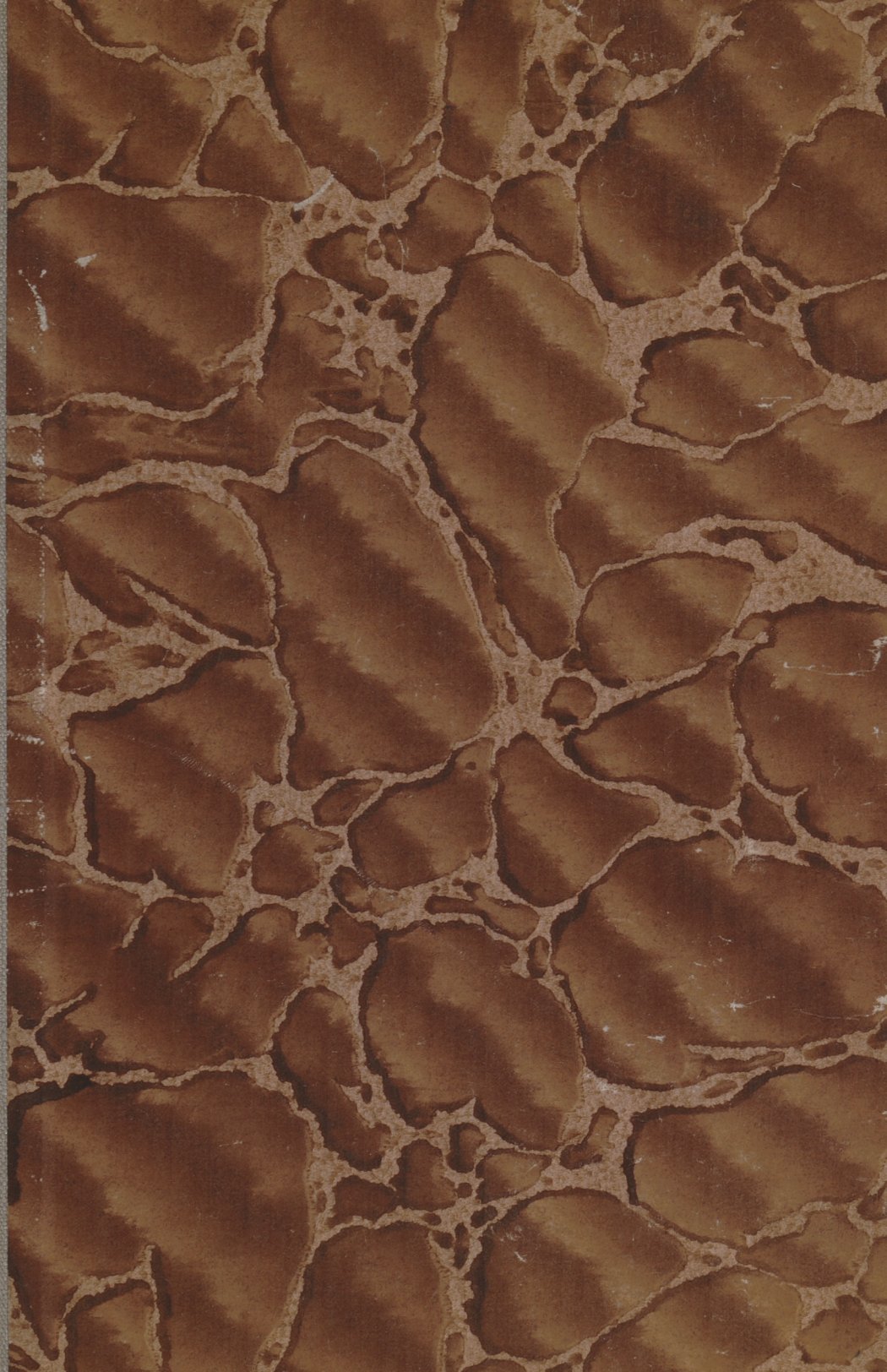




INS. J. IVAND



AEROMEHAANIKA

I

STAATILINE ÕHKKOND

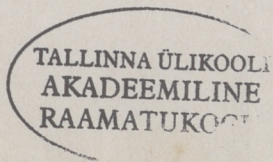
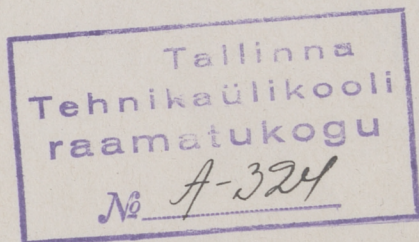
Handwritten in red ink, crossed out with a red diagonal line:
Korporatsioon Rotale
Ins. J. Ivand
Rat. Vii!

