eriti pilude ja tõkete puhul, millede laius palju ei ületa valguse lainepikkust. Praktiliselt on valguse difraktsiooni nähtus rakendatav rea kõrvuti asetsevate võrdse laiusega pilude ehk nn. difraktsioonivõre puhul. Difraktsioonivõret saab kasutada valguse lainepikkuse määramiseks.

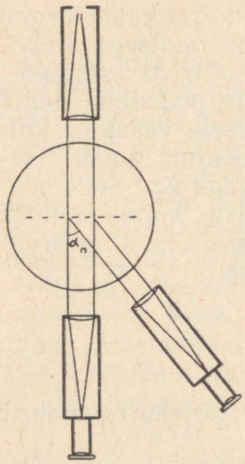
Võre koosneb hulgast kitsastest paralleelsetest, näiteks teemandiga klaasile kriimustatud joontest. Kriimustatud kohad on tuhmid ega lase valgust läbi, kuna kriimustamata kohti läbib valgus ja nad moodustavad pilud. Kaugust pilu ühest servast naaberpilu samapoolse servani või üldiselt kahe naaberpilu vastavate punktide vahelist kaugust nimetatakse difraktsioonivõre konstandiks d.

Asetame difraktsioonivõre spektromeetri alusele risti kollimaatorist tulevate paralleelsete kiirtega nii, et võre jooned on piluga paralleelsed. Sel puhul näeme pikksilmas võret otse läbinud kiirtest tekkinud pilu kujutise kõrval kummalgi pool veel rea nõrgema heledusega pilu kujutisi. Need kujutised tekivad valguse difraktsiooni tõttu võres ja asetsevad suundades, mis moodustavad võret otse läbinud kiirtega nurgad α_n (joon. 175). Viimased on määratud valemiga

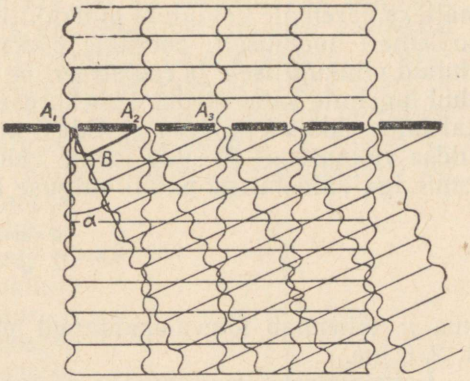
$$\sin \alpha_n = \frac{n\lambda}{d}, \qquad (1)$$

kus d tähendab võrekonstanti, λ kasutatava valguse lainepikkust ja n pilu kujutise järjekorranumbrit, kui lugeda pilu keskmise kujutise järjekorranumber nulliks.

Valemi (1) tuletamiseks vaatleme võrega risti langeva paralleelse kiirtekimbu paindumist võre läbimisel. Rakendades Huygensi printsiipi, mis lubab laine iga punkti vaadelda uue elementaarlaine allikana (joon. 176), näeme, et suundades, milles naaberpilusid läbinud vastavate kiirte käiguvahe on lainepikkuse täisarvkordne, näiteks λ, 2λ, 3λ jne., toimub kõiki pilusid läbinud kiirte võnkumine samas faasis, andes seega nendes suundades maksi-



Joon. 175. Valguse lainepikkuse määramine difraktsioonivõrega.



Joon. 176. Valguse difraktsioon võre läbimisel.

maalse heleduse. Jälgides täisnurkset kolmnurka A_1A_2B, võime kirjutada geomeetrilistest kaalutlustest seose (1), sest kaatet $A_1B = \lambda$, 2λ jne., kuna hüpotenuus $A_1A_2 = d$ ja nurk $A_1A_2B = \alpha$.

Seosest (1) ja jooniselt 176 näeme, et nurk α on seda suurem, mida suurem on kasutatav lainepikkus λ ja mida väiksem on võrekonstant d. Vahepealsetes suundades toimuv valguse kustumine on seda täielikum, mida suurem on võre joonte arv, sest siis võime alati leida paarikaupa pilusid, mida läbinud kiirte käiguvahe on paaritu arv korda $\frac{1}{2}\lambda$, mistõttu need kiired vastastikku hävivad.

Kasutades valget valgust, saame kõrvalekaldunud kitsa pilu kujutise asemel laia spektri, mille violetne ots on vähem ja punane ots rohkem kõrvale kaldunud (vastavalt lainepikkustele). Sel viisil saadud spektrit nimetatakse *difraktsioonispektriks* ja ka *normaalspektriks*, sest värvide suhteline paigutus oleneb ainult lainepikkusest ja on väikese kaldenurga puhul, kus $\sin\alpha \approx \alpha$, võrdeline lainepikkusega.

Kui kõrvutame difraktsioonivõrega ja prismaga tekitatud spektrid, siis selgub, et prisma spektril on violetne osa punasega võrreldes välja venitatud. Joonistades vastavad dispersioonikõverad (vt. § 112), näeme, et erinevalt prisma dispersioonikõverast osutub difraktsioonivõre dispersioonikõver sirgeks.

b) Mõõtmise teostamiseks süütame gaasipõleti, milles Na-leegi saamiseks on keedusoolalahuses immutatud asbestitükike, ja asetame selle spektromeetri pilu ette. Paigutame difraktsioonivõre spektromeetri prisma alusele risti kollimaatorist tulevate kiirtega, nii et võre jooned on paralleelsed piluga. Võre on risti kollimaato-

rist väljuvate kiirtega siis, kui kõrvalekaldunud kiirte kaldenurgad on minimaalsed. Seda võime kontrollida võre pööramisega alusel. Kaldenurkade määramiseks juhime pikksilma niitristi esimesele, näiteks paremale kaldunud pilukujutisele ja loeme pikksilma suuna mõlemalt nooniuselt; pöörame pikksilma esimesele vasakule kaldunud pilukujutisele ja registreerime samuti pikksilma suuna. Saadud lugemite vahe võrdub kahekordse kaldenurgaga $2\alpha_1$. Selle põhjal lainepikkus $\lambda = d \sin \alpha_1$. Edasi mõõdame teiste, kolmandate ja üldse võimalikult paljude joonte vahelised nurgad $2\alpha_n$ ning arvutame iga kaldenurga puhul valguse lainepikkuse:

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha_n}{n},$$

kus n tähendab kõrvalekaldunud pilukujutise järjekorranumbrit 1, 2, 3 jne.

Lainepikkuse arvutamiseks peame teadma veel võrekonstanti d. See on kas võrele märgitud või tuleb mõõta vastava mikroskoobiga.

Teades kasutatava valguse lainepikkust, saame sama katsega määrata ka võrekonstandi

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \alpha_n}.$$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas kasutatakse difraktsiooninähtusi ultramikroskoobis?
2. Missuguseid difraktsiooniga seletatavaid nähtusi esineb looduses?
3. Mispärast pole prismaspektris üksikute värviliste ribade laiused ühesugused, vaid näiteks violetne osa on punasega võrreldes tunduvalt laiem?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 195—200.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XXVI, §§ 5 ja 6.

111. NEWTONI RÕNGASTE UURIMINE

1. Tööülesanne

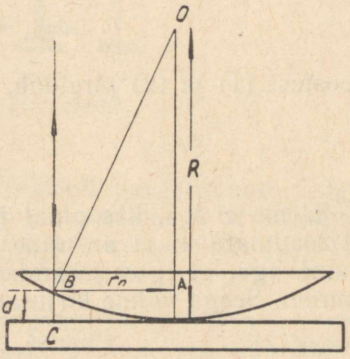
Läätse kõverusraadiuse määramine Newtoni rõngaste abil. Tutvumine valguse interferentsiga õhukestes kelmetes.

2. Töövahendid

Mõõtemikroskoop, tasane klaasplaat, suure kõverusraadiusega kumerlääts ja gaasipõleti keedusoolaga immutatud asbestitükikesega.

3. Töö käik

a) Kui asetame tasasele klaasplaadile suure kõverusraadiusega kumerläätse, siis näeme nii läbivas kui ka peegelduvas valguses läätse ja plaadi kokkupuutekoha ümbruses vaheldumisi tumedaid ja heledaid värvilisi kontsentrilisi rõngaid. Läätse vahetus kokkupuutekohas klaasplaadiga on peegelduvas valguses näha tume ja läbivas valguses hele laik. Läbivas valguses heledana paistvale rõngale vastab peegelduvas valguses tume rõngas ja vastupidi. Monokromaatse valguse puhul (näiteks Na-leegi kasutamisel) on ka rõngad ühevärvilised (tumedad ja heledad). Need rõngad tekivad valguse interferentsi tõttu plaadi ja läätse vahelises õhukeses õhukihis, kui kihi paksus on samas suurusjärgus valguse lainepikkusega. Seetõttu on suurema kõverusraadiusega läätse kasutamisel rõngaste esinemise piirkond laialdasem kui väikese kõverusraadiusega läätse puhul.



Joon. 177. Newtoni rõngaste tekkimine.

Nähtuse selgitamiseks kasutame joonist 177, kus on kujutatud klaasplaadile toetuv lääts. Läätse kõverusraadius on joonisel väike ega vasta katsetingimustele. Ülesande geomeetriline lahendamine on aga sel kujul ülevaatlikum.

Langegu läätsele ülalt monokromaatne kiirtekimp, mille üks kiir tabab läätse kumerpinda punktis B. Osa kiirest peegeldub tagasi, kuna teine osa tungib läbi õhukihi klaasplaadini punktis C ja peegeldub sealt tagasi. Osa kiirest läbib ka alumist klaasplaati, kuid peegelduvas valguses tekkivate Newtoni rõngaste seletamiseks vaatleme punktidest B ja C peegelduvate kiirte interferentsi. Punktist C peegelduv kiir käib $2BC = 2d$ võrra pikema tee ja omandab tihedamalt keskkonnalt peegeldumisel faasinihke $\lambda/2$. Seega on punktidest B ja C peegelduvate kiirte käiguvahe

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}.$$

Valguse kustumine toimub siis, kui $\Delta = \frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2}, \ldots$, ja tugevnemine, kui $\Delta = 0, \lambda, 2\lambda, \ldots$ Seega kustumise korral on $2d = 2n\,\frac{\lambda}{2}$ ehk

$$d = n\frac{\lambda}{2}, \qquad (1)$$

kus n on täisarv.

Kui R on läätse kõverusraadius ja r_n on n-nda rõnga raadius, siis võime kirjutada joonisel 177 kujutatud täisnurkse kolmnurga OAB põhjal:

$$R^2 = (R - d)^2 + r_n^2,$$

$$R^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r_n^2.$$

Et d on väga väike, siis

$$2Rd = r_n^2,$$

millest

$$d = \frac{r_n^2}{2R}. \tag{2}$$

Seostest (1) ja (2) järeldub, et

$$\frac{r_n^2}{R} = n\lambda. \tag{3}$$

Et me ei tea, kas plaat ja lääts on vahetus kokkupuutes, siis on teadmata ka n arvuline suurus iga üksiku rõnga kohta. Me teame aga, et igas järgmises rõngas on n eelmisest ühe võrra suurem. Seega võime kirjutada $(n + k)$-nda rõnga kohta:

$$\frac{r_{n+k}^2}{R} = (n + k)\lambda. \tag{4}$$

Seoseist (3) ja (4) järeldub, et

$$\frac{r_{n+k}^2}{R} = \frac{r_n^2}{R} + k\lambda,$$

millest

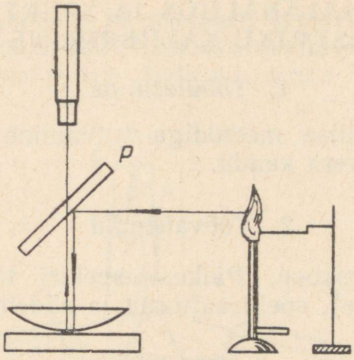
$$R = \frac{r_{n+k}^2 - r_n^2}{k\lambda}, \tag{5}$$

või kui kasutame rõnga läbimõõtu, siis $2r = D$ ja

$$R = \frac{D_{n+k}^2 - D_n^2}{4k\lambda}. \tag{6}$$

b) Rõngaste mõõtmiseks kasutame väikese suurendusega mõõtemikroskoopi. Klaasplaadi koos läätsega asetame mikroskoobi alla nii, et Newtoni rõngaste keskkoht on vaatevälja keskel mikroskoobi niitristi all. Et rõngaste valgus on nõrk, siis valmistab nende leidmine mikroskoobiga raskusi. Leidmise hõlbustamiseks teravustame katse algul mikroskoobi klaasplaadi pealmisele pinnale asetatud paberilehele, s. o. pinnale, kus paberi kõrvaldamise järel tekivad rõngad.

Valguse juhtimiseks rõngaste tekkimiskohale kasutame 45° all kallutatud klaasplaati P, mis peegeldab Na-leegist tuleva valguse



Joon. 178. Katseseadme skeem.

läätsele, kuid samal ajal laseb ka läätselt peegeldunud valguse mikroskoopi (joon. 178). Läätse kõverusraadiuse R arvutamiseks mõõdame 10 rõnga läbimõõdud, kanname need tabelisse ja võtame $k = 5$. Na-leegi lainepikkus $\lambda = 5893 \cdot 10^{-8}$ cm.

Rõngas	Läbimõõt D	D^2	Rõngas	Läbimõõt D	D^2	Läbimõõtude ruutude vahe
1	.....	.....	6	.....	.....	.....
2	.....	.....	7	.....	.....	.....
3	.....	.....	8	.....	.....	.....
4	.....	.....	9	.....	.....	.....
5	.....	.....	10	.....	.....	.....
					Keskmine	

Olles määranud läätse kõverusraadiuse, saame sama seadeldist rakendada ka tundmatu spektrijoone lainepikkuse määramiseks. Selleks tekitame uuritava spektrijoone valgusega Newtoni rõngad, teostame mõõtmised ja arvutame lainepikkuse valemi (5) või (6) abil.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas oleneb rõngaste läbimõõt valguse lainepikkusest?
2. Kuidas muutub rõngaste läbimõõt, kui klaaside vahele asetada vedelik? Mille poolest erinevad rõngad, kui vedeliku murdumisnäitaja on suurem või väiksem klaasi murdumisnäitajast?
3. Miks on vajalik kiirte langemine risti alumisele plaadile?

112. SPEKTRAALANALÜÜS JA SPEKTROSKOOBI ASTMIKU KALIIBRIMINE

1. Tööülesanne

Spektraalanalüütilise meetodiga tutvumine ja selle rakendamine dispersioonikõvera kaudu.

2. Töövahendid

Otsevaate-spektroskoop, Päikese spektri tabel, lainepikkuste tabel (raamatu lõpus), spektraaltorud ja sädeinduktor.

3. Töö käik

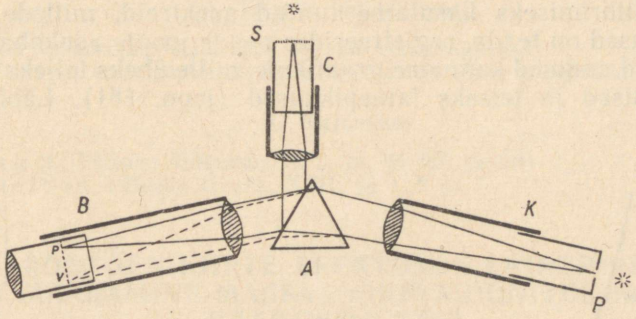
a) Valguskiire kõrvalekaldumine prismas oleneb kiire värvusest. Kollased kiired näiteks kalduvad rohkem kõrvale kui punased, sinised rohkem kui rohelised jne. Seetõttu lahutab prisma liitvalguse üksikuteks värvusteks, sest erisuguse murdumise tõttu läheb iga värvus prismas eri teed. Me ütleme sel puhul, et prisma hajutab ehk dispergeerib kiiri. Nähtust ennast aga nimetame värvuste hajumiseks ehk dispersiooniks ning liitvalguse hajumisel tekkivat värvilist riba spektriks.

Hõõguvad tahked ja vedelad kehad annavad nn. pideva spektri, mis sisaldab kõiki silmaga nähtavaid kiiri. Hõõguvad gaasid ja aurud, kui nad pole suure rõhu all, saadavad välja ainult teatava värvusega (teatava lainepikkusega) kiiri, mis moodustavad joon- või ribaspektri. Joonspektri värvilised jooned pole midagi muud kui spektroskoobi pilu kujutised vastavates spektrivärvustes. Nii näiteks on hõõguva naatriumiauru spektris hele kollane joon (D), mis suure lahutusvõimega spektroskoobis jaguneb kaheks jooneks (D_1 ja D_2). Liitiumiauru spektris on üks punane ning üks nõrk oranž joon jne. Mõnede ainete spektrites, näiteks rauaauru spektris, on väga palju jooni.

b) Igal gaasil ja aurul on erisugune, ainult temale omane spekter, mis võimaldab spektri põhjal määrata gaasi või auru keemilist koostist. Sellel asjaolul põhinebki spektraalanalüüs. Hõõguvad tahked ja vedelad kehad annavad pideva spektri, mis ei võimalda teha järeldusi keha keemilise koostise kohta.

c) Katse näitab, et hõõguvad gaasid ja aurud neelavad neid läbivast kiirgusest samu spektrivärvusi, mida nad ise kiirgavad (Kirchhoffi seadus). Sellest on tingitud tumedate nn. Fraunhoferi neeldumisjoonte esinemine Päikese spektris. Tähtsamaid Fraunhoferi jooni märgitakse tähtedega A, B, C, D jne. Et Fraunhoferi joonte suhteline asend spektris ei muutu, siis kasutatakse neid sageli spektrivärvuste asukoha määramiseks.

d) Spektrite uurimiseks kasutatakse spektroskoope. Vastavalt sellele, kas spektroskoobi kiiri hajutava osa moodustab prisma või difraktsioonivõre, nimetatakse riista prisma- või võrespektroskoobiks.

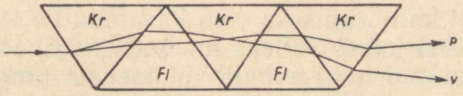


Joon. 179. Prismaspektroskoop.

Spektroskoobi peamisteks osadeks (joon. 179) on pilutoru ehk kollimaator *K*, mille läätse fookuses asetseb reguleeritava laiusega pilu *P*; prisma *A* või selle asemel difraktsioonivõre; pikksilm *B*, mis koondab kollimaatorist väljunud kiirtekimbu pärast murdumist spektrina objektiivi fookusse; skaalatoru *C*, mis koosneb läätsest ja selle fokaaltasandis asetsevast peente jaotistega skaalast *S*. Skaalatoru ülesandeks on valgustatud skaala kujutise juhtimine prisma tahule, kust see peegeldub pikksilma ja annab kujutise samas kohas, kus spektergi, võimaldades seega fikseerida spektrijoonte asukohti skaalal.

Mõnedel spektroskoopidel skaalatoru puudub. Selle asemel on pikksilma suund muudetav skaalaga varustatud mikromeetrilise kruvi abil ja pikksilma vaatevälja keskel on märk. Spektrijoone asukoha määramiseks juhime pikksilma kruvi abil nii, et märk ühtiks joonega, ja registreerime skaala lugemi. Nii saame leida igale joonele vastava skaala lugemi ja seega määrata joonte asukohad.

Meil kasutatav spektroskoop on nn. otsevaate-prisma-spektroskoop, mille prisma koosneb mitmest erineva murdumisnäitajaga klaasprismast. Kombineerides näiteks 3 kroon- ja

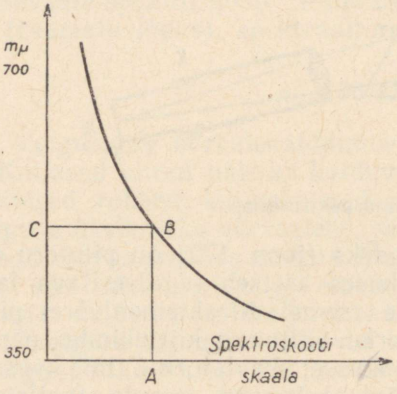


Joon. 180. Otsevaateprisma.

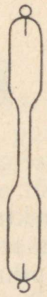
2 flintklaasist prismat (joon. 180), on võimalik tekitada spektrit, ilma et seejuures kiirte keskmine suund muutuks.

Sellest omadusest ongi tingitud nimetus otsevaate-spektroskoop.

Spektrite analüüsimiseks peame teadma spektrijoonte lainepikkusi, mida aga skaalalt otseselt ei saa lugeda. Spektrijoonte lainepikkuste määramiseks on tarvis teada igale skaalajaotisele vastavat lainepikkust. Selleks peame spektroskoobi astmiku kaliibrima. Kaliibrimiseks kasutame tuntud spektreid, millede joonte lainepikkused on teada, registreerides nende joonte asukohad skaalal. Saadud andmed kanname graafikule, mille üheks teljeks võtame skaalajaotised ja teiseks lainepikkused (joon. 181). Läbi nende



Joon. 181. Dispersioonikõver.


Joon. 182. Spektraaltoru.

punktide tõmmatud sujuva kõvera, nn. dispersioonikõvera abil on võimalik leida tundmatute ainete spektrijoonte lainepikkusi nende joonte asukohtade järgi skaalal.

Dispersioonikõvera määramiseks kasutame hõrendatud gaasidega (He, H_2, Ne, millede joonte lainepikkused on teada) täidetud nn. spektraaltorusid (joon. 182). Torud paneme hõõguma väikese sädeinduktori abil. Valgusallikana kasutame toru keskmist peent osa, mille asetame pilu ette (sellega paralleelselt). Reguleerime pikksilma okulaari nihutamisega spektrijooned teravaks. Kui spektrijooned pole vertikaalsed, siis pöörame pilu. Ühtlasi reguleerime pilu võimalikult kitsaks. Edasi süütame skaala valgustuslambi ja nihutame skaalat, kuni see paistab selgesti ja on spektriga rööbik.

Spektroskoobi kaliibrimiseks võib kasutada ka Päikese spektris olevaid Fraunhoferi jooni. Selleks tuleb spektroskoobi pilu juhtida Päikesest valgustatud majaseinale või taevale ning võrdluse teel tabeliga jõuda selgusele joonte nimetustes ja lainepikkustes. Kontrolliks kasutada gaasipõleti Na-leeki, mis annab heleda kollase joone seal, kus Päikese spektris on neeldumisjoon *D*.

Dispersioonikõvera põhjal saame määrata tundmatu aine spektrijoonte lainepikkused nende asukohtade järgi skaalal. Näiteks joonisel 181 vastab skaalajaotisele *A* lainepikkus *C*.

Lainepikkused on harilikult antud millimikronites (mμ), kusjuures 1 mμ = 0,001 μ = 10^{-6} mm = 10^{-7} cm, või ongströmites (Å): 1Å = 0,1 mμ = 10^{-8} cm.

4. Täiendavaid küsimusi

1. Kuidas arvutada naatriumi *D*-joone võnkesagedust?
2. Kui suur on infrapunaste ja ultravioletsete kiirte lainepikkus?

5. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 209 ja 210.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XXII, §§ 1, 2 ja 7.

113. RÖNTGENIKIIRTE EFEKTIIVSE LAINEPIKKUSE MÄÄRAMINE MASSABSORPTSIOONITEGURI MÄÄRAMISE TEEL

1. Tööülesanne

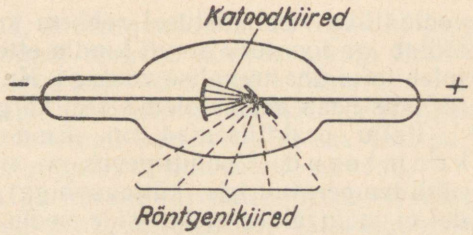
Induktoriga toidetava ioontoru röntgenikiirte efektiivse lainepikkuse määramine.

2. Töövahendid

Röntgenitoru puidust statiivil, induktor, akumulaator, musta paberisse mähitud fotoplaat, astmeline absorptsiooniplaat, elektriline fotomeeter tuhmuse mõõtmiseks.

3. Riistade kirjeldus ja töö põhimõte

a) Röntgenikiired ja nende tekitamine. Röntgenikiired läbivad kõiki kehi, seejuures osaliselt nõrgenedes (suurema aatomkaaluga ained, samuti paksemad ainekihid, absorbeerivad röntgenikiiri tugevamalt). Seetõttu kasutatakse röntgenikiiri mitmesuguste esemete läbivalgustamiseks. Asetades uuritava keha kiirte teele, vaadeldakse fluorestseerival ekraanil keha varju. Et röntgenikiired mõjuvad ka fotoplaadile, siis saab seda varjupilti fotografeerida.

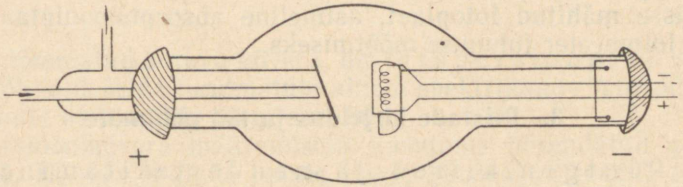


Joon. 183. Ioon-röntgenitoru.

Et röntgenikiirte nõrgenemine ainest läbiminekul oleneb väga suurel määral nende lainepikkusest, siis tuleb kas või ligikaudseltki osata määrata lainepikkust, mida annab röntgeniseade.

Röntgenikiired on *elektromagnetilised lained*, millede lainepikkus on 10 — 0,1 Å. Röntgenikiirguse kvandi energia $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ on seega $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$ eV (selles valemis $h = 6{,}624 \cdot 10^{-27}$ erg · s — Plancki konstant, ν — sagedus, λ — lainepikkus ja c — valguse kiirus). See on väga suur energia. Seepärast ei jätku röntgenikiirte tekitamiseks soojuslikust ergutusest (isegi 1000—5000° C), vaid elektrone tuleb kiirendada 5—500-kilovoldise pingega. Kui niisuguse energiaga elektronid põrkavad kokku aatomitega, siis nende energia arvel võivadki tekkida nii suured kvandid.

Praktiliselt tekitatakse röntgenikiiri vastavalt ehitatud vaakuumtorudes. Kasutusel on kaht liiki röntgenitorud. *Ioontorudes* on vaakuumi suurusjärguks 10^{-2} torri, nii et mõnekümne tuhande voldine pinge tekitab sellises torus katoodkiiri. Katood kujundatakse nõguspeeglina, mistõttu elektronkiir koondub antikatoodi ühte punkti, kus tekibki röntgenikiirgus. Ühest punktist tulev kiirgus annab väga teravaid ja selgeid varje. Kui selline toru on kinni joodetud, siis ei saa temas vaakuumi enam muuta. Selle tõttu, et toru takistuse — pinge karakteristik on negatiivne, väheneb pinge tõstmisel toru ahelas toru sisetakistus, voolutugevus suureneb ja antikatood võib sulada isegi siis, kui teda jahutatakse veega. Suureneva voolutugevuse tõttu aga suureneb pingelangus



Joon. 184. Kuumkatood-röntgenitoru.

vooluallika sisetakistusel rohkem kui toru elektroodidel. Seetõttu töötab iga ioontoru ainult kindla ettenähtud pinge juures. Ioontoru tuleb toita ühesuunalise vooluga. Kui toiteallikaks on transformaator, siis peab ahelas olema veel kõrgepingevoolu alaldaja.

Palju praktilisemad on *kuumkatoodiga kõrgvaakuumtorud*. Voolutugevus on siin reguleeritav katoodi hõõgniidi temperatuuriga (küttevooluga), sest pinge muutus elektroodidel ei mõju üldse elektronide voolu suurusele. Toru võib toita ka vahelduvvooluga otse kõrgepinge transformaatorist, kuid tavaliselt on toru kaitseks ahelas veel kõrgepingevoolu alaldaja — tugevasti üleköetud niidiga ja väikese elektroodide vahekaugusega kõrgvaakuumtoru, millel otsese voolu pingelangus on ainult mõnikümmend volti. Kui tahame saavutada minimaalset lainepikkust λ_{min}, siis peame elektronidele (mille laengu tähistame tähega e)

varuma energia

$$h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = eU, \qquad (1)$$

mis annab pinge U jaoks väärtuse

$$U = \frac{12\,340}{\lambda_{min}} \text{ volti,}$$

kus λ_{min} on väljendatud ongströmites (10^{-8} cm). Kui tahame aga saada niisama suurt efektiivset lainepikkust, siis peab pinge olema ligi kolm korda suurem:

$$U = \frac{35\,000}{\lambda_{ef}}.$$

Röntgenitorust tuleva kiirguse spekter on pidev, kusjuures pideva spektri foonil esinevad üksikud intensiivsed jooned. Pidev spekter tekib katoodkiirte elektronide järsul pidurdumisel, kui need põrkavad kokku aatomitega. Kiirguse kvant tekib elektroni kineetilise energia kahanemise arvel. Et kineetilise energia kahanemise suurus põrkel on juhuslik, siis on juhuslikud ka kvantide suurused, mistõttu esinevad kõik sagedused.

Joonspektri annavad ergastatud aatomid. Et antikatoodile langevate elektronide energiad on suured, siis võivad nad ergastada ka aatomi kõige sügavamat energianivood, s. t. nad võivad elektrone välja lüüa aatomi kõige tuumalähedasematest elektronkihtidest (K ja L). Kui mõni elektron läheb aatomi kõrgemast elektronkihist üle vabanenud madalamasse elektronkihti, siis kiirgab ta kihtidele vastava energiavahe kvandina välja. See kvant omab seega kindlat suurust, mis on antud aatomile iseloomulik. Sagedasemad üleminekud toimuvad naabernivoode vahel ($L \to K$); harvemini esineb üleminekuid $M \to K$. Esimesed annavad tugevaid jooni K_{α_1}, K_{α_2}, teised nõrgemaid, lühema lainepikkusega jooni K_{β_1}, K_{β_2} jt.

Lõpuks olgu veel mainitud, et röntgenikiirtel on tugev bioloogiline toime. Röntgenikiirte toimel surevad kudede rakud. Eriti on röntgenikiirte suhtes tundlikud noored rakud. Viimast asjaolu kasutatakse vähktõve ravimisel. Vähikasvajat kiiritatakse röntgenikiirtega sellises annuses, et vanemad keharakud ei saa veel palju viga, kasvaja rakud aga, mis on märksa nooremad, surevad.

Organismi lühemaajaline, ühekordne ja väikese intensiivsusega kiiritamine, nagu see esineb röntgenoloogilisel läbivalgustusel, röntgenülesvõtte tegemisel ja samuti fotoplaadi ühekordsel eksponeerimisel praktikumis kasutatava aparatuuriga ei tee organismile vähimatki viga. Organismi pikaajaline või intensiivne kiiritamine aga, nagu see esineb tööstuslike läbivalgustusaparaatidega või röntgenoteraapia aparaatidega töötamisel, on ohtlik. Ohtlik on ka väga nõrk intensiivsus, kui ta mõjub päevast päeva, sest

röntgenikiirte mõju organismile akumuleerub, s. o. koguneb. Seetõttu peavad röntgeniaparaatidega töötajad olema hästi kaitstud röntgenikiirte mõju eest. Kaitseks võib kasutada mistahes ainest absorbeerivaid kihte. Otstarbekohaseim on tina, mis absorbeerib röntgenikiiri juba õhukese kihina. Küllaldast kaitset pakuvad järgmised minimaalse paksusega tinakihid:

Toru pinge, kV	λ_{ef}	Tina-kaitsekihi minimaalne paksus, mm	Toru pinge, kV	λ_{ef}	Tina-kaitsekihi minimaalne paksus, mm
50	0,7	1,0	160	0,22	5,0
70	0,5	1,5	210	0,17	9,0
90	0,39	2,0	280	0,125	15,0
125	0,28	3,0	350	0,100	22,0
140	0,25	4,0	700	0,050	90,0

Tänapäeval ehitatavates röntgeniaparaatides on tavaliselt välditud kiirguse laialdane levimine ja töötajal tuleb end kaitsta torust kindlas suunas väljuvate kiirte eest. Olgu mainitud, et esemed, milledele langeb primaarne röntgenikiirgus, saadavad kõikides suundades välja sekundaarkiirgust, mille intensiivsus on küllaltki suur, ja selle eest tuleb end niisama hoolikalt kaitsta kui otsese kiirguse eestki.

Röntgenikiirte hulga (doosi) ühikuks on röntgen ehk r-ühik. See on kiirtehulk, mis 1 cm^3 õhus normaaltingimustel (s. o. 1,293 mg õhus) tekitab ühe absoluutse laenguühiku ühenimelisi ioone. Doosi mõõdetakse ionisatsioonikambriga ja elektromeetriga või vastava tundliku galvanomeetriga. Pikemaajalise töötamise puhul loetakse ohutuks doos alla 0,025 r päevas.

b) Absorptsioonitegur. Kui kihile paksusega d langeb kiirgus intensiivsusega I_0, siis pärast kihi läbimist on intensiivsus

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \qquad (2)$$

kus e on naturaallogaritmide alus ja μ absorptsioonitegur, mille ühik on cm^{-1}.

Nagu näeme, kahaneb intensiivsus eksponentsiaalselt kihi paksusega. Valem kehtib ainult kindla lainepikkusega kiirguse kohta, sest absorptsioonitegur μ oleneb väga suurel määral kiirguse lainepikkusest. Teiselt poolt oleneb μ ka ainest: mida suurem on aine aatomkaal, seda suurem on absorptsioonitegur μ. Ühe ja sama aine puhul oleneb μ veel sellest, kas aine on poorne või tihe. Poorses aines on μ nii mitu korda väiksem, kui mitu korda aine tihedus on poorsuse tõttu vähenenud. Seega on absorptsiooni iseloomustavaks suuruseks absorptsiooniteguri jagatis aine tihedusega: $\frac{\mu}{\varrho} = \gamma$,

nn. massabsorptsioonitegur. Massabsorptsioonitegurid antakse tabelites lainepikkuse funktsioonina. Kui mõõdame mõne aine massabsorptsioonitegur, siis saame nendest tabelitest leida lainepikkuse.

Massabsorptsioonitegur määramiseks mõõdame röntgenikiirte intensiivsused, kui kiired on läbinud kihte paksustega d_1, d_2, d_3. Kirjutame võrrandi (2) kõigi kolme mõõtmise jaoks:

$$I_1 = I_0\ e^{-\mu d_1}, \tag{2a}$$

$$I_2 = I_0\ e^{-\mu d_2}, \tag{2b}$$

$$I_3 = I_0\ e^{-\mu d_3}. \tag{2c}$$

Jagame esimese võrrandi teisega ja teise kolmandaga:

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-\mu(d_1-d_2)}, \tag{2d}$$

$$\frac{I_2}{I_3} = e^{-\mu(d_2-d_3)}. \tag{2e}$$

Nendes võrrandites on ainukeseks tundmatuks μ. Logaritmime ja lahendame võrrandid (2a) — (2e) μ suhtes:

$$\mu = \frac{\log \frac{I_0}{I_1}}{0{,}4343\ d_1}, \tag{3a}$$

$$\mu = \frac{\log \frac{I_0}{I_2}}{0{,}4343\ d_2}, \tag{3b}$$

$$\mu = \frac{\log \frac{I_0}{I_3}}{0{,}4343\ d_3}, \tag{3c}$$

$$\mu = \frac{\log \frac{I_1}{I_2}}{0{,}4343\ (d_2-d_1)}, \tag{3d}$$

$$\mu = \frac{\log \frac{I_2}{I_3}}{0{,}4343\ (d_3-d_2)}, \tag{3e}$$

kus on asendatud $\log e = 0{,}4343$.

c) Intensiivsuste suhte määramine. Intensiivsuste suhe määratakse fotoplaadi abil. Fotoplaat säritatakse röntgenikiirtes, mis on läbinud vastava paksusega ainekihi, ilmutatakse ja määratakse särituse tagajärjel tekkinud tuhmus:

$$S = \log \frac{i_0}{i}, \tag{4}$$

kus i_0 on eksponeerimata plaadiosa (tuhmusevaba osa) läbinud valguse intensiivsus ja i tuhmunud plaadiosa läbinud valguse intensiivsus. Tuhmus S on seotud teda esile kutsunud röntgenikiirte intensiivsusega I järgmiselt:

$$S = f\,(It^p), \tag{5}$$

kus t on säritusaeg ja p konstant (röntgenikiirte korral lähedane ühele).

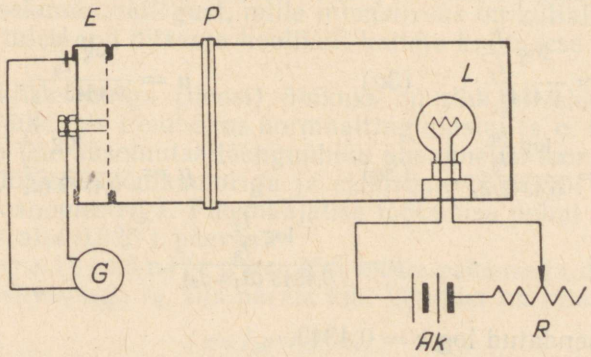
Kui mõõdame plaadi tuhmuse S, mis on saadud mitmesugustel I väärtustel, kuid võrdsetel säritusaegadel ja ilmutamistingimustel, ning koostame graafiku, mille ühele teljele kanname $\log I$, teisele aga S, siis saame nn. fotoplaadi gradatsioonikõvera (vt. joon. 187). Kogemus näitab, et tuhmuste piirkonnas $S = 0{,}6$ kuni $S = 1{,}3$ võime võrrandis (5) toodud funktsiooni lähendada logaritmiga, s.t. võime kirjutada:

$$S = \log It^p + C. \tag{5a}$$

See on nn. normaalse säritusega osa. Kui S on alla 0,6, võime võrrandis (5) toodud funktsiooni lähendada võrdelise olenevusega:

$$S = \beta It^p. \tag{5b}$$

d) Elektriline fotomeeter. Elektrilise fotomeetri põhimõte seisneb selles, et konstantse intensiivsusega valgus (tavaliselt suure akumulaatoriga toidetavast hõõglambist L) lastakse läbi fotoplaadi P mõõdetava koha, kust ta langeb fotoelemendile E (joon. 185). Fotoelemendiks on tavaliselt tõkkekiht-element, milles



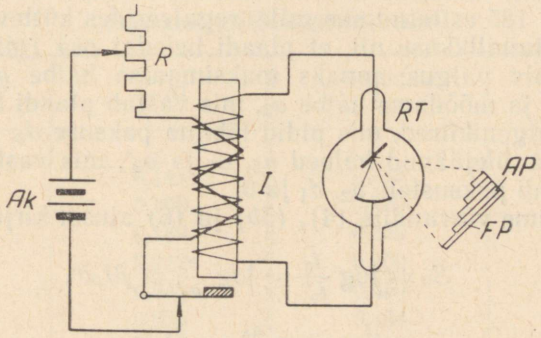
Joon. 185. Elektrilise fotomeetri lülitusskeem.

tekib elektromotoorne jõud. Fotoelemendile langeva valguse hulk ei ole aga võrdeline tekkiva elektromotoorse jõuga, vaid voolutugevusega. Seepärast tuleb fotovoolu mõõtmiseks kasutada galvanomeetrit, mille sisetakistus on fotoelemendi sisetakistusega võrreldes väike.