E 16217.

AUTORI KIRJASTUS
TALLINN, 1937

Trükikoda J. Roosileht & Ko Tallinnas, Lühike jalg 4, 1937

49
3615



Eessõna.

Aerotehnika alal puudub eestikeelne kirjandus peagu täielikult. Selle puuduse vähendamiseks kavatsen välja anda aerotehnilisi küsimusi käsitleva sarja „Aeromehaanika“, mille esimeseks vihukuks ja sissejuhatavaks osaks ongi käesolev raamat, „Staatiline õhkkond“. Selles on käsitletud õhkkonda, gaaside termodünaamikat, aeromeetriat, termomeetriat, baromeetriat, hügroomeetriat ja hüpsomeetriat selles ulatuses, mis tarvilik sellele vihule järgnevate raamatute selgeks mõistmiseks ja aerotehniliste küsimuste teadlikuks lahendamiseks. Sellega on ühtlasi välditud ka vajadus igas vastavas vihus anda vahe-märkustena või joonealustena seletusi küsimuste puhul, mis eeldavad eespool mainitud teadusharude üldist tundmist. Peale selle on siin käsitletud veel õhurõhumise mõjul töötavat kõrgusemõõteriista — altimeetrit kui lennuki tähtsaimat näitamisabinõu, mis oma töötamise printsiibilt sobivalt mahub käesoleva vihu raamidesse.

Pean meeldivaks võimaluseks avaldada siinkohal tänu väärtuslike nõuannete eest Tartu Ülikooli Meteoroloogia-observatooriumi inspektorile dr. phil. nat. Aarne Kärсна'le ja keeleteadlasele Elmar Muugile.

Järgmise vihuna ilmub „Aerodünaamika põhilaused ja kandepindade teooria“.

Ins. J. Ivand.

Tallinnas, 11. 7. 1937.

Tarvitatud kirjandust.

Курс физики. О. Д. Хвольсон.

Thermodynamik der Atmosphäre. Dr. A. Wegener.

Основы метеорологии Проф. В. Н. Оболонский.

Physics of the Air. W. J. Humphreys.

Handbuch der Vermessungskunde. O. Eggert.

Standard Atmosphere. Tables and Data. Walter S. Diehl.

Handbook of Aeronautics. Volume I.

Pressure Element of constant logarithmic stiffness for temperature compensated altimeter. W. G. Brombacher and F. Cordero.

Труды всесоюзной конференции по изучению стратосферы. 31 марта — 6 апреля 1934 г.

Hydro- und Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl von Dr. phil. O. Tietjens.

Saateks.

Liiklemisele maal ja merel on käesoleva sajandi algul seltsinud liiklemine õhus.

Vähem kui 20 aastaga on maailma kontinendid kattunud tiheda lennuliinide võrguga ning kõige lähemas tulevikus on oodata korrapärase lennuühenduste loomist üle ookeanide.

Kaubandusliku lennuasjanduse kõrval liiklemine õhus lennuvägede näol on pannud aluse uuele võimsale relvaliigile, mille osatähtsus riikide kaitsejõududes on kujunenud esmajärguliseks.

Lennuasjanduse kiire areng esitab kõigile haritud kodanikele, vanadele ja noortele, vajaduse tunda lennukite ja õhulaevade liiklemise keskkonna, s. o. õhkkonna iseärasusi ning põhiomadusi.