Et voolutugevus on võrdeline galvanomeetri hälbega α, siis on ka plaati läbiva valguse intensiivsus i võrdeline galvanomeetri hälbega α:

$$\frac{i_0}{i} = \frac{\alpha_0}{\alpha}. \tag{6}$$

Laboratooriumis kasutame klaasist kinnijoodetud ioon-röntgenitoru. Toru toidame kõrgepingeinduktorist. Kuigi kõrgepingeinduktor annab vahelduvvoolu, on tema pinge ebasümmeetriline. Lülitamisel kasvab primaarvool mähise suure induktiivsuse tõttu võrdlemisi aeglaselt. Seega magnetivoo muutumise kiirus on väike ja väike on ka sekundaarpinge. Katkestamisel aga primaarvool kahaneb väga kiiresti, magnetivoo muutumise kiirus on suur ja suur on ka sekundaarpinge, mis tekitabki voolu läbi röntgenitoru, kuna



Joon. 186. Röntgenitoru lülitusskeem.

lülitamispinge nimetamisväärset voolu läbi röntgenitoru ei tekita. Seega võime öelda, et induktor annab ühesuunalist kõrgepingevoolu.

Töö teostamiseks koostame joonise 186 põhjal skeemi induktorist *I*, akumulaatorist *Ak* (6—10 V), reostaadist *R* (4—5 Ω) ja röntgenitorust *RT*. Viimase kinnitame puidust statiivile ja ühendame spiraalvedruks keeratud traatide abil induktori kõrgepingepoolustega. Seejuures peame jälgima, et kõrgepinge juhtmed läheksid teineteisest ja teistest metallesemetest kaugelt mööda, sest vastasel korral võib säde üle hüpata.

Paneme induktori tööle ja vaatame, kuidas röntgenitoru helendab. Kui helendab ühtlaselt kogu klaassein antikatoodi vastassiis on kõrgepingevoolu suund õige: nõguspeegel on katoodiks ja antikatood anoodiks. Katoodkiired langevad antikatoodile, mille tagajärjel tekivad röntgenikiired, mis tekitavad toru seintel ühtlase fluorestsentsi. Kui voolu suund on vastupidine, siis on toru seinte helendus ebaühtlane, esinevad rõngad ja triibud — induktori kommutaatorlüliti tuleb ümber asetada. Peame meeles kommutaatori õige seisu! Nüüd mõõdame absorbeeriva alumiiniumplaadi *AP* kihtide paksused d_1, d_2, d_3. Äärmine (neljas) aste on kaetud seatinaga, millest kiired ei pääse peaaegu üldse läbi. Võtame fotoplaadi *FP*, mis on mähitud musta paberisse,

ja asetame tema emulsiooniga kaetud poole vastu alumiiniumplaati. Surume mõlemad plaadid statiivi näpitsaga kinni (tinaga kaetud osa kohalt) ning kinnitame nad statiivile röntgenitoru antikatoodi ette nii, et röntgenikiired läbivad enne alumiiniumplaadi ja alles siis langevad fotoplaadile.

Säritusaeg on 1—2 min. Kui plaat on säritatud, siis tuleb ta ilmutada, kinnitada, pesta ja kuivatada (fotoplaadi ilmutamise kohta vt. § 114).

Kuivatatud fotoplaadi pind tuleb hoolikalt igasugustest plekkidest puhtaks hõõruda. Nüüd võime plaati fotomeetrida. Selleks asetame plaadi fotomeetrisse. Fotomeetri lülituse koostame vastavalt joonisel 185 esitatud skeemile, reguleerides küttevoolu ja galvanomeetri tundlikkuse nii, et plaadi heledat osa (mis oli tinaga kaetud) läbiv valgus annaks maksimaalse hälbe α_0. Lükkame plaadi edasi ja mõõdame hälbe α_3, mis vastab plaadi kohale, kuhu langesid röntgenikiired, mis pidid läbima paksuse d_3. Samal viisil mõõdame ka ülejäänud hälbed α_2, α_1 ja α_0', mis vastavad absorbeeriva plaadi paksustele d_2, d_1 ja 0.

Nüüd võime võrrandite (4), (5*b*) ja (6) alusel kirjutada:

$$S_0 = \log \frac{i_0}{i_0'} = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_0'} = \beta I_0 t^p,$$

$$S_1 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \beta I_1 t^p,$$

$$S_2 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_2} = \beta I_2 t^p,$$

$$S_3 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_3} = \beta I_3 t^p.$$

Jagades võrrandid paarikaupa üksteisega, saame:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{S_0}{S_1}; \quad \frac{I_0}{I_2} = \frac{S_0}{S_2}; \quad \frac{I_0}{I_3} = \frac{S_0}{S_3};$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{S_2}{S_3}.$$

Asetades need väärtused võrranditesse (3*a*) — (3*e*), saame μ jaoks viis võrrandit:

$$\mu_1 = \frac{\log \frac{S_0}{S_1}}{0{,}4343\, d_1}; \qquad \mu_2 = \frac{\log \frac{S_0}{S_2}}{0{,}4343\, d_2};$$

$$\mu_3 = \frac{\log \frac{S_0}{S_3}}{0{,}4343\, d_3}; \qquad \mu_4 = \frac{\log \frac{S_1}{S_2}}{0{,}4343\, (d_2 - d_1)};$$

$$\mu_5 = \frac{\log \frac{S_2}{S_3}}{0{,}4343\, (d_3 - d_2)}.$$

Jagades need absorptsioonitegurite väärtused tihedusega ($\varrho_{Al} = 2{,}7$), saame viis massabsorptsioonitegurit, mis on üksteisest veidi erinevad. Massabsorptsioonitegurite tabelist leiame vastavad lainepikkused. Seejuures paneme tähele, et μ_1, μ_4 ja μ_5 annavad järjest lüheneva lainepikkuse. See on tingitud sellest, et μ_1 puhul määrame otseselt kihile d_1 langeva kiirguse efektiivse lainepikkuse, μ_4 puhul aga määrame λ_{ef} kiirgusele, mis on enne kihile $d_2 - d_1$ langemist läbinud kihi d_1, kus on absorbeerunud rohkem pikalainelist kiirgust kui lühilainelist. Samasugune on olukord μ_5 puhul, kus kiirgus läbib enne kihi d_2.

Massabsorptsioonitegurite tabel

Lainepikkus, Å	$\frac{\mu}{\varrho}$ Al	Lainepikkus, Å	$\frac{\mu}{\varrho}$ Al
0,081	0,145	0,280	0,475
0,102	0,169	0,320	0,630
0,138	0,189	0,360	0,850
0,160	0,212	0,400	1,11
0,173	0,235	0,450	1,45
0,194	0,265	0,484	1,75
0,220	0,310	0,560	2,65

Tabelist lainepikkuste leidmisel kasutame lineaarset interpolatsiooni.

Mõõtmisandmed ja arvutused protokollime järgmise skeemi kohaselt:

I. Plaadi paksuse mõõtmine

Mikromeetri lugem juhul, kui otsad on tühjalt vastamisi ... mm
Mikromeetri nullpunkti parandus + (või —) ... mm

a) Kõige õhem kiht: 1) $d_1 =$ ..... mm
2) $d_1 =$ ..... mm
3) $d_1 =$ ..... mm

Keskmine $d_1 =$ ..... mm
+ (või —) nullpunkti parandus ..... mm

Lõplik $d_1 =$ ..... mm = ... cm

Teiste kihtide kohta mõõtmisandmed analoogiliselt välja kirjutada.

II. Plaadi tuhmustele vastavate fotoelemendi hälvete määramine

1) Nulltäpi lugem .....
2) Nulltäpi parandus ..... = + (või —) .....

Al-kihi paksus / Fotoelemendi hälve	$d = 0$ (plaat kõige tumedam)	$\ldots$ cm $= d_1$	$\ldots$ cm $= d_2$	$\ldots$ cm $= d_3$	Pb-plaat (plaat kõige heledam)
	α_0'	α_1	α_2	α_3	α_0
I mõõtmine	.....	.....	.....	.....	.....
II mõõtmine	.....	.....	.....	.....	.....
III mõõtmine	.....	.....	.....	.....	.....
Keskmine:	.....	.....	.....	.....	.....

III. Plaadi tuhmuse arvutamine

1) $\frac{\alpha_0}{\alpha_0'} = \ldots\ldots$; tuhmus $S_0 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_0'} = \ldots\ldots$

2) $\frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \ldots\ldots$; „ $S_1 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \ldots\ldots$

3) $\frac{\alpha_0}{\alpha_2} = \ldots\ldots$; „ $S_2 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_2} = \ldots\ldots$

4) $\frac{\alpha_0}{\alpha_3} = \ldots\ldots$; „ $S_3 = \log \frac{\alpha_0}{\alpha_3} = \ldots\ldots$

4. Täiendavaid küsimusi

1. Mis on massabsorptsioonitegur?
2. Mis on gradatsioonikõver?
3. Missugune on röntgenikiirguse tekkimise mehhanism?
4. Milleks kasutatakse röntgenikiiri?
5. Missugustel tingimustel saame röntgeniülesvõttel suure kontrasti?
6. Miks avaldub tuhmus läbinud valguse intensiivsuse logaritmide kaudu?

6. Kirjandust

Lang jt., Füüsika üldkursus II, 2. tr., §§ 236, 239 ja 242.
Mihelson, Füüsika II, ptk. XVII, § 5 ja ptk. XXX, § 6.
С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс физики III, §§ 324 и 325.

114. FOTOGRAFEERIMINE

a) Fotografeerimise põhimõte. Fotoaparaadis tekitatakse läätse abil valgustundlikul kihil (fotoplaadil) fotografeeritava eseme kujutis. Valgustamine kestab tavaliselt esinevate valgustingimuste puhul tuhandikest sekunditest kuni sekunditeni ja isegi minutiteni. Valgustatud plaadil ei ole veel pilti näha, vaid see esineb seal varjatud kujul (latentne pilt). Valguse mõjul alanud reaktsiooni viiakse edasi juba vastavate keemiliste ainetega — pilt ilmutatakse. Pärast ilmutamist tuleb pilt kinnitada, et reaktsioon ei kulgeks edasi ja et ka valgus ei mõjuks enam. Sel teel

saadakse tavaliselt «negatiiv», s. o. selline pilt, millel kujutatava objekti heledad kohad on tumedad ja tumedad kohad heledad. Negatiivist tekitatakse uuesti kujutis valgustundlikule kihile, kas asetades negatiivplaadi otseselt valgustundlikule kihile ja valgustades, või projekteerides negatiivpildi valgustundlikule kihile suurendatult või vähendatult. Järgnev ilmutamine ja kinnitamine annab juba «positiivi» — pildi, millel heledate ja tumedate kohtade jaotus on õige.

b) Fotoaparaat on väike valguskindel kamber, mille juurde kuulub fotoplaadi hoidja, lääts (objektiiv), vahend läätse kauguse muutmiseks fotoplaadist (fookustamise seadis), läätse avamise seadis särituse teostamiseks ja läätse ava suuruse muutmise seadis. Mida suurem on läätse fookuse kaugus, seda suurem kujutis tekib. Kui fotografeeritav ese on kaugel (võrreldes läätse fookuse kaugusega), siis on kujutise lineaardimensioonid fookuse kaugusega võrdelised. Kui läätsede avad on ühesuurused, siis suurema fookusekauguse korral sama valgus jaotub suuremale pinnale, mis on võrdeline fookuse kauguse ruuduga. Seega pindade valgustused erinevate läätsede puhul suhtuvad nagu avade pinnad, mis on jagatud fookuse kauguse ruuduga. Et ava pindala on võrdeline tema läbimõõdu ruuduga, siis valgustused suhtuvad nagu $\left(\frac{d}{F}\right)^2$, kus d on ava läbimõõt ja F läätse fookuse kaugus. Läätse iseloomustatakse tema fookuse kaugusega F, valgusjõuga $\frac{d}{F}$, mida tähistatakse tavaliselt $1:F$, näiteks $1:F=2{,}8$, ja maksimaalse nurga suurusega, mille piirides ta annab tasapinnalise ja küllaldase teravusega pildi. Tavaline hea objektiiv annab terava pildi, mille läbimõõt (diagonaal) on võrdne fookuse kaugusega. On aga olemas ka nn. lainurk-objektiive. Suurima valgusjõuga objektiividel $1:F=1:1$. Läätse ava reguleerija skaala numbrid, mis algavad kõige suurema valgusjõuga, näiteks 2,8; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16, on paigutatud nii, et üleminekul järgmisele numbrile väheneb valgustus kahekordselt. Ava vähendamisel suureneb sügavusteravus, pikeneb aga säritusaeg. Fookustamine, s. o. pildi teravaks seadmine toimub kas mattklaasil nähtava kujutise järgi või kauguste skaala järgi, mis on antud meetrites. Nn. reflekskaamerates on pilt kogu aeg näha vaateaknas, mille järgi saabki fookustada. Rida aparaate on aga varustatud optiliste kaugusmõõtjatega, mis on automaatselt seotud objektiivi fookustamise seadisega.

c) Fotoplaat. Valgustundlikuks kihiks on tavaliselt hõbebromiidi emulsioon želatiinis. Emulsiooni kandjaks on hea klaasplaat või painduv film. Hõbebromiid on tundlik siniste ja ultravioletsete kiirte suhtes. Et teha plaadi tundlikkust värvuste suhtes sarnaseks inimsilma tundlikkusega, immutatakse (sensibiliseeritakse) plaate mitmesuguste värvainetega. See suurendab plaadi tundlikkust punaste ja kollaste kiirte suhtes, ühtlasi aga ka plaadi üldist valgustundlikkust. Kui hõbebromiidi terad on väga peened,

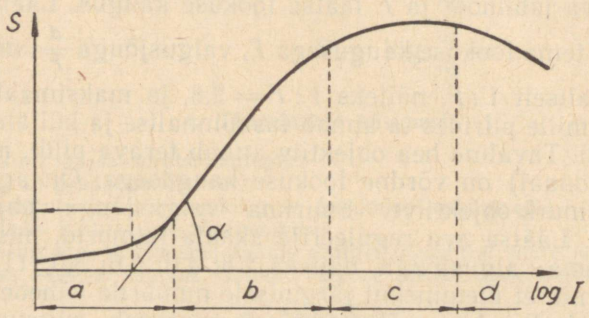
siis on ka negatiivpilt terav ja väga peeneteraline, kuid peeneteraliste plaatide tundlikkus on väike. Tavalise teralisusega plaat kannatab maksimaalselt 5—6-kordset suurendust. Spetsiaalsed peeneteralised plaadid võimaldavad suurendusi üle 10 korra ja rohkem. Et vältida emulsioonikandjalt peegelduva valguse mõju, mis on eriti segav klaasi korral, sest heledamate esemete ümber tekib valgustara (halo), kaetakse klaas enne emulsiooniga katmist vastava absorbeeriva kihiga, mis kaob ilmutamise protsessis. Need on nn. antihalo-plaadid. Praegu müügil olevad plaadid on kõik antihalo-plaadid.

Ilmutatud fotoplaadi tuhmuse S (vt. § 113), fotoplaadile langenud valguse intensiivsuse I ja säritusaja t vahel valitseb Schwarzschildi seos:

$$S = f(It^p). \qquad (1)$$

Nähtava valguse korral $p < 1$. Seega, kui intensiivsus on n korda väiksem, siis sama tuhmuse saamiseks peame säritama $n^{\frac{1}{p}}$ korda kauem, s. o. rohkem kui n korda kauem.

Kui säritame üht plaati ühe ja sama aja kestel, kuid plaadi erinevates kohtades erinevate tuntud intensiivsustega, siis, mõõtes tekkinud tuhmused, saame koostada S — log I graafiku, nn. gradatsioonikõvera, mis on skemaatiliselt esitatud joonisel 187.



Joon. 187. Gradatsioonikõver.

Kõvera sirge osa vastab log I väärtustele piirkonnas b, mis on normaalse särituse piirkonnaks. Piirkond a vastab alavalgustusele, piirkond c ülevalgustusele ja piirkonda d, kus tuhmus saab väärtusel $S \approx 4$ maksimaalseks ja hakkab intensiivsuse edasisel suurenemisel vähenema, nimetame solarisatsioonipiirkonnaks. Tänapäeva plaatidel on piirkond b paksu emulsioonikihi tõttu lai; öeldakse, et «emulsioon on lai». Seetõttu mahuvad tavalisel ülesvõttel esinevad intensiivsused ka valesti määratud säritusaja puhul kõik kõvera sirgesse ossa, s. t. saame ikkagi normaalse gradatsiooniga negatiivi.

Fotoplaadi tundlikkuse mõõtmiseks on olemas mitu skaalat.

Nõukogude Liidus kehtib 1952. aasta skaala (GOST 2817-50). Selles skaalas määratakse valguse hulk E luks-sekundites, mis on vajalik plaadi loorist 0,2 võrra suurema tuhmuse esilekutsumiseks normaalsetes ilmutamistingimustes. Tundlikkuse GOST'i ühikutes saame, kui võtame E pöördväärtuse $\frac{1}{E}$.

Plaadi tundlikkuse määramise eeskirjad GOST'i järgi vastavad kõige rohkem tegelikus fotograafias esinevatele tingimustele (ülesvõtteile päevavalguses). Et seni säilinud riistadel esinevad mitmesugused skaalad, siis esitame skaalade võrdlustabeli:

GOST	H & D	DIN°	GOST	H & D	DIN°
11	250	12/10	65	1400	20/10
16	350	13/10	90	2000	21/10
22	500	15/10	130	3000	23/10
32	700	17/10	180	4000	24/10
45	900	18/10	250	6000	26/10
			350	8000	27/10

Mida tundlikum on emulsioon, seda laiem ta ühtlasi on. Gradatsioonikõvera sirge osa tõusunurga tangens iseloomustab emulsiooni kontrastsust:

$$\gamma = \tan \alpha = \frac{\Delta S}{\Delta \log It}.$$

Kui $\gamma = 1$, siis nimetame materjali normaalseks. Materjal, millel $\gamma > 1$, on kontrastne ja emulsiooni laius on tal väike; vastupidi: materjal, millel $\gamma < 1$, on pehme ja emulsiooni laius on tal suur. Kontrastsus oleneb suurel määral ka ilmutamisest.

Sensibiliseerimata plaadiga saab registreerida lainepikkusi 5500 Å—2400 Å, kuna lühematel lainetel absorbeerib želatiin kiirguse. Kui želatiini hulk viia miinimumini (Schumanni plaadid), siis saab registreerida lainepikkusi kuni 1800 Å. Plaadid on siis tundlikud elektronide ja ioonide suhtes ning neid kasutatakse elektronmikroskoobis ja mass-spektrograafis.

Plaatide immutamine (sensibiliseerimine) vastavate värvainetega teeb nad vastuvõtlikuks infrapunasele kiirgusele kuni 12 000 Å.

Vajaduse korral saab plaatide tundlikkust tõsta, immutades neid ammoniaagi- või booraksilahusega (vt. retseptid 11 ja 12). Elavhõbeda-auru mõjul 36 tunni jooksul toatemperatuuril muutub plaat ülitundlikuks (tundlikkus suureneb 2—5 korda). Ülitundlikuks tehtud plaate aga ei saa kaua hoida — nad lähevad kiiresti halliks. Madalal temperatuuril (jääkapis) säilivad nad veidi kauem.

d) S ä r i t u s. Õige säritusaja valik on hea kvaliteediga pildi saamisel määrava tähtsusega, kuigi tänapäeval toodetavad mater-

jalid tasandavad vigu isegi mitmekordse ala- või ülevalgustuse korral, nagu eespool oli selgitatud. Fotografeerimisel tuleb silmas pidada 1) plaatide tundlikkust, 2) fotoaparaadis kasutatavat valgusjõudu ja 3) fotografeeritavate esemete heledust, s. o. nendest tuleva valguse intensiivsust. Fotoplaadi tundlikkus on antud. Fotoaparaadis kasutatava valgusjõu valime meie ise. Kui tahame saada teravat pilti, siis kasutame võimalikult väikest ava, mis aga pikendab ekspositsiooniaega. Kui esemed püsivad paigal ja aparaat asub kindlal statiivil, siis võime lubada ekspositsioone üle sekundi kuni minutiteni. Kui pildistame aga käest, siis ei tohi säritusaeg olla üle $^1/_{25}$ sekundi. Säritusaeg peab olema lühike ka pildistatava eseme liikumisel, nii et ese nihkuks säritusaja kestel võimalikult vähe. Pildil ei tohi see nihkumine ületada mõnd sajandikku millimeetrit. Sel juhul tuleb töötada maksimaalse avaga.

Valgustuse intensiivsus tuleb aga määrata. Seda teeme kas endiste kogemuste alusel silmaga hinnates või fotoelektrilise mõõtja abil. Esimesel juhul võib meeles pidada järgmised andmed. Elutuba heleda tapeediga, 100 W lamp laes, $1 : F = 1 : 2{,}8$, materjali valgustundlikkus 65—90 GOST'i, säritusaeg 1 s. Kui laes on 500 W lamp, siis on säritusaeg 0,1 s. Suvel keskpäeval, $1 : F = 1 : 11$, säritusaeg 0,01 s. Suvel keskpäeval pilves ilmaga, $1 : F = 1 : 11$, säritusaeg $^1/_{25}$ s. Kogemuste kogumiseks on soovitatav säritustingimused üles kirjutada, et nende abil hiljem korrigeerida uusi võtteid. Mõnikord on koos riistaga antud säritusaja määramise nomogrammid, millede abil leiame plaadi tundlikkusele, kasutatavale avale ja mõõdetud valguse intensiivsusele vastava säritusaja.

Igasugustel teistel fotoplaadi rakendustel on otstarbekohane teha proov: valgustada plaadi üksikuid osi järjest pikema ajaga — kaks korda, neli korda, kaheksa korda jne. kauem kui kõige lühem valitud aeg. Ilmutame plaadi normaaltingimustel, normaalaja kestel, ja valime silmaga selle plaadiosa, kus on tulnud kõige selgem ja parem pilt. Selle osa valgustusaeg ongi õige säritusaeg. Leitud säritusaeg, säritustingimused ja andmed fotomaterjali kohta tuleb üles kirjutada, et edaspidi saaks neid töö kordumisel ära kasutada.

e) Ilmutamine. Ilmutamine seisneb hõbebromiidi taandamises metalliliseks hõbedaks. Seal, kuhu langes rohkem valgust, areneb reaktsioon kiiremini, tekib rohkem metallilist hõbedat ja tuhmus tuleb suurem. Seal, kuhu valgust langes vähem, areneb reaktsioon aeglasemalt ja see koht jääb heledamaks. Nii saame negatiivi.

Taandavate ainetena kasutatakse hüdrokinooni, metooli, glütsiini, pürogallooli, amidooli jne. Protsessi katalüsaatoritena kasutatakse aluselise reaktsiooniga aineid: kaaliumhüdroksüüdi, naatriumhüdroksüüdi, soodat, potast või booraksit. Et ilmutis lahustunud hapnik ei oksüdeeriks taandavaid aineid, lisatakse konservaatorina juurde naatriumsulfitit. Hõbebromiidi spontaanse taan-

dumise vältimiseks (terade taandumise vältimiseks, mida ei ole tabanud valgus) lisatakse ilmutile kaaliumbromiidi, mille tagajärjel negatiivid tulevad selgemad.

Igale plaadisordile sobib vastav ilmuti, nii et fotomaterjaliga koos antakse ka ilmuti retsept, ilmutamise aeg ja temperatuur.

Ilmuti koostis valitakse tavaliselt nii, et ta töötaks normaalselt temperatuuril 18° C. Kui ilmuti temperatuur on kõrgem, kulgeb ilmutamisprotsess kiiremini, negatiiv tuleb pehme, suureteraline, ja on tihti kaetud segava udulooriga. Vastupidi, madalal temperatuuril kulgeb protsess aeglaselt ja tekib kontrastne negatiiv, mis on aga sageli samuti kaetud udulooriga.

Kõige levinum on metoolhüdrokinoon-ilmuti. Tema käsitsemine on mugav. Temaga ei teki nii kergesti ilmutamisvigu ja metooli ning hüdrokinooni vahekorra muutmisega saab muuta ka ilmutatava plaadi kontrastsust. Metool töötab väga kiiresti — kiiremini, kui ta difundeerub emulsioonikihti. Seepärast tekitab suure metoolisisaldusega ilmuti kiiresti suure tuhmuse kihi pealmistes osades. Et plaati mitte liiga tumedaks lasta, tuleb protsess lõpetada, kui sügavamad kihid on veel reageerimata. Õhuke ilmutatud kiht aga ei anna kuigi suurt kontrastsust. Ümberpöördult, hüdrokinoon töötab aeglaselt, jõudes tungida kogu emulsioonikihti, mis siis reageerib kogu paksuses ja kontrast tuleb sel juhul suurem.

Ortokromaatilist ja pankromaatilist materjali on soovitatav ilmutada täielikus pimeduses. Kui on siiski tarvis ilmutamisprotsessi jälgida, tuleb plaat enne desensibiliseerida leotamisega pinakrüptoolrohelise lahuses (1 : 20 000) või fenosafraniini lahuses (1 : 20 000) vähemalt 2 minuti jooksul.

Fototehnilist materjali ja fotopaberit võib ilmutada isegi kollases valguses. Ilmutamise ajal peame hoolitsema, et ilmuti plaadi pinnal kogu aeg liiguks, et plaadile pääseks kogu aeg värsket ilmutit ja et ilmutamine oleks ühtlane. Selleks kiigutame ilmutivanni, et ilmuti voolaks üle plaadi.

f) K i n n i t a m i n e. Kinnitamisprotsessis kõrvaldame plaadi želatiinikihist reageerimata jäänud hõbebromiidi. Selleks hoiame ilmutist puhtaks loputatud plaati 5—10 minutit naatriumhüposulfiti lahuses, millega hõbebromiid moodustab lahustuva komplekssoola. Želatiinikihis olevas ilmutis sisalduva leelise neutraliseerimiseks lisatakse kinnitile paar tilka väävelhapet või kaaliummetabisulfitit, mis otsekohe peatab ilmutamisprotsessi.

Kui plaadil juhtub olema ilmutipiisku, siis võivad need oksüdeerumise tõttu tekitada värvilisi plekke. Selle vältimiseks lisatakse kinnitile naatriumsulfitit.

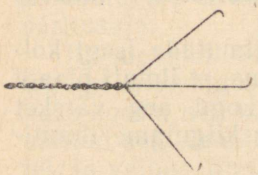
Želatiinikihi kõvendamiseks lisatakse kinnitile ka parkaineid: kaalium- või kroommaarjat.

Kui plaat on kinnitis olnud üle 5 minuti, võib teda vaadata kollases valguses. Kui plaadil ei ole näha valkjaid laike, siis on plaat kinnitatud, kuid teda tuleb pärast seda veel 2—3 minutit kinnitis hoida.

g) Pesemine. Kinnitatud plaadist tuleb välja pesta hõbedasool ja kinniti. Selleks hoitakse plaati ca 10 min külmas, rahulikult voolavas vees. Kui plaati pestakse seisvas vees, siis tuleb teda liigutada ja hoida vees vähemalt 15 min. Pärast seda pestakse plaadi tagakülg hoolega puhtaks, emulsiooni poolt aga tõmmatakse ettevaatlikult märja käega üle, et ära pühkida želatiinitükikesed, tolmuterad jm.

h) Kuivatamine. Kuivatamine peab toimuma emulsioonikihiga allapoole, võimalikult tolmuvabas ruumis. Võib kasutada ka kiirendatud kuivatamist: hoida plaati 10—20 sekundit 80%-lises piirituselahuses. Samuti võib kasutada soojendatud õhu voolu. Siin peab aga olema ettevaatlik, et želatiin ei muutuks soojusest vedelaks. Piiritusega kuivatamisel võib juhtuda, et plaat muutub kohati valkjaks, mis on tingitud želatiini liigsest kuivusest. Neid kohti tuleb hingeõhuga niisutada ja nad muutuvad mõne aja pärast jälle läbipaistvateks.

i) Üldisi näpunäiteid. Fotopimik, kus toimub negatiivmaterjali ümbertöötamine, olgu puhas, tolmuvaba ja paraja temperatuuriga. Pimik olgu varustatud tavalise lambiga ning punase ja kollase filtriga lampidega. Ilmutamisnõud — vannid, pudelid, tangid jne. — peavad olema alati hoolikalt pestud puhta kraaniveega. Sama nõue kehtib ka töölaua ja kõikide teiste esemete suhtes. Et kinniti sattumine ilmutisse rikub viimase, siis on soovitatav, et ilmutinõudesse ei pandaks kunagi kinnitit. Ilmutamisele asudes tuleb käed hoolikalt puhtaks pesta. Kuid ka puhta käega ei tohi puudutada emulsioonikihti. Plaat võetakse kinni äärtest ja kinnitatakse ilmutamiseks vastavasse hoidjasse (joon. 188), millega teda on hea tõsta ühest vannist teise, pesta ja kuivatada.



Joon. 188. Fotoplaadi hoidja.

Filmide ilmutamiseks kasutatakse vastavaid abinõusid: poole, millele keritakse film nii, et üks keerd on teisest vähemalt 2—3 mm võrra eemal, ja poolide jaoks vastavaid nõusid.

Mõningaid retsepte

On välja töötatud tohutu hulk mitmesuguseid fotoretsepte, milledes orienteerumine tekitab algajale teatavaid raskusi. Enamik neid retsepte erineb vaid koostisosade vahekorra poolest. Koostisosade vahekorrast oleneb ilmutite toime: eristatakse normaalselt töötavaid, pehmelt töötavaid, kontrastselt töötavaid ilmuteid, kiiresti töötavaid ilmuteid, peenterailmuteid jne. Amidool-, glütsiin-, parafenüleendiamiinilmuteid jms. kasutatakse harva ja ainult eriotstarbeks, sest nende kasutamine on seotud terve rea ebamugavustega.

Allpool toome mõningaid lihtsamaid retsepte.

1. Normaalselt ja kiiresti töötav ilmuti A-1:

Metool	5,0 g
Naatriumsulfit, veevaba	40,0 g
Hüdrokinoon	6,0 g
Kaaliumkarbonaat (potas)	40,0 g
Kaaliumbromiid	2,0 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Ilmutamise kestus 3—4 minutit temperatuuril 20° C.

2. Normaalselt töötav ilmuti A-12, mis annab peenema tera ja mida kasutatakse peamiselt väikeseformaadiliste (24 × 36 mm) negatiivide ilmutamiseks:

Metool	8,0 g
Naatriumsulfit, veevaba	125,0 g
Sooda, veevaba	6,0 g
Kaaliumbromiid	2,5 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Ilmutamise kestus 9—16 minutit temperatuuril 20° C.

3. Eriti peeneteraliselt töötav ilmuti D-25:

Metool	7,5 g
Naatriumsulfit, veevaba	100,0 g
Kaaliummetabisulfit	18,0 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Ilmutamise kestus 35 minutit temperatuuril 20° C. Normaalseks ilmutamistemperatuuriks loetakse 25° C, mille puhul ilmutamise kestus on 15 minutit. Ilmuti on kasutatav temperatuurini 32° C, kuid siis tuleb enne kinnitamist želatiinikiht parkida (vt. p. 7), kusjuures vedelikku peab energiliselt liigutama nn. «kaltsiumi võrgu» ärahoidmiseks.

4. Eriti peeneteraliselt töötav ilmuti «Atomaal»:

Lahus A	
Vesi	250 ml
Oksüetüülortoamiinofenosulfaat	6,0 g
Lahus B	
Vesi	650 ml
Naatriumheksametafosfaat	1,0 g
Naatriumsulfit, veevaba	100,0 g
Sooda, veevaba	10,0 g
Kaaliumbromiid	5,0 g

Kui ained on täielikult lahustunud, valatakse lahus B lahusesse A, seejuures segu energiliselt liigutades.

Kodumaiste negatiivmaterjalide ilmutamise kestus temperatuuril 18° C on 15—20 minutit. Saksa materjalide ilmutamise kestus: Agfa Isopan FF 10/10 DIN 6—8 minutit, Isochrom F ja Isopan F 17/10 DIN 8—10 minutit, Isopan ISS 21/10 DIN ja Isopan Ultra

23/10 DIN 12—15 minutit temperatuuril 18° C. Temperatuuril 15° C tuleb ilmutamise kestust suurendada 20% võrra, temperatuuril 21° C vähendada 25% ja temperatuuril 25° C 50% võrra. Heade ja normaalsete tulemuste saavutamiseks on soovitatav töötada temperatuuril 18° C.

Selle ja paljude teiste ülipeenterailmutite kasutamisel tuleb negatiivi säritusaega suurendada 50—100%, sest vastasel korral saadakse väga pehmed negatiivid. Normaalilmutiga ilmutatud negatiiviga võrreldes väheneb tera läbimõõt kaks korda.

5. Röntgenifotode ilmutamiseks soovitatakse järgmist kontrastselt töötavat ilmutit:

Metool	3,5 g
Naatriumsulfit, veevaba	60,0 g
Hüdrokinoon	9,0 g
Sooda, veevaba	40,0 g
Kaaliumbromiid	3,5 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Ilmutamise kestus 6 minutit temperatuuril 18° C.

6. Paberi ja plaatide ilmutaja A-125:

Metool	3,0 g
Naatriumsulfit, veevaba	45,0 g
Hüdrokinoon	12,0 g
Sooda, veevaba	55,0 g
Kaaliumbromiid	2,0 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Ilmutamiseks lahjendatakse lahust veega vahekorras 1 : 1. Paberi ilmutamise kestus on 1—2 minutit, plaatide ja filmi ilmutamise kestus 3—5 minutit. Kontrastsuse vähendamiseks lahjendatakse lahust vahekorras 1 : 3 kuni 1 : 4 ja pikendatakse veidi säritust.

Kontrastsemate äratõmmete saamiseks kasutatakse lahjendust 1 : 1, vähendatakse veidi säritusaega ja ilmutatakse veidi kauem.

Enne kinnitajasse asetamist on soovitatav ilmutatud materjal loputada puhtas vees, veel parem ca 0,5%-lises äädikhappelahuses, mis otsekohe peatab ilmumisprotsessi. Mitmesuguste defektide tekkimise oht edaspidisel töötlemisel on sel juhul väiksem. Kui ilmutaja temperatuur on kõrge, siis on soovitatav želatiinikiht parkida, mille tagajärjel ta muutub mehaaniliselt vastupidavamaks.

7. Kroommaarjas-parkija (kasutatakse temperatuuril 25—32° C):

Kroommaarjas	30,0 g
Naatriumsulfaat, veevaba	60,0 g
Vett, kuni lahuse hulk on 1 liiter	

Värske parkimislahus on violetse värvusega. Kasutamisel tema värvus muutub. Kollakasroheliseks muutunud lahus on edasiseks

kasutamiseks kõlbmatu. Parkimise kestus on 3 minutit. Lahust tuleb energiliselt liigutada, vastasel korral tekivad plaadil defektid.

8. Kinniti:

Vesi	1000 cm^3
Naatriumtiosulfaat (hüposulfit)	250,0 g

See kinniti ei ole eriti püsiv. Pealegi ei katke temas ilmumisprotsess otsekohe. Seepärast oksüdeeritakse kinniti kaaliummetabisulfitiga.

9. Kinniti:

Vesi	1000 cm^3
Naatriumtiosulfaat	250,0 g
Kaaliummetabisulfit	25,0 g

Kui on vaja saavutada eriti tugevat želatiinikihti, siis pargitakse see pärast kinnitamist järgmises lahuses.

10. Parkimislahus:

Formaliin	120 ml
Vesi	1000 ml

Parkimise kestus on 5—10 minutit. Eriti tugev parkimistoime on lahusel siis, kui temas vee asemel kasutatakse 50%-list alkoholilahust.

Hüpersensibiliseerimiseks kasutatakse järgmisi lahuseid.

11. Hüpersensibiliseerija ammoniaagiga:

Ammoniaagilahus (erikaal 0,91)	2 ml
Etüülalkohol	275 ml
Destilleeritud vesi	725 ml

Materjali hoitakse 2 minutit vannis, mille temperatuur on 10—12° C. Pärast seda kuivatatakse ta võimalikult kiiresti (ilma temperatuuri tõstmiseta!).

12. Hüpersensibiliseerija booraksiga:

Keedusool (puhas)	0,5 g
Booraks	3,0 g
Vesi	1000 ml

Vanni temperatuur 12° C. Immutamise kestus 2—6 minutit. Kuivatada metüülalkoholis 1 minut.

Hüpersensibiliseerimise mõju on tugevam vähetundlikel plaatidel ja nõrgem tundlikel plaatidel. Nähtava valguse piirkonnas suureneb tundlikkus 2—5 korda, infrapunases osas aga 5—25 korda. Hüpersensibiliseeritud plaadid tuhmuvad kiiresti — neid tuleb kohe tarvitada.

Üldisi märkusi

Lahuste valmistamiseks on soovitatav kasutada destilleeritud vett või vihmavett, nende puudumisel aga mistahes päritoluga puhast vett, mida tuleb enne kasutamist keeta ja lasta mõni tund seista, et keetmisel eralduv kaltsiumkarbonaat sadestuks.

Kui ei ole käepärast veevabu reaktiive, võib kasutada ka kristallvett sisaldavaid reaktiive. Asendusvahekorrad on järgmised:

100 g veevaba naatriumsulfitit = 200 g kristallvett sisaldavat naatriumsulfitit,

100 g veevaba soodat = 270 g kristallvett sisaldavat soodat.

Puuduvaid leelisreaktiive võib asendada järgmises vahekorras:

1 g veevaba soodat = 1,3 g kaaliumkarbonaati = 0,75 g naatriumhüdroksüüdi. Sellist asendamist tuleb siiski võimalikult vältida, sest see muudab ilmuti iseloomu.

Lahuse valmistamiseks võetakse sooja vett (30—45° C) umbes 30% vähem soovitavast lahuse hulgast. Ained lahustatakse retseptis toodud järjekorras, järgmine aine mitte enne, kui eelmine on täiesti lahustunud.

Fotomaterjali pakendil on sageli antud ilmutamise kestus. See on algajat eksiteele viiv suurus. Ta on mõeldud standardilmuti jaoks. Orienteeruda tuleb alati ilmuti retseptiga antud kestusele või ilmuti pakendil näidatud kestusele.

Heade tulemuste saamiseks tuleb jälgida, et kõikide lahuste temperatuur oleks sama, kui retseptis ei ole selle kohta vastavat märkust (näiteks värviline ilmutamine).

Kirjandust

Fotograafia käsiraamat. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 1959.

E. v. Angerer, G. Joos, Wissenschaftliche Photographie, Leipzig, 1956.

В. П. Микулин, Фоторецептурный справочник, Москва, 1958.

Б. К. Неблит, Фотография, ее материалы и процессы, Москва, 1958.

А. А. Лапаури, Фотографическая оптика, Москва, 1955.

В. С. Чельцов, С. А. Бонгард, Цветное проявление, Москва, 1958.

VI. TABELID

1. TIHEDUSI (g/cm³)

Tahked kehad 18° C puhul

Alumiinium	2,7	Messing (valgevask)	8,1—8,6
Hõbe	10,5	Plaatina	21,5
Jää 0° C puhul	0,92	Plii (seatina)	11,3
Klaas	2,4—2,6	Raud	7,8
Kork	0,22	Tina (inglistina)	7,28
Kuld	19,3	Tsink	7,1
Marmor	2,5—2,8	Vask	8,9

Vedelikud 18° C puhul

Bensool	0,88	Etüüleeter	0,72
Elavhõbe	13,6	Glütseriin	1,26
Etüülalkohol	0,79	Petrooleum	0,8
		Piim	1,03

Gaasid 0° C ja 760 mm Hg puhul

Hapnik	0,00143	Vesinik	0,0000899
Lämmastik	0,00125	Õhk	0,001293

2. VEE TIHEDUS TEMPERATUURIVAHEMIKUS 0—25° C

Temperatuur °C	Tihedus g/cm³	Temperatuur °C	Tihedus g/cm³
0	0,999 841	13	0,999 377
1	900	14	244
2	941	15	099
3	965	16	0,998 943
4	973	17	775
5	965	18	596
6	941	19	406
7	902	20	205
8	849	21	0,997 994
9	781	22	772
10	701	23	540
11	606	24	299
12	498	25	047

3. PINDPINEVUS- JA SISEHÕÕRDUMISKOEFITSIENTE

Aine	Temperatuur °C	Pindpinevus-koefitsient dn/cm	Sisehõõrdumis-koefitsient puaasides
Bensool	18	29,1	0,0067
Elavhõbe	„	491	0,0157
Etüülalkohol	„	22,0	0,0124
Etüüleeter	„	16,4	0,00248
Glütseriin	„	62,5	16,56
Oliiviõli	„	33	0,989
Petrooleum	„	27	—
Pigi	„	—	$3 \cdot 10^8$
Riitsinusõli	„	36,4	12,78
Tärpentin	„	27	0,0219
Vesi	0	75,6	0,01789
„	10	74,1	0,01306
„	20	72,6	0,01005
„	30	71,0	0,00802

4. ELASTSUSMOODULEID (kG/mm²)

Alumiinium	7400	Puit piki kiudu	900—1300
Iriidium	52000	” risti ”	40—110
Klaas	4000—9000	Raud	21700
Messing (valgevask)	10500	Teras	21900
Nikkel	20300	Tina (inglistina)	5500
Plaatina	17000	Tsink	3500—13000
Plii (seatina)	1700	Vask	12000

5. HÄÄLE LEVIMISKIIRUSI (m/s)

Tahked kehad 18° C

Alumiinium	5100
Eboniit	1560
Kork	430—530
Klaas	5000
Messing (valgevask)	3400
Plii (seatina)	1300
Puit: kuusk	5256
tamm	3381
Raud ja teras	5100
Tsink	3700
Vask	3900

Vedelikud 0° C

Bensool	1324
Elavhõbe	1451
Etüülalkohol	1168
Glütseriin	1923
Vesi	1484

Gaasid 0° C

Hapnik	315
Kloor	206
Süsihappegaas	258
Valgustusgaas	441
Vesinik	1241

6. SOOJUSLIKKE KONSTANTE

Tahked kehad

Aine	Joonpaisumiskoefitsient vahemikus 0—100° C	Erisoojus 18° C puhul cal/g · kr	Sulamistemperatuur °C	Sulamissoojus cal/g	Keemistemperatuur °C
Alumiinium	0,000 023	0,214	659	94,6	2500
Hõbe	020	0,056	960,5	25,1	2180
Klaas	009	0,19	800—1400		
Kuld	014	0,031	1063	15,4	2950
Messing (valgevask)	018	0,092	~900		
Plaatina	009	0,032	1773	24,1	4400
Plii (seatina)	029	0,031	327	5,9	1750
Raud	012	0,111	1540	64	2880
Tina (inglistina) . .	027	0,052	231,9	14,5	2430
Tsink	036	0,093	419,4	24,5	807
Vask	016	0,092	1083	48,9	2595

Vedelikud

Aine	Ruumpaisumiskoefitsient 18° C puhul	Erisoojus 18° C puhul cal/g · kr	Sulamistemperatuur °C	Sulamissoojus cal/g	Keemistemperatuur °C	Keemissoojus cal/g
Bensool	0,00106	0,41	+5,48	30,4	80,1	94,5
Elavhõbe	018	0,033	—38,83	2,84	356,7	67,8
Etüülalkohol . . .	110	0,57	—114,2	25,8	78,37	207
Etüüleeter	162	0,56	—116,2	23,5	34,66	88,4
Glütseriin . . .	049	0,57	—20	42,5	290	
Kloroform . . .	128	0,225	—63,3	17,9	61,27	58,4
Petrooleum . . .	096	0,50				
Vesi	013	0,9991	0	79,7	100	539,1
Väävelsüsinik . .	118	0,24	—111,8	17,7	46,25	86,7

7. KÜLLASTATUD VEEAURU RÕHK E (mm Hg) JA ABSOLUUTNE NIISKUS A $\left(\frac{g}{m^3}\right)$ TEMPERATUURIDE VAHEMIKUS —10—30° C

$t°$	E	A	$t°$	E	A
—10	1,95	2,14	11	9,8	10,0
—9	2,13	2,33	12	10,5	10,7
—8	2,32	2,54	13	11,2	11,4
—7	2,53	2,76	14	12,0	12,1
—6	2.76	2.99	15	12,8	12,8
—5	3.01	3,24	16	13,6	13,6
—4	3,28	3,51	17	14,5	14,5
—3	3,57	3,81	18	15,5	15,4
—2	3,88	4,13	19	16,5	16,3
—1	4,22	4,47	20	17,5	17,3
0	4,58	4,84	21	18,6	18,3
1	4,9	5,2	22	19,8	19,4
2	5,3	5,6	23	21,1	20,6
3	5,7	6,0	24	22,4	21,8
4	6,1	6,4	25	23,8	23,0
5	6 5	6,8	26	25 2	24,4
6	7,0	7,3	27	26,7	25,8
7	7,5	7,8	28	28,3	27,2
8	8,0	8,3	29	30,0	28,7
9	8.6	8,8	30	31,8	30,3
10	9,2	9,4			

8. MURDUMISNÄITAJAID

(Na D-joon, $\lambda = 589{,}3$ mμ, 20° C ja 760 mm Hg)

Bensool	1,5013	Kroonklaas	1,5100
Etüülalkohol	1,3617	Kvartsklaas	1,4589
Etüüleeter	1,3526	Raske flintklaas	1,7550
Glütseriin	1,4695	Seedriõli	1,505
Jää 0° C	1,31	Teemant	2,4173
Kanada palsam	1,542	Vesi	1,3330
Keedusool	1,5443	Väävelsüsinik	1,6277

9. FRAUNHOFERI JOONTE LAINEPIKKUSI

Joone nimetus	Aine	λ mμ	Joone nimetus	Aine	λ mμ
A	O	760,8	*F*	H	486,1
a	O	718,4	*d*	Fe	466,8
B	O	686,7	*e*	Fe	438,4
C	H	656,3	*G*	Ca	430,8
D_1	Na	589,6	*g*	Ca	422,7
D_2	Na	589,0	*h*	H	410,2
D_3	He	587,6	*H*	Ca	396,8
E	Fe	527,0	*K*	Ca	393,4
b	Mg; Fe	517,2	*M*	Fe	373,5
c	Fe	495,8	*N*	Fe	358,1

10. SPEKTRIJOONTE LAINEPIKKUSI DISPERSIOONIKÕVERATE MÄÄRAMISEKS

	Lainepikkus mμ	Värvus	Intensiivsus
Heelium	706,5	tumepunane	nõrk
	667,8	punane	tugev
	587,6	kollane	väga tugev
	504,8	roheline	nõrk
	501,6	roheline	keskmine
	492,2	sinakasroheline	keskmine
	471,3	sinine	nõrk
	447,1	sinine	tugev
	439,0	violett	nõrk
Elavhõbe	579,1	kollane	väga tugev
	577,0	kollane	väga tugev
	546,1	roheline	tugev
	491,6	sinakasroheline	keskmine
	435,8	sinine	tugev
	407,8	violett	keskmine
	404,7	violett	keskmine
Vesinik	656,3	punane	tugev
	486,1	sinakasroheline	keskmine
	434,0	violett	keskmine
	410,2	violett	nõrk
Kaalium	769,9	tumepunane	tugev
	766,5	tumepunane	tugev
	404,7	violett	keskmine
Liitium	670,8	punane	tugev
	610,4	oranž	nõrk
Naatrium	589,6	kollane	tugev
	589,0	kollane	väga tugev
Tallium	535,0	roheline	väga tugev

11. METALLIDE ERITAKISTUSI

(Temperatuur 18° C, eritakistus Ω cm)

Hõbe	$10^{-4} \cdot 0{,}016$	Plii (seatina)	$10^{-4} \cdot 0{,}21$
Vask	0,017	Elavhõbe	0,958
Alumiinium	0,027	Messing (valgevask)	0,08
Volfram	0,053	Manganiin	0,43
Tsink	0,059	Konstantaan	0,50
Raud	0,098	Teras, pehme	0,1—0,2
Plaatina	0,105	„ karastatud	0,4—0,5
Tina (inglistina)	0,110	Kroomnikkel	1,08

12. ELEKTROLÜÜTIDE ERIJUHTIVUSI (Ω^{-1} cm^{-1})

$t°$ C	H_2SO_4 maksimaalse juhtivusega 18° C 30,2 %	$MgSO_4$ maksimaalse juhtivusega 18° C 17,4 %	NaCl küllastatud antud temperatuuri puhul	KCl normaallahus 74,59 g/l	KCl 1/100 normaallahus
15	0,7028	0,04555	0,2015	0,09252	0,001147
16	0,7151	0,04676	0,2063	0,09441	0,001173
17	0,7275	0,04799	0,2112	0,09631	0,001199
18	0,7398	0,04922	0,2161	0,09822	0,001225
19	0,7522	0,05046	0,2210	0,10014	0,001251
20	0,7645	0,05171	0,2260	0,10207	0,001278
21	0,7768	0,05297	0,2310	0,10400	0,001305
22	0,7890	0,05424	0,2360	0,10594	0,001332
23	0,8013	0,05521	0,2411	0,10789	0,001359
24	0,8135	0,05679	0,2462	0,10984	0,001386
25	0,8257	0,05808	0,2513	0,11180	0,001413

13. ELEKTROKEEMILISI EKVIVALENTE

Vool tugevusega 1 A eraldab

	mg vaske	mg hõbedat	cm^3 paukgaasi 0° C ja 760 mm Hg puhul
1 sekundis	0,3294	1,118	0,1740
1 minutis	19,76	67,08	10,44
1 tunnis	1186	4025	626

14. METALLIDE TERMOPINGEID Pt SUHTES

(Jootekohtade temperatuur 0° C ja 100° C)

Aine	mV	Aine	mV
Antimon	+4,7	Plii (seatina)	+0,45
Raud	+1,8	Alumiinium	+0,4
Vask	+0,75	Elavhõbe	0,0
Hõbe	+0,7	Nikkel	—1,5
Tsink	+0,7	Konstantaan	—3,4
Tina (inglistina)	+0,45	Vismut	—7

15. TRIGONOMEETRILISTE FUNKTSIOONIDE VÄÄRTUSED

	Sinus		Tangens		Cotangens		Cosinus		
↓ 0°	0,0000	175	0,0000	175	∞		1,0000	02	90
1	,0175	174	,0175	174	57,29		0,9998	04	89
2	,0349	174	,0349	175	28,64		,9994	08	88
3	,0523	175	,0524	175	19,08		,9986	10	87
4	,0698	174	,0699	176	14,30		,9976	14	86
5	,0872	173	,0875	176	11,43		,9962	17	85
6	,1045	174	,1051	177	9,514		,9945	20	84
7	,1219	173	,1228	177	8,144		,9925	22	83
8	,1392	172	,1405	179	7,115	801	,9903	26	82
9	,1564	172	,1584	179	6,314	643	,9877	29	81
10	,1736	172	,1763	181	5,671	526	,9848	32	80
11	,1908	171	,1944	182	5,145	440	,9816	35	79
12	,2079	171	,2126	183	4,705	374	,9781	37	78
13	,2250	169	,2309	184	4,331	320	,9744	41	77
14	,2419	169	,2493	186	4,011	279	,9703	44	76
15	,2588	168	,2679	188	3,732	245	,9659	46	75
16	,2756	168	,2867	190	3,487	216	,9613	50	74
17	,2924	166	,3057	192	3,271	193	,9563	52	73
18	,3090	166	,3249	194	3,078	174	,9511	56	72
19	,3256	164	,3443	197	2,904	157	,9455	58	71
20	,3420	164	,3640	199	2,747	142	,9397	61	70
21	,3584	162	,3839	201	2,605	130	,9336	64	69
22	,3746	161	,4040	205	2,475	119	,9272	67	68
23	,3907	160	,4245	207	2,356	110	,9205	70	67
24	,4067	159	,4452	211	2,246	101	,9135	72	66
25	,4226	158	,4663	214	2,145	95	,9063	75	65
26	,4384	156	,4877	218	2,050	87	,8988	78	64
27	,4540	155	,5095	222	1,963	82	,8910	81	63
28	,4695	153	,5317	226	1,881	77	,8829	83	62
29	,4848	152	,5543	231	1,804	72	,8746	86	61
30	,5000	150	,5774	235	1,732	68	,8660	88	60
31	,5150	149	,6009	240	1,664	64	,8572	92	59
32	,5299	147	,6249	245	1,600	60	,8480	93	58
33	,5446	146	,6494	251	1,540	57	,8387	97	57
34	,5592	144	,6745	257	1,483	55	,8290	98	56
35	,5736	142	,7002	263	1,428	52	,8192	102	55
36	,5878	140	,7265	271	1,376	49	,8090	104	54
37	,6018	139	,7536	277	1,327	47	,7986	106	53
38	,6157	136	,7813	285	1,280	45	,7880	109	52
39	,6293	135	,8098	293	1,235	43	,7771	111	51
40	,6428	133	,8391	302	1,192	42	,7660	113	50
41	,6561	130	,8693	311	1,150	39	,7547	116	49
42	,6691	129	,9004	321	1,111	39	,7431	117	48
43	,6820	127	,9325	332	1,072	36	,7314	121	47
44	,6947	124	,9657	343	1,036	36	,7193	122	46
45	,7071		1,0000		1,000		,7071		45° ↑
	Cosinus		Cotangens		Tangens		Sinus		

n	n^2	n^3	$\frac{1}{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$n\frac{\pi}{180}$	$\log_{10} n$	$\ln n$
1	1	1	1,0000	1,000	1,000	0,0175	0,0000	0.0000
2	4	8	0,5000	1,414	1,260	0,0349	0,3010	0.6931
3	9	27	,3333	1,732	1,442	0,0524	0,4771	1.0986
4	16	64	,2500	2,000	1,587	0,0698	0,6021	1.3863
5	25	125	,2000	2,236	1,710	0,0873	0,6990	1.6094
6	36	216	,1667	2,449	1,817	0,1047	0,7782	1.7918
7	49	343	,1429	2,646	1,913	0,1222	0,8451	1.9459
8	64	512	,1250	2,828	2,000	0,1396	0,9031	2.0794
9	81	729	,1111	3,000	2,080	0,1571	0,9542	2.1972
10	100	1000	,10000	3,162	2,154	0,1745	1,0000	2.3026
11	121	1331	,09091	3,317	2,224	0,1920	1,0414	2.3979
12	144	1728	,08333	3,464	2,289	0,2094	1,0792	2.4849
13	169	2197	,07692	3,606	2,351	0,2269	1,1139	2.5649
14	196	2744	,07143	3,742	2,410	0,2443	1,1461	2.6391
15	225	3375	,06667	3,873	2,466	0,2618	1,1761	2.7081
16	256	4096	,06250	4,000	2,520	0,2793	1,2041	2.7726
17	289	4913	,05882	4,123	2,571	0,2967	1,2304	2.8332
18	324	5832	,05556	4,243	2,621	0,3142	1,2553	2.8904
19	361	6859	,05263	4,359	2,668	0,3316	1,2788	2.9444
20	400	8000	,05000	4,472	2,714	0,3491	1,3010	2.9957
21	441	9261	,04762	4,583	2,759	0,3665	1,3222	3.0445
22	484	10648	,04545	4,690	2,802	0,3840	1,3424	3.0910
23	529	12167	,04348	4,796	2,844	0,4014	1,3617	3.1355
24	576	13824	,04167	4,899	2,884	0,4189	1,3802	3.1781
25	625	15625	,04000	5,000	2,924	0,4363	1,3979	3.2189
26	676	17576	,03846	5,099	2,962	0,4538	1,4150	3.2581
27	729	19683	,03704	5,196	3,000	0,4712	1,4314	3.2958
28	784	21952	,03571	5,292	3,037	0,4887	1,4472	3.3322
29	841	24389	,03448	5,385	3,072	0,5061	1,4624	3.3673
30	900	27000	,03333	5,477	3,107	0,5236	1,4771	3.4012
31	961	29791	,03226	5,568	3,141	0,5411	1,4914	3.4340
32	1024	32768	,03125	5,657	3,175	0,5585	1,5051	3.4657
33	1089	35937	,03030	5,745	3,208	0,5760	1,5185	3.4965
34	1156	39304	,02941	5,831	3,240	0,5934	1,5315	3.5264
35	1225	42875	,02857	5,916	3,271	0,6109	1,5441	3.5553
36	1296	46656	,02778	6,000	3,302	0,6283	1,5563	3.5835
37	1369	50653	,02703	6,083	3,332	0,6458	1,5682	3.6109
38	1444	54872	,02632	6,164	3,362	0,6632	1,5798	3.6376
39	1521	59319	,02564	6,245	3,391	0,6807	1,5911	3.6636
40	1600	64000	,02500	6,325	3,420	0,6981	1,6021	3.6889
41	1681	68921	,02439	6,403	3,448	0,7156	1,6128	3.7136
42	1764	74088	,02381	6,481	3,476	0,7330	1,6232	3.7377
43	1849	79507	,02326	6,557	3,503	0,7505	1,6335	3.7612
44	1936	85184	,02273	6,633	3,530	0,7679	1,6435	3.7842
45	2025	91125	,02222	6,708	3,557	0,7854	1,6532	3.8067
46	2116	97336	,02174	6,782	3,583	0,8029	1,6628	3.8286
47	2209	103823	,02128	6,856	3,609	0,8203	1,6721	3.8501
48	2304	110592	,02083	6,928	3,634	0,8378	1,6812	3.8712
49	2401	117649	,02041	7,000	3,659	0,8552	1,6902	3.8918
50	2500	125000	,02000	7,071	3,684	0,8727	1,6990	3.9120

n	n^2	n^3	$\frac{1}{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$n\frac{\pi}{180}$	$\log_{10} n$	$\ln n$
50	2500	125000	,02000	7,071	3,684	0,873	1,6990	3.9120
51	2601	132651	,01961	7,141	3,708	0,890	1,7076	3.9318
52	2704	140608	,01923	7,211	3,733	0,908	1,7160	3.9512
53	2809	148877	,01887	7,280	3,756	0,925	1,7243	3.9703
54	2916	157464	,01852	7,348	3,780	0,942	1,7324	3.9890
55	3025	166375	,01818	7,416	3,803	0,960	1,7404	4.0073
56	3136	175616	,01786	7,483	3,826	0,977	1,7482	4.0254
57	3249	185193	,01754	7,550	3,849	0,995	1,7559	4.0431
58	3364	195112	,01724	7,616	3,871	1,012	1,7634	4.0604
59	3481	205379	,01695	7,681	3,893	1,030	1,7709	4.0775
60	3600	216000	,01667	7,746	3,915	1,047	1,7782	4.0943
61	3721	226981	,01639	7,810	3,936	1,065	1,7853	4.1109
62	3844	238328	,01613	7,874	3,958	1,082	1,7924	4.1271
63	3969	250047	,01587	7,937	3,979	1,100	1,7993	4.1431
64	4096	262144	,01563	8,000	4,000	1,117	1,8062	4.1589
65	4225	274625	,01538	8,062	4,021	1,134	1,8129	4.1744
66	4356	287496	,01515	8,124	4,041	1,152	1,8195	4.1897
67	4489	300763	,01493	8,185	4,062	1,169	1,8261	4.2047
68	4624	314432	,01471	8,246	4,082	1,187	1,8325	4.2195
69	4761	328509	,01449	8,307	4,102	1,204	1,8388	4.2341
70	4900	343000	,01429	8,367	4,121	1,222	1,8451	4.2485
71	5041	357911	,01408	8,426	4,141	1,239	1,8513	4.2627
72	5184	373248	,01389	8,485	4,160	1,257	1,8573	4.2767
73	5329	389017	,01370	8,544	4,179	1,274	1,8633	4.2905
74	5476	405224	,01351	8,602	4,198	1,292	1,8692	4.3041
75	5625	421875	,01333	8,660	4,217	1,309	1,8751	4.3175
76	5776	438976	,01316	8,718	4,236	1,326	1,8808	4.3307
77	5929	456533	,01299	8,775	4,254	1,344	1,8865	4.3438
78	6084	474552	,01282	8,832	4,273	1,361	1,8921	4.3567
79	6241	493039	,01266	8,888	4,291	1,379	1,8976	4.3694
80	6400	512000	,01250	8,944	4,309	1,396	1,9031	4.3820
81	6561	531441	,01235	9,000	4,327	1,414	1,9085	4.3944
82	6724	551368	,01220	9,055	4 344	1,431	1,9138	4.4067
83	6889	571787	,01205	9,110	4,362	1,449	1,9191	4.4188
84	7056	592704	,01190	9,165	4,380	1,466	1,9243	4.4308
85	7225	614125	,01176	9,220	4,397	1,484	1,9294	4.4427
86	7396	636056	,01163	9,274	4,414	1,501	1,9345	4.4543
87	7569	658503	,01149	9,327	4,431	1,518	1,9395	4.4659
88	7744	681472	,01136	9,381	4,448	1,536	1,9445	4.4773
89	7921	704969	,01124	9,434	4,465	1,553	1,9494	4.4886
90	8100	729000	,01111	9,487	4,481	1,571	1,9542	4.4998
91	8281	753571	,01099	9,539	4,498	1,588	1,9590	4.5109
92	8464	778688	,01087	9,592	4,514	1,606	1,9638	4.5218
93	8649	804357	,01075	9,644	4,531	1,623	1,9685	4.5326
94	8836	830584	,01064	9,695	4,547	1,641	1,9731	4.5433
95	9025	857375	,01053	9,747	4,563	1,658	1,9777	4.5539
96	9216	884736	,01042	9,798	4,579	1,676	1,9823	4.5643
97	9409	912673	,01031	9,849	4,595	1,693	1,9868	4.5747
98	9604	941192	,01020	9,899	4,610	1,710	1,9912	4.5850
99	9801	970299	,01010	9,950	4,626	1,728	1,9956	4.5951
100	10000	1000000	,01000	10,000	4,642	1,745	2,0000	4.6052

VII. LISAD

1. KÜMNENDSÜSTEEMI MÕÕTÜHIKUTE TULETAMINE

Peaaegu kõigi füüsikaliste suuruste mõõtühikud põhinevad kümnendsüsteemil, s. o. mõõtühikute suhted väljenduvad 10 positiivsete või negatiivsete täisastmetega. See hõlbustab arvutamist ja uute mõõtühikute nimetuste tuletamist ning meelespidamist. Lähtudes põhiühiku nimetusest, saadakse põhiühikust 10, 100, 1000 või 10^6 korda suuremate ühikute nimetused põhiühiku nimetusele vastavate eesliidete — deka-, hekto-, kilo-, mega- — lisamisega, näiteks dekaluumen, hektoliiter, kilomeeter, megadüün. Põhiühikust 10, 100, 1000 või 10^6 korda väiksemate ühikute tuletamiseks kasutatakse vastavalt eesliiteid detsi-, senti-, milli- ja mikro-, näiteks detsigramm, sentimeeter, milliamper, mikrofarad. Kõige rohkem leiavad kasutamist liited kilo-, mega-, milli- ja mikro-. Ülevaate kümnendsüsteemi ühikute tuletamisest annab järgmine tabel.

Kümnendsüsteemi mõõtühikud ja nende tähised

Põhiühiku nimetuse ja tähise liide	Suhe põhiühikusse	Näiteid
Mega — M	10^6	MV; megadüün
Kilo — k	10^3	kg; kJ; kW; kV; kHz
Hekto — h	10^2	hl; hW; ha; hg
Deka — D	10	Dm; Dlm; Dg
Põhiühik	1	meeter — m; gramm — g; volt — V; amper — A; vatt — W; džaul — J; farad — F; aar — a; luumen — lm

Põhiühiku nimetuse ja tähise liide	Suhe põhiühikusse	Näiteid
Detsi — d	10^{-1}	dm; dg; dl
Senti — c	10^{-2}	cm; cg; cl
Milli — m	10^{-3}	mm; mμ; mV; mA; mW
Mikro — μ	10^{-6}	μV; μF; μm ehk μ
Piko — p, ehk mikro-mikro — $\mu\mu$	10^{-12}	pF

Märkus: Vahel kasutatakse ka liiteid giga (G) — 10^9, tera (T) — 10^{12} ja nano (n) — 10^{-9}, näiteks 1 Gm = 10^9 m, 1 nm = 10^{-9} m jne.

2. KREEKA TÄHESTIK

Tähemärgid		Nimetus	Tähemärgid		Nimetus
Suur	Väike		Suur	Väike	
A	α	alfa	N	ν	nüü
B	β	beeta	Ξ	ξ	ksii
Γ	γ	gamma	O	o	omikron
Δ	δ	delta	Π	π	pii
E	ε	epsilon	P	ϱ	rhoo (roo)
Z	ζ	dseeta	Σ	σ, ς	sigma
H	η	eeta	T	τ	tau
Θ	ϑ	theeta	Y	υ	üpsilon
I	ι	ioota	Φ	φ	fii
K	$\varkappa$	kapa	X	χ	hii
Λ	λ	lambda	Ψ	ψ	psii
M	μ	müü	Ω	ω	oomega

3. MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMIDE VÕRDLUSTABEL

Süsteemi nimetus	Põhisuurused ja -ühikud				Tuletatud suurused ja ühikud					
	Pikkus	Mass	Aeg	Tung	Tung	Mass	Töö	Võimsus	Rõhk	Erikaal
cgs	cm	g	s	—	düün dn	— (põhiühik)	erg	$\frac{\text{erg}}{\text{s}}$	$\frac{\text{dn}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{dn}}{\text{cm}^3}$
mks	m	kg	s	—	njuuton nj; N	— (põhiühik)	džaul dž; J	vatt W	$\frac{\text{nj}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{nj}}{\text{m}^3}$
mkGs	m	—	s	kG	— (põhiühik)	mtü	kGm	$\frac{\text{kGm}}{\text{s}}$	$\frac{\text{kG}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{kG}}{\text{m}^3}$

Süsteemi nimetus	Põhiühikud				Elektrihulk	Pinge	Mahtuvus	Väljatugevus	Voolutugevus	Takistus
cgse	cm	g	s	lü	— (põhiühik)	$1\ \text{pü} = 1\ \frac{\text{erg}}{\text{lü}}$	$1\ \text{mü} = 1\ \frac{\text{lü}}{\text{pü}}$	$\frac{\text{dn}}{\text{lü}}$	$\frac{\text{lü}}{\text{s}}$	$1\ \text{tü} = 9 \cdot 10^{11}\ \Omega$
mksA	m	kg	s	A	1C-1As	$1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{C}}$	$1\ \text{F} = 1\ \frac{\text{C}}{\text{V}}$	$\frac{\text{nj}}{\text{C}}$	— (põhiühik)	oom Ω

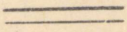
4. ELEKTRILISTE LÜLITUSTE SÜMBOLID

Alalisvool

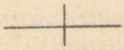
Vahelduvvool



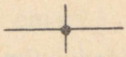
Juhe (jämedus määrab tähtsuse)



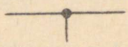
Juhtmete ristumine ilma ühenduseta



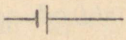
Juhtmete ristumine ühendusega



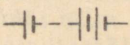
Juhtmete harunemine



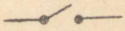
Element või akumulaator
Pikk kriips tähendab +- ja lühike —-poolust



Elementide või akumulaatorite patarei



Lüliti



Voltmeeter



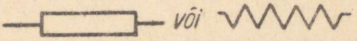
Ampermeeter



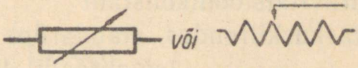
Galvanomeeter



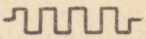
Oomiline takistus



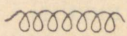
Reguleeritav takistus



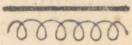
Induktsioonivaba takistus



Induktiivne takistus, ka pooli mähis



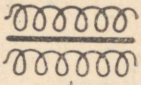
Pool raudsüdamikuga



Telefon



Transformaator



Elektrontoru (otsese küttega triood)



Elektrontoru (kaudse küttega triood)



Pöördpoolmõõteriist



Pehmeraudmõõteriist



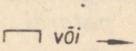
Elektrodünaamiline mõõteriist



Mõõteriista püstasendis kasutamise tähis



Mõõteriista rõhtasendis kasutamise tähis



5. ÜLDISI FÜÜSIKALISI KONSTANTE JA ARVE

$\pi = 3{,}14159 \approx \frac{22}{7}$; $\pi^2 = 9{,}8696$; $\sqrt{\pi} = 1{,}77245$; $\frac{1}{\pi} = 0{,}3183$; $\log \pi = 0{,}49715$; $e = 2{,}71828$.

1 radiaan $= 57°17'44'',8 = 57°,2958$.

Gravitatsioonikonstant	$G =$	$6{,}67 \cdot 10^{-8}$ dn cm^2 g^{-2}
Raskuskiirendus, standardne	$g_n =$	980,665 cm s^{-2}
„ laiuskraadil 45	$g_{45} =$	980,616 cm s^{-2}
Moolruumala norm. tingimustel	$V_0 =$	$22{,}414 \cdot 10^3$ cm^3 mool^{-1}
Avogadro arv (molekulide arv moolis)	$N =$	$6{,}023 \cdot 10^{23}$ mool^{-1}
Loschmidti arv (molekulide arv 1 cm^3-s norm. ting.)	$n =$	$2{,}687 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}
Universaalne gaasikonstant	$R =$	$8{,}314 \cdot 10^7$ erg kr^{-1} mool^{-1}
	$R =$	1,986 cal$_{15}$ kr^{-1} mool^{-1}
	$R =$	0,08205 l at kr^{-1} mool^{-1}

Boltzmanni konstant	$k =$	$1{,}380 \cdot 10^{-16}$ erg kr^{-1}
Jää sulamistemperatuur	$T_0 =$	273,16° K
Soojuse mehaaniline ekvivalent		$4{,}185 \cdot 10^{7}$ erg cal_{15}^{-1} 427 kGm $kcal^{-1}$
Töö termiline ekvivalent		0,24 cal J^{-1} 2,34 cal kGm^{-1}
Vee maksimaalne tihedus	$\delta_m =$	0,999972 g cm^{-3}
Elavhõbeda tihedus norm. ting.	$\varrho_m =$	13,59509 g cm^{-3}
Valguse kiirus vaakuumis	$c =$	$2{,}99792{,}7 \cdot 10^{10}$ cm s^{-1}
Plancki konstant	$h =$	$6{,}624 \cdot 10^{-27}$ erg s
Wieni nihkeseaduse konstant	$C =$	0,2897 cm kr
Stefan-Boltzmanni seaduse konstant	$\sigma =$	$5{,}67 \cdot 10^{-5}$ erg cm^{-2} kr^{-4} s^{-1}
Faraday arv (keemilises skaalas)	$F =$	9,649 C gr.-ekv.$^{-1}$
Elektroni laeng	$e =$	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C $4{,}803 \cdot 10^{-10}$ lü
Elektroni mass	$m_e =$	$9{,}106 \cdot 10^{-28}$ g
Prootoni mass	$m_p =$	$1{,}672 \cdot 10^{-24}$ g
Elektroni ja prootoni masside suhe	$\frac{m_e}{m_p} =$	$\frac{1}{1836{,}6}$
Keemilise skaala puhul võetakse aatomkaalu ühikuks hapniku isotoopide segu (O^{16}, O^{17} ja O^{18}) keskmine aatomkaal	$A_O =$	16,0000
Füüsikalise skaala puhul võetakse aatomkaalu ühikuks hapniku kergeima isotoobi (O^{16}) aatomkaal	$A_{O^{16}} =$	16,0000
Osakese mass aatomkaaluga üks ühik keemilise skaala järgi		$1{,}660 \cdot 10^{-24}$ g
Sama füüsikalise skaala järgi		$1{,}6599 \cdot 10^{-24}$ g
Keemilise aatomkaalu ühiku suhe füüsikalise aatomkaalu ühikusse	$r =$	1,000272
Elektroni aatomkaal füüs. sk. järgi	$A_e =$	$5{,}486 \cdot 10^{-4}$

Kerge vesiniku aatomkaal füüs. sk. järgi	$A_{H^1} =$	1,00813
Vesiniku aatomkaal, isotoopide segu	$A_H =$	1,00828
Neutroni aatomkaal füüs. sk. järgi	$A_{n^0} =$	1,00894
Raske vesiniku aatomkaal füüs. sk. järgi	$A_{H^2} =$	2,01473
Heeliumi aatomkaal füüs. sk. järgi	$A_{H_2^4} =$	4,00389
Maa keskmine raadius		$6{,}3712 \cdot 10^8$ cm
Maa ruumala		$1{,}083 \cdot 10^{21}$ m^3
Maa mass		$5{,}984 \cdot 10^{27}$ g
Maa massi suhe Kuu massisse		81,53
Kuu keskmine kaugus Maast		60,27 Maa raadiust 384 400 km
Päikese raadius		$6{,}963 \cdot 10^{10}$ cm
Päikese mass		$1{,}991 \cdot 10^{33}$ g
Päikese keskmine kaugus Maast		$1{,}4967 \cdot 10^{13}$ cm
Solaarkonstant	$S =$	1,91 cal cm^{-2} min^{-1}

6. MITMESUGUSEID ÜHIKUID

1 liiter kui 1 kg puhta vee ruumala temperatuuril 4° C ja rõhul 760 mm Hg	1 l =	1000,028 cm^3
1 gramm raskust	1 G =	980,665 dn
1 kilogramm raskust	1 kG =	9,80665 nj
1 füüsikaline atmosfäär ehk 760 mm Hg	1 At =	$1{,}013249 \cdot 10^6$ dn cm^{-2}
1 tehniline atmosfäär ehk 1 kG cm^{-2}	1 at =	980665 dn cm^{-2}
1 torr ehk 1 mm Hg	1 tr =	1333 dn cm^{-2}
1 kilogramm-meeter	1 kGm =	$9{,}80665 \cdot 10^7$ ergi
1 hobujõud	1 hj =	75 kGm s^{-1} = 735 W
1 vatt ehk 1 džaul sekundis	1 W =	1 J s^{-1} = 10^7 erg s^{-1}
1 vattsekund	1 Ws =	1 J = 10^7 ergi
1 kilovatt-tund	1 kWh =	$3{,}6 \cdot 10^6$ J = 860 kcal
1 elektronvolt — energia, mida saab elektron ühevoldise pinge läbimisel	1 eV =	$1{,}602 \cdot 10^{-12}$ ergi
1 röntgen — röntgeni- või γ-kiirte hulk, mis 1 cm^3 õhus normaaltingimustel tekitab 1 lü ühenimelisi ioone	1 r	

7. KÜSIMUSI ENDAKONTROLLIKS

Mõisteid ja ühikuid	Sümboleid	Konstante	Üleminekuid
1. Pikkusühikud	m; cm; mm; μ; mμ; nm; Å		km-cm cm-μ-mμ-Å
2. Massiühikud	kg; g; t; mg; μg; mtü		t-kg-g-mg
3. Kiirus ja kiirendus	$\frac{cm}{s}$; $\frac{m}{s^2}$; $\frac{m}{min^2}$	981; 9,81	
4. Tungiühikud: düün, megadüün, grammtung, kilogrammtung, njuuton	dn; G; kG; $\frac{g\,cm}{s^2}$ nj	981; 9,81 1,02	dn-G kG-dn mG-dn kG-nj
5. Tööühikud: erg, džaul, kilogrammmeeter, kilovattund, vattsekund	$\frac{g\,cm^2}{s^2}$; Ws; J kWh; kGm	9,81; 0,102 $3{,}6 \cdot 10^6$ 860; 367 200	kGm-J kWh-kGm kWh-kcal
6. Võimsus: vatt, kilovatt, hobujõud	W; kW; hj; $\frac{erg}{s}$	735; 1,36	hj-W-kW erg-mG · cm
7. Erikaal ja tihedus	$\frac{G}{cm^3}$; $\frac{dn}{cm^3}$; $\frac{g}{cm^3}$ $\frac{kg}{dm^3} = \frac{g}{cm^3} = \frac{t}{m^3}$	13,6; 7,8 0,0013 1,03	
8. Kalor, kilokalor, eri-, sulamis- ja keemissoojus, soojusmahtuvus	cal; kcal; $\frac{cal}{g\,kr}$	539; 80; 1	cal-J
9. Soojuse mehaaniline ekvivalent ja töö termiline ekvivalent	$\frac{kGm}{kcal}$; $\frac{cal}{J}$; $\frac{J}{cal}$	427; 0,24 4,2; 2,34	kGm-cal
10. Rõhk ja rõhumine, füüsikaline ja tehniline atmosfäär, baar	at; At; $\frac{dn}{cm^2}$; mm Hg	1,033; 760	mm Hg-$\frac{dn}{cm^2}$
11. Laenguühik, kulon, ampersekund	lü; C; As	$3 \cdot 10^9$	lü-C-As
12. Amper, volt, oom, eritakistus, erijuhtivus	V; A; mA; kV $\frac{mg}{C}$; $\frac{C}{s}$; pü	106,3 1,118 300	V-kV pü-V
13. Farad, mikrofarad, pikofarad	F; μF; pF; mü	$9 \cdot 10^{11}$; 0,9	mü-F

8. TRÜ ÜLDISE FÜÜSIKA KATEEDRI ÜLDPRAKTIKUMIS TÖÖTAMISE KORD

1. Iga üliõpilane töötab praktikumis selles rühmas, milles ta on registreeritud.

Töötamist mitte oma rühma töö ajal võib üksikjuhtudel lubada praktikumi juhendaja.

Kõik praktikumist osavõtjad peavad olema õigeaegselt kohal. Hilineja võib tööle asuda ainult praktikumi juhendaja nõusolekul.

2. Praktikumi tööd tehakse graafiku järgi, mille koostavad semestri algul praktikumi juhendaja ja üliõpilasrühma vanem. Praktikumi tööde tegemise ajad märgib graafikusse praktikumi esimesel päeval juhendaja kogu semestri kohta või jooksvalt semestri kestel üliõpilasrühma vanem, teatades sellest praktikantidele. Graafikut hoiab alal rühmavanem.

Praktikumi tööd sooritatakse graafikus ette nähtud päevadel. Kui praktikant ei saa mõjuvatel põhjustel graafikus ette nähtud ajal tööd teha, siis määrab juhendaja vastava töö sooritamiseks eri aja.

3. Praktikumi töö protokoll kirjutatakse otse töö tegemisel tindiga praktikumivihikusse või vastavasse formulari. Vihiku väliskaanele kirjutab praktikant oma ees- ja perekonnanime, osakonna ja õppeaasta. Vihiku esimesele leheküljele kirjutatakse praktikumi tööde nimestik ning pärast iga töö lõplikku äraandmist vastava töö juurde selle äraandmise kuupäev. Tööd kantakse vihikusse nende tegemise järjekorras. Kirjutada tuleb võimalikult loetavalt. Vea korral töö protokollis kriipsutatakse ebaõiged andmed läbi ja õiged andmed kirjutatakse nende kohale üles või kõrvale. Lahtistele lehtedele tehtud märkmeid ei arvestata.

Protokolli esimene osa sisaldab lühikese kokkuvõtte töö teoreetilistest alustest ja teine osa otseseid vaatlusandmeid ning arvutusi, mis on koondatud töö juhises antud tabelisse.

Iga uue töö protokolli tuleb alustada uuelt leheküljelt, iga töö algusse märkida töö järjekorranumber, töö pealkiri ja tegemise kuupäev (äärele). Jätta väljapoole ääred ja pidada neist kinni.

Praktikumi algul esitab praktikant eelmiste nõuete kohaselt vormistatud nummerdatud lehekülgedega töövihiku juhendajale kinnitamiseks.

Hoiduda arvutustes kirjutamast andmetega mitte põhjendatud kümnendkohti!

4. Igaks praktikumi tööks peab praktikant kodus ette valmistuma, tutvudes töö teoreetiliste alustega õpiku ja praktikumiraamatu järgi. Praktikumivihikusse tuleb kodus sisse kanda protokolli esimene osa ning joonestada vastavalt töö sisule tabelid otseste vaatlusandmete märkimiseks.

Tööd praktikumis ei ole lubatud alustada ilma vajaliku ettevalmistuseta.

5. Töö protokolli kirjutab praktikant ainult tema enda poolt tehtud mõõtmiste tulemused. Selle nõude vastu eksimisel võidakse praktikant praktikumist kõrvaldada.

Kui graafikus on sama töö märgitud samaks tööajaks kahele praktikandile, siis kumbki teostab mõõtmisi iseseisvalt. Erandiks on tööd, mis tööde nimekirja järgi on lubatud sooritada kahekesi.

6. Pärast mõõtmisi jätab praktikant katseseadme viimase lugemi võtmise olukorda ja esitab töö juhendajale kontrollimiseks ning vastava märkuse tegemiseks (allkiri sulgudes). Töö arvestamine toimub töökohal. Ilma juhendaja allkirjata märkmeid ei arvestata.

Pärast allkirja saamist tuleb töökoht korrastada, võtta lahti elektrijuhtmete lülitused, sulgeda gaasikraan, tagastada võetud vahendid ning asetada istevahendid kohale. Eriti tuleb valvel olla, et pärast töö lõppu gaasikraanid oleksid korralikult suletud ja elekter välja lülitatud.

Töid juhendaja allkirjaga ainult sulgudes ei tohi praktikandil olla üle kahe. Kahe sulgudes oleva allkirja korral ei ole lubatud alustada uut tööd.

7. Praktikumis teostatud mõõtmiste põhjal tehakse vajalikud arvutused ning esitatakse töö juhendajale lõplikuks vastuvõtmiseks samal või järgmisel praktikumipäeval, viimasel juhul praktikumi tööaja esimesel poolel. Töö esitamisel peab praktikant tundma töö teoreetilisi aluseid, kasutatud mõõtmismeetodit ja mõõtühikute süsteemi ning oskama lahendada tööga seotud küsimusi ning ülesandeid. Töö lõplikul vastuvõtmisel annab juhendaja tööle uue allkirja ilma sulgudeta.

8. Praktikantide kohta, kes ei soorita graafiku kohaselt praktikumi töid ega esita neid õigeaegselt juhendajale lõplikuks vastuvõtmiseks, saadetakse andmed vastava teaduskonna dekaanile seisukoha võtmiseks.

9. Praktikumi töö jaoks vajalikud abivahendid annab välja preparaator või laborant. Võetud vahendid tuleb pärast kasutamist tagastada täies korras. Vahendi rikkumise juhust on praktikant kohustatud viivitamatult teatama praktikumi juhendajale.

10. Töövahendeid ja aparaate tuleb käsitseda hoolikalt. Elektriliste lülituste puhul tuleb enne voolu sisselülitamist lasta juhendajal kontrollida lülitusskeemi. Selle nõude vastu eksimisel vastutab praktikant tekitatud kahjude eest.

Rangelt on keelatud töövahendeid ühe töö juurest teise töö juurde viia, samuti töövahendeid, tööjuhendeid või raamatuid rikkuda või loata koju kaasa võtta.

Praktikant kannab materiaalset vastutust tema süü läbi rikutud töövahendite eest.

11. Praktikumis tuleb töötada vaikselt, kõnelda võimalikult tasa ja pidada rangelt korda.

Töö juures mitte vajalikud esemed (portfellid, kandekotid jne.) tuleb paigutada vastavale riiulile.

12. Praktikumi üliõpilasrühma vanem registreerib praktikumist puudujad ning esitab puudujate nimekirja praktikumi juhendajale.

13. Praktikumi arvestused toimuvad tööplaanis ette nähtud tähtaegadel.

Arvestustele lubatakse ainult need üliõpilased, kelledel kõik graafikus ette nähtud tööd on täiesti lõpetatud.

Töid korralikult ning tähtaegselt sooritanud üliõpilastele antakse praktikumi arvestus ilma erilise lõpparvestuseta.

Lõpparvestusel tuleb teada kõigi sooritatud tööde teoreetilisi aluseid, mõõtühikute süsteeme, osata lahendada töödele vastavaid ülesandeid ning vajaduse korral sooritada iseseisvalt (juhendit mitte kasutades) kontrolltöö, mis on valitud tehtud tööde hulgast.

PÕHILISTE MÕISTETE REGISTER

A

Abbe refraktomeeter 316
aberratsioon, kromaatiline 302
— sfääriline 301
absoluutne emj ühik 15
— elektrivälja tugevuse ühik 14
— elektrostaatiline laenguühik 14
— — pingeühik 15
— — takistuse ühik 15
— — voolutugevuse ühik 15
— induktiivsuse ühik 15
— magnetipooluse ühik 15
— murdumisnäitaja 315
— mõõtühikute süsteem 9
— niiskus 164
— viga 27
absoluutse vea ülemmäär 27
absorptsioonitegur 336
adiabaatiline oleku muutus 151
aja mõõtmine 70
ajateenistus 72
aku 176
— Edisoni 176
— leelis- 176
— raudnikkel- 176
— tina- 176
alkoholomeeter 101
Alluard'i hügromeeter 166
amper 20
amperkeerd 22
amplituud 121
analüsaator 320
analüütilised kaalud 76, 80
analüütiliste kaalude teooria 80
anioon 209
anood 209
antihalo-plaadid 344
apertuurarv 307
areomeeter 100
arhiivkilogramm 96
aritmeetiline keskmine 33
arvutamise täpsus 37
aukjuhtivus 264
aurustumissoojus 149
autotrafo 182

B

baar 12
baromeeter 104
Baumé skaala 100
bell 14
Bernoulli seadus 116
Besseli meetod 301
— toetus 64
Borda meetod 94
Boyle-Mariotte'i seadus 151
Brewsteri seadus 319
Bunseni fotomeeter 281

C

Callendari riist 154, 156
candela 16
cgs-süsteem 11
Clément-Desormes'i meetod 151

D

Danielli elemendi emj määramine 210
Danielli element 175, 211
dekaluumen 279
desensibiliseerimine 347
difraktsioon 324
difraktsioonispekter 325
difraktsioonivõre 324
— konstant 324
dimensioon 25
diood 246, 248, 263
dispersioon 33, 318
— eri- 318
— keskmine 318
— relatiivne 318
dispersioonikõver 332
düün 12
džaul 20

E

ebafookus 300
ebatakistus 238
ebatavaline kiir 320
ebatulipunkt 300
Edisoni aku 176

eeltakisti 186
ekvivalent, elektrokeemiline 209, 211
— keemiline 211
elastne deformatsioon 118
elastsuskoefitsient 118
elastsusmoodul 118
elastsusmooduli määramine 118, 136
elavhõbetermomeeter 140
elektrihulk 14, 20
elektriline fotomeeter 338
— induktsioon 14, 21
— induktsioonivoog 14
elektrimahtuvus 15, 21
elektrivälja tugevus 14, 21
elektrodünaamiline mõõteriist 185
elektrokeemiline ekvivalent 209, 211
elektrokeemilise ekvivalendi määramine 208
elektrolüüdi erijuhtivuse määramine 197
elektromagnetiline mõõteriist 184
— ühikute süsteem 11
elektromotoorne jõud 15
elektromotoorsete jõudude võrdlemine 200
elektronkahur 257
elektronkiiretoru 256
elektronoptiline lääts 257
elektronostsillograaf (elektronkiire-ostsillograaf) 73, 256
elektrontoru 246
— sisetakistus 249
elektrooniline jagaja 274
— juhtivus 264
elektrostaatiline ühikute süsteem 11
element, Danielli 175, 211
— Leclanché 173
— Westoni normaal- 175
emissioonvool 249
emulsiooni «laius» 344
Engleri viskosimeeter 115
erg 12
eridispersioon 318
erijuhtivus 197
erikaal 13, 97
erikaalu määramine 64
eripöörang 321
erisoojus 143
erisoojuse määramine 143
erisoojuste suhte c_p/c_v määramine 151
eritakistus 21, 197

F

faasinihe 127, 235
farad 21
Faraday arv 211
— I elektrolüüsiseadus 209
— II elektrolüüsiseadus 211
fookus 300
fotoaparaat 343
fotografeerimine 342
fotomeeter, Bunseni 281
— elektriline 338
— Lummer-Brodhuni 283
fotopimik 348
fotoplaadi gradatsioonikõver 338, 344
— kontrastsus 345
— tundlikkus 345
fotoplaat 343
fototakisti 289
fott 16, 280
Fraunhoferi jooned 330
füüsikaline pendel 121

G

gaaslahendusloendaja 270
— platoo 273
galvanomeetri pingetundlikkus 223
— voolukonstant 223
— voolutundlikkus 223
gamma-kiired 271
gauss 16
Gaussi meetod 94
Geiger-Mülleri loendaja 271
gilbert 16
gon 50
goniomeeter 309
gradatsioonikõver 338, 344
gramm 11

H

halo 344
hammaspinge 258
— generaator 259
heledus 16, 280
heli energia tihedus 14
henri 22
herts 13
Hooke'i seadus 118
Huygensi printsiip 324
hõõglambi tunnuskõver 226
— valgusvälja mõõtmine 294
hääle kiirus 136
hügromeeter, Alluard'i 166
— juus- 166
hüpersensibiliseerijate retsepte 351

I

ilmutamine 346
ilmutavad (taandavad) ained 346
ilmuti retsepte 349
immersioonivedelik 307
impulsimoment 13
impulss 12
induktiivsus 15, 22
induktiivtakistus 238
induktor, kõrgepinge- 339

inertsimoment 13, 132
intensiivsus 14
interferomeeter 61
— kontakt- 61
interpolatsioon 40
interpolatsioonivahendid 140
ioontoru 334
isotermiline oleku muutus 151

J

joonkiirendus 12, 19
joonkiirus 12, 19
joonpaisumiskoefitsiendi määramine 141
joonspekter 330
Joule-Lenz'i seadus 204
juhtivus, auk- 264
— elektrooniline 264
juhtivusvool 208
juhuslike vigade normaalne jaotusseadus 33
juhuslikud vead 31
juushügromeeter 166

K

kaabliking 189
kaalude tundlikkus 81, 84
— tundlikkuse määramine 84
— — piir 82
kahekordse kaalumise meetod 94
kaldemiinimum 313
kallutuspinge 257
kalor 14
kastepunkt 164
katetomeeter 64
katioon 209
katood 209
keemiline ekvivalent 211
keerdjäikus 125, 131
kellad, kvarts- 71
— pendel- 71
keskmine, aritmeetiline 33
— dispersioon 318
— viga 34
— võimsus 236
kiir, ebatavaline 320
— tavaline 320
kiirgusenergia tihedus, spektraalne 17
kiirgusvõime, kogu 17
— spektraalne 16
kilogramm 19, 96
kilogrammi etaloon 87
kilogramm-meeter 23
kilogramm-tung 22
kilopond 22, 24
kilopondmeeter 23
kinemaatiline viskoossus 108
kinnitamine 347
kinniti retsepte 351
kogu kiirgusvõime 17
Kohlrauschi sild 198
kollimaator 310, 331
kolorimeeter 298
komparaator 60
— longitudinaal- 60
— transversaal- 61
kompensaator 202
kompensatsioonimeetod 200
kondensaatorite mahtuvuse määramine 241
konstantsed temperatuuripunktid 139
kontaktinterferomeeter 61
kontsentratsioon 297
konvektsioonvool 208
kraad 14
kriitiline režiim 222
— takistus 222
kristalli optiline telg 320
kromaatiline aberratsioon 302
kronoskoop 73
kruvimikromeeter 54
kulon 20
kulonomeeter (voltameeter) 209, 216
Kundti toru 134
kuumkatoodiga kõrgvaakuumtoru 334
kvandi energia 334
kvartskellad 71
kõrgepingeinduktor 339
küllastusdefitsiit (-vajak) 165

L

lahutusvõime 308
lainemõõtja 74
Laplace'i võrrand 192
latentne pilt 342
lati läbipaindumine 63
Leclanché element 173
leelisaku 176
liiter 96
lineaarne interpolatsioon 40
logaritmiline dekrement 126
longitudinaalkomparaator 60
luks 16, 280
luksmeeter 287
Lummer-Brodhuni fotomeeter 283
luumen 16, 279
lääts, elektronoptiline 257
— sfääriline 300
läätse optiline telg 300
lükatreostaat 178

M

magnetiline induktsioon 16, 21
— šunt 222
magnetipoolus 15
magnetivoog 16, 21

magnetivälja tugevus 16, 22
magnetomotoorne jõud 16, 22
mahtuvuslik takistus 238
mahtuvuste magasin 243
mahukaal 97
massabsorptsioonitegur 337
masside mõõtmine 74
massiühik, tehniline 23
matemaatiline pendel 121
meeter 19
meetod, Besseli 301
— Borda 94
— Clément-Desormes'i 151
— Gaussi 94
— kahekordse kaalumise 94
— Mendelejevi 95
— tareerimise 94
Mendelejev-Clapeyroni seadus 139
mikromeeter 54
mikroskoop 305
millimikron 333
minimeeter 58
mkGs-(mkps-)süsteem 22
mks-süsteem 19
Mohri kaalud 101
moodul, nihke- 130
— Youngi 118
murdumisnäitaja, absoluutne 315
— suhteline 315
mõõteriist, elektrodünaamiline 185
— elektromagnetiline 184
— pehmeraud- 184
— pöördpool- 183
mõõteriistad, mitme piirkonnaga 186
mõõtkruvi 59
mõõtmine 8
mõõtühik 8
mõõtühiku tähis 24

N

negatiiv 343
Newtoni rõngad 327
nihkemoodul 130
nihkepinge 129
nihkkaliiber 52
niiskus, absoluutne 164
— suhteline 164
nikol 320
nitt 280
njuuton 20
noonius 47
normaalspekter 325
n-tüüpi pooljuhid 264
nurga mõõtmine 49
nurk 13
nurkkiirus 13
nurksagedus 13
näivtakistus 238
näivvõimsus 237

O

objektiiv 303, 305, 343
oktaalpesa 247
okulaar 303, 305
okulaarmikromeeter 61
oleku muutus, adiabaatiline 151
— — isotermiline 151
omanurksagedus 126
ongström 333
oom 21
optiline prisma 312
— püromeeter 140
— telg, kristalli 320
— — läätse 300
optiliselt aktiivsed ained 321
— hõredam keskkond 315
— tihedam keskkond 315
optimeeter 59
ostsillograaf 73, 256
ostsillograafi tundlikkus 262
otsevaate-prismaspektroskoop 331

P

parallaktiline viga 47
parkija retsepte 350, 351
patarei 177
peegelgalvanomeetri šunt 266
peegelskaala 47
pehmeraudmõõteriist 184
pendel, füüsikaline 121
— matemaatiline 121
pendelkellad 71
pentood 246
pidev spekter 330
pikksilm 303
pikkuste mõõtmine 46
pindpinevus 168
pindpinevuskoefitsient 168
pinge 15, 20
pingestabilisaator 187
pinnavalgustus 16, 280
pistik 189
plaatina—plaatina-roodiumi termoelement 140
Plancki konstant 334
p—n üleminek 264
Pohli riist 124
Poiseuille' valem 110
polarimeeter 320
— poolvarju- 322
polariseeritud valgus 319
pond 24
pooljuhid, n-tüüpi 264
— p-tüüpi 264
pooljuhtdiood 263
poolvarju-polarimeeter 322
positiiv 343
potentsiaal 15, 20
potentsiomeetriline lülitus 179

Prandtli toru 116
prismaspektroskoop 331
psühromeeter 165
p-tüüpi pooljuhid 264
puaas 107
põhisuurused 8
põhiühikud 9
pöördpoolgalvanomeetri karakteristikute määramine 218
pöördpoolmõõteriist 183
pöörlemishulk 13
pöörleva silindriga viskosimeeter 112
püdelus 106

R

radiaan 13
radiomeeter 272
— Б-2 274
rahvusvaheline küünal 16, 279
— temperatuuriskaala 139
ratsionaliseeritud absoluutne praktiliste mõõtühikute süsteem 18
ratsur 85
raudnikkelaku 176
reaktsioonisoojus 212
reduktsioonitegur 85
refraktomeeter, Abbe 316
relatiivne dispersioon 318
— viga 30
reostaat 178
resonants 127
ribaspekter 330
ruumala 96
ruuminurk 13
ruutkeskmine viga 34
röntgen (r-ühik) 336
röntgenikiired 333
röntgenikiirte bioloogiline toime 335
röntgenitoru 334
rõhk 12

S

sagedus 13
sageduse mõõtmine 73
sahharimeeter 322
— Soleil' 323
samapotensiaalipinnad 191
Schumanni plaadid 345
Schwarzschildi seos 344
seadus, Bernoulli 116
— Boyle-Mariotte'i 151
— Brewsteri 319
— Hooke'i 118
— Joule-Lenz'i 204
— Mendelejev-Clapeyroni 139
segamismeetod 143
seisvad lained 135
sekund 11, 19
sensibiliseerimine 343
sentimeeter 11, 15
sfäromeeter 56
sfääriline aberratsioon 301
— lääts 300
silmusostsillograaf 73
sisehõõrdumine 106
sisehõõrdumiskoefitsient 107
solarisatsioonipiirkond 344
Soleil' sahharimeeter 323
soojuse mehaaniline ekvivalent 153
soojushulk 14
soojusjuhtivuse mõõtmine 160
spekter 330
spektraalanalüüs 330
spektraalaparaat 309
spektraalne kiirgusenergia tihedus 17
— kiirgusvõime 16
spektraaltoru 332
spektromeeter (goniomeeter) 309
spektroskoop 309, 331
standard 34
standardraskuskiirendus 76
sterradiaan 13
stilb 16, 280
Stokes'i valem 109
suhteline kaal 96
— murdumisnäitaja 315
— niiskus 164
— viga 30
sumbuvussuhe 126
sundvõnkumise diferentsiaalvõrrand 125
sundvõnkumiste uurimine 124
säritus 345
süstemaatilised vead 31

Š

šunt 186
— magnetiline 221
— peegelgalvanomeetri 266

T

taandamistegur 85
takistus 15, 21
— iduktiiv- 238
— mahtuvuslik 238
takistuse mõõtmine 194
takistusmagasin 179
takistusmahtuvus 198
takistustermomeeter 140
tangensgalvanomeeter 214
tareerimise meetod 94
tavaline kiir 320
tegevtakistus 238
tehniline massiühik 23
— süsteem 22
teleskoop 303
temperatuur 138

temperatuuri mõõtmine termoelemendiga 157
— parameetrid 138
termistor 277
termoelektriline efekt 228
termoelemendi kaliibrimine 227
termoelement 228, 233
— plaatina—plaatina-roodiumi 140
termoemissioon 246
termopaar 228
termopaari elektromotoorne jõud 228
tetrood 246
tihedus 12, 97
tinaaku 176
tolerants 58
transformaator 180, 244
transformaatori kasutegur 245
— ülekandearv 244
transversaalkomparaator 61
triood 247, 251
trioodi läbitavus 253
— sisetakistus 253
— tõus 252
— võimendustegur 253
tuhmus 337
tulipunkt 300
tung 12, 20
tungimoment 13
täisvõnge 121
täpsuse mõõt 34
täpsusmõõteriistad 58
tõelise kaalu arvutamine 91
tõenäone viga 35
tõenäoseim väärtus 32
tõkkekiht 264
tõkkekiht-fotoelement 285, 287
tõukeionisatsioon 272
töö 12

U

universaalsed konstandid 9
uuskraad 50

V

vaatlusprotokoll 45
vahelduvvool 235
valgus, polariseeritud 319
valgusallika tugevus 16
valgusjõud 343
valgustara 344
valgusvoog 16, 279
valjus 14
varbsirkel 52
vatt 20
vattmeeter 185
vead, juhuslikud 31
— süstemaatilised 31
veeber 21
vesiväärtus 144
viga, absoluutne 27
— keskmine 34
— parallaktiline 47
— relatiivne (suhteline) 30
— ruutkeskmine 34
— tõenäone 35
vigade levimine arvutamisel 38
vihid 87
viskosimeeter, Engleri 115
— pöörleva silindriga 112
viskoossus 106
— kinemaatiline 108
volt 20
voltameeter 209, 216
võimsus 12
võrespektroskoop 331
võrevool 252
väntreostaat 178

W

Westoni normaalelement 175
Wheatstone'i silla skeem 190, 195

Ö

örsted 16

Ü

ülesummutatud režiim 222

Y

Youngi moodul 118

SISUKORD *

Eessõna 3

I. ÜLDOSA

1. Sissejuhatus — *G. M.* 5
2. Mõõtmine ja mõõtühikute süsteemid — *G. M.* 8
3. Absoluutse mõõtühikute süsteemi ülesehitus — *G. M.* 9
4. Praktiliste mõõtühikute süsteemi «rahvusvahelised» ja absoluutsed mõõtühikud ja etaloonid — *G. M* 17
5. Absoluutne praktiliste mõõtühikute süsteem (mks-süsteem) — *G. M.* 19
6. Ratsionaliseeritud absoluutse praktiliste mõõtühikute süsteemi (mksA-süsteemi) elektriliste ja magnetiliste ühikute definitsioonid ja vahekorrad ratsionaliseerimata süsteemide (cgsm- ja cgse-süsteemi) ühikutega — *G. M.* 20
7. Tehniline ehk mkGs-(mkps-)süsteem — *G. M.* 22
8. Mõõtühikute nimetused ning tähised ja füüsikaliste suuruste dimensioonid — *J. L.* 24
9. Arv mõõtmise või loendamise tulemusena — *J. L.* 26
10. Mõõtmistulemuse absoluutne viga — *J. L.* 27
11. Arvude ümardamine — *J. L.* 28
12. Mõõtmise täpsus ja relatiivne viga — *J. L.* 29
13. Vaatlusvigade liigitus — *G. M.* 31
14. Vigade teooriast — *G. M.* ja *J. L.* 32
15. Arvutamise täpsus — *J. L.* 37
16. Vigade levimine arvutamisel — *J. L.* 38
17. Interpolatsioon — *J. L.* 40
18. Võtteid arvutamise lihtsustamiseks — *J. L.* 41
19. Tulemuse vea arvutamine üldisel juhul — *G. M.* 42
20. Üldisi juhiseid ja nõuandeid tööde sooritamiseks — *G. M.* 44

II. MEHAANIKA

21. Pikkuse mõõtmine — *J. L.* 46
22. Parallaktiline viga — *J. L.* 47
23. Noonius — *J. L.* 47
24. Nurga mõõtmine — *J. L.* ja *A. P.* 49
25. Mõõtmisi varbsirkliga — *J. L.* 52
26. Mõõtmisi mikromeetriga — *J. L.* 54
27. Sfäromeeter — *A. P.* ja *G. M.* 55
28. Täpsusmõõteriistad — *G. M.* 58
29. Pikkuste mõõtmisel esinevad süstemaatilised vead — *G. M.* 63
30. Katetomeeter. Vedeliku erikaalu määramine U-torus — *G. M.* ja *A. P.* 64
31. Aja mõõtmine — *G. M.* 70

* Iga paragrahvi pealkirja järele on märgitud selle koostaja või koostajate nimetähed.

32. Pendelkellad — *G. M.* 71
33. Kvartskellad — *G. M.* 71
34. Ajateenistus — *G. M.* 72
35. Aja mõõtmine konkreetsetel juhtudel — *G. M.* 72
36. Sageduse mõõtmine — *G. M.* 73
37. Masside mõõtmine — *G. M.* 74
38. Analüütilised kaalud ja nende nulltäpi määramine — *J. L.* 75
39. Analüütiliste kaalude teooriast ja täpsusest — *G. M.* 80
40. Kaalude tundlikkuse ja kerge keha kaalu määramine — *J. L.* 84
41. Keha tõelise kaalu määramine — *J. L.* ja *G. M.* 87
42. Ruumala, tihedus, suhteline kaal, erikaal ja mahukaal — *G. M.* . . . 96
43. Tahke keha erikaalu määramine — *J. L.* 98
44. Vedeliku erikaalu määramine areomeetri ja Mohri kaaludega — *A. P.* ja *J. L.* 100
45. Õhurõhu mõõtmine baromeetri abil — *J. L.* 104
46. Sisehõõrdumine — *J. L.* 106
47. Vedeliku sisehõõrdumiskoefitsiendi määramine Stokes'i meetodil — *J. L.* 108
48. Vedeliku sisehõõrdumiskoefitsiendi määramine Poiseuille' meetodil — *J. L.* 110
49. Pöörleva silindriga viskosimeeter — *G. M.* 112
50. Tuule kiiruse määramine Prandtli toruga — *A. P.* 115
51. Traadi elastsusmooduli määramine venitusest — *A. P.* 117
52. Matemaatilise pendli võnkumisseaduste kontrollimine ja raskuskiirenduse määramine — *J. L.* 120
53. Sundvõnkumiste uurimine Pohli riistaga — *A. P.* 124
54. Nihkemooduli määramine võnkumisest — *A. P.* ja *G. M.* 129
55. Kundti toru — *A. P.* 134

III. MOLEKULAARNÄHTUSED. SOOJUS

56. Temperatuuri mõõtmine — *G. M.* 138
57. Joonpaisumiskoefitsiendi määramine Fuessi järgi — *J. L.* 141
58. Tahke keha erisoojuse määramine — *J. L.* 143
59. Auru tiheduse määramine Viktor Meyeri järgi — *A. P.* 146
60. Vee aurustumissoojuse määramine — *A. P.* 148
61. c_p ja c_v suhte määramine Clément-Desormes'i järgi — *A. P.* 151
62. Soojuse mehaanilise ekvivalendi määramine — *J. L.* ja *G. M.* 153
63. Halbade soojusjuhtide soojusjuhtivuse mõõtmine — *G. M.* ja *A. P.* . 160
64. Absoluutse ja suhtelise niiskuse määramine psühromeetri ja hügromeetri abil — *J. L.* 164
65. Vee pindpinevuskoefitsiendi määramine — *J. L.* 168
66. Vedelike pindpinevuskoefitsientide võrdlemine tilgameetodil — *J. L.* . 170

IV. ELEKTER

67. Üldmärkusi — *A. P.* 173
68. Voolualikad — *A. P.* 173
69. Reostaadid ja takistusmagasinid — *A. P.* 178
70. Transformaatorid — *A. P.* 180
71. Mõõteriistad — *A. P.* 183
72. Stabiilse pinge ja voolu saamine — *A. P.* 187
73. Ühenduste tegemine — *A. P.* 187
74. Elektrivälja uurimine elektrolüüdivanni meetodil — *A. P.* 191
75. Juhtme takistuse mõõtmine Wheatstone'i silla abil — *J. L.* 194
76. Elektrolüüdi erijuhtivuse määramine — *A. P.* 197
77. Elektromotoorsete jõudude võrdlemine kompensatsioonimeetodil — *J. L.* 200
78. Joule-Lenz'i soojusvalemi koefitsiendi määramine — *J. L.* 204

79. Elektrienergia hulga ja kasuteguri määramine — *J. L.* 206
80. Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine — *J. L.* 208
81. Danielli elemendi elektromotoorse jõu määramine — *G. M.* 210
82. Tangensgalvanomeetri taandusteguri määramine — *G. M.* 214
83. Pöördpoolgalvanomeetri karakteristikute määramine — *A. P.* . . . 218
84. Hõõglambi tunnusköövera määramine — *A. P.* 225
85. Termoelemendi kaliibrimine — *G. M.* 227
86. Termoelemendi võrdlemine termomeetriga — *A. P.* 233
87. Vahelduvvoolu iseloomustavate suuruste mõõtmine — *A. P.* 234
88. Kondensaatorite mahtuvuse määramine sillameetodil — *A. P.* . . . 241
89. Transformaatori ülekandearvu ja kasuteguri määramine — *A. P.* . . 243
90. Elektrontoru — *A. P.* 246
91. Dioodi omaduste uurimine — *A. P.* 248
92. Trioodi omaduste uurimine — *A. P.* 251
93. Töid elektronostsillograafiga — *A. P.* 256
94. Pooljuhtdioodi karakteristikute määramine — *G. M.* 263
95. Gaaslahendusloendaja karakteristiku määramine — *A. P.* 270
96. Termistori takistuse määramine — *G. M.* 277

V. VALGUS

97. Valgusallikate valgustugevuse võrdlemine fotomeetri abil — *J. L.* ja *G. M.* 279
98. Fotoelemendi kaliibrimine ja pinnavalgustuse mõõtmine — *A. P.* . . 285
99. Tõkkekiht-fotoelemendi karakteristikute määramine — *G. M.* 287
100. Fototakisti karakteristikute määramine — *G. M.* 289
101. Hõõglambi valgusvälja mõõtmine — *G. M.* 294
102. Lahuste kontsentratsioonide võrdlemine kolorimeetri abil — *J. L.* . . 297
103. Läätse fookuse kauguse määramine — *J. L.* ja *A. P.* 299
104. Pikksilma suurenduse määramine — *J. L.* 303
105. Mikroskoobi suurenduse, apertuurarvu ja lahutusvõime määramine — *J. L.* ja *A. P.* 304
106. Prisma murdva nurga mõõtmine — *J. L.* 309
107. Klaasi murdumisnäitaja määramine — *J. L.* 312
108. Vedeliku murdumisnäitaja määramine Abbe refraktomeetri abil — *J. L.* ja *A. P.* 315
109. Suhkrulahuse eripöörangu määramine sahharimeetriga — *J. L.* ja *A. P.* 318
110. Valguse lainepikkuse määramine difraktsioonivõrega — *A. P.* 324
111. Newtoni rõngaste uurimine — *A. P.* 326
112. Spektraalanalüüs ja spektroskoobi astmiku kaliibrimine — *A. P.* ja *J. L.* 330
113. Röntgenikiirte efektiivse lainepikkuse määramine massabsorptsiooniteguri määramise teel — *G. M.* 333
114. Fotografeerimine — *G. M.* 342

VI. TABELID

1. Tihedusi 353
2. Vee tihedus temperatuurivahemikus 0—25° C 353
3. Pindpinevus- ja sisehõõrdumiskoefitsiente 354
4. Elastsusmooduleid 354
5. Hääle levimiskiirusi 354
6. Soojuslikke konstante 355
7. Küllastatud veeauru rõhk ja absoluutne niiskus temperatuuride vahemikus —10—30° C 356
8. Murdumisnäitajaid 356
9. Fraunhoferi joonte lainepikkusi 357
10. Spektrijoonte lainepikkusi dispersioonikõverate määramiseks 357
11. Metallide eritakistusi 358
12. Elektrolüütide erijuhtivusi 358

13. Elektrokeemilisi ekvivalente 358
14. Metallide termopingeid Pt suhtes 358
15. Trigonomeetriliste funktsioonide väärtused 359
16. Arvude 1—100 astmed, juured ja logaritmid 361

VII. LISAD

1. Kümnendsüsteemi mõõtühikute tuletamine 362
2. Kreeka tähestik 363
3. Mõõtühikute süsteemide võrdlustabel 364
4. Elektriliste lülituste sümbolid 365
5. Üldisi füüsikalisi konstante ja arve 366
6. Mitmesuguseid ühikuid 368
7. Küsimusi endakontrolliks 369
8. TRÜ üldise füüsika kateedri üldpraktikumis töötamise kord 370

Põhiliste mõistete register 373

Ланг Юхан Якобович, Метс Георг Александрович,
Паэ Александер Янович

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

На эстонском языке

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja R. Toming
Tehniline toimetaja A. Pill
Korrektorid M. Amon ja S. Aron

Ladumisele antud 24. VII 1960. Trükkimisele antud 26. X 1960. Paber 60 × 92, 1/16. Trükipoognaid 24,0. Arvutuspoognaid 24,29. Trükiarv 3000. MB-06584. Tellimise nr. 7086. Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind rbl. 8.30 (83 kop.)

2—3

Rbl. 8.30
1961. a. — 83 kop