Insener IVAND'i raamat „Aeromehaanika I — Staatiline õhkkond“ on esimene eestikeelne teos, milles õhkkonda üksikasjaliselt käsitletakse. Õhkkonna omadused, nende omaduste kvantitatiivse määramise põhimõtted ja abinõud, mõõtmistel esinevad vead ning tarvilikud korrektuurid on kirjeldataud autori varematest töödest tuntud põhjalikkusega. Pealiskaudne lugeja leiab raamatust õhkkonna iseärasuste kohta küllaldase üldpildi. Eriteadlastele annab raamat üksikasjalisi andmeid õhkkonnaga seoses olevate küsimuste uurimiseks ning praktiliseks lahendamiseks.

Õhkkonna tundmaõppimise vahendina võib käesolevat raamatut soovitada üliõpilastele, sõjaväe- ja eralendureile, sõjaväeliste õppeasutiste kasvandikele, kesk- ja kutsekoolide vanematele õpilastele ning üldiselt kogu meie haritlaskonnale.

V. Post.

Lennuasjanduse insener.

Saateks.

Insener Ivand'i raamat „Aeromehaanika I — Staatiline õhkkond“ on esimene sellelaadiline teos eesti kirjanduses — ja õnnestunud teos.

Senini oli insener Ivand tuntud hea eriteadlasena autoasjanduse alal, käesoleva raamatuga on ta end näidanud ka põhjaliku asjatundjana õhkkonda käsitlevais eriküsimusis.

Käesolev raamat on parimaid ja ülevaatlikumaid sel alal ja seda võib otsekoheselt soovitada asjast huvitatutele, kuna see võimaldab lennuasjanduses tegutsevail isikuil süvendada oma teadmisi lennujulgeoleku seisukohast nii tähtsal alal.

Käesolev raamat on ainulaadne teos, mis annab ulatusliku ülevaate staatilisest õhkkonnast ning on ühtlasi parimaks õpperaamatuks omal alal.

O. Org.

Lennuasjanduse inspektor.

Tähelepanud trükivead.

Lk.	Rida	On trükitud	Peab olema
14	7 ülalt	$\frac{Q}{Q_1} = \text{konst.}$	$\frac{Q_1}{Q} = \text{konst.}$
15	6 "	$\frac{T_1}{Q} = \frac{Q_1}{Q};$	$\frac{T_1}{T} = \frac{Q_1}{Q};$
40	4 "	vedeliktermomeetrite juures	termomeetrite juures
45	8 "	$= t_0 + k\tau - ka + ce^{-\frac{1}{a}\tau},$ kus $c = \frac{c'}{a}$	$= t_0 + k\tau - ka + c_2 e^{-\frac{1}{a}\tau},$ kus $c_2 = \frac{c'}{a}.$
51	9 "	$T_0 - \frac{\delta z}{2}$	$T_0 - \frac{\delta z_1}{2}$
53	4 alt	$z' = z_n : \frac{n}{2}$	$z'_1 = z_n : \frac{n}{2}$
66	20 ülalt	$g = 9,80665 \cdot 1,0012 =$ $= 9,818850 \text{ m/sek}^2$	$g = 9,80665 \cdot 1,00124 =$ $= 9,818810 \text{ m/sek}^2$
104	8 "	$\frac{p}{R_0 T}$	$\frac{p}{R_0 T}$
114	7 alt	$\frac{B}{b} = e^{-\frac{z}{7981(1+0,003663t_k)(1+0,378E)}}$	$\frac{b}{B} = e^{-\frac{z}{7981(1+0,003663t_k)(1+0,378E)}}$

Õhkkonna ulatus ja koosseis.

Maakera, nagu teada, on ümbritsetud õhukihiga, mida nimetatakse õhkkonnaks ehk atmosfääriks. Õhkkonda moodustav õhk on gaaside mehaaniline segu ja koosneb peamiselt lämmastikust, hapnikust, argonist, veeaurust, süsihappegaasist, vesinikust ja heeliumist. Peale selle leidub õhus veel õige väikesel määral neooni, ksenooni, krüptooni, ammoniaaki ja peale viimase veel muid lämmastikuühendeid. Ka hõljub õhkkonnas, eriti madalais kihtides, mitmesuguse päritoluga väga peent tolmu, mis oma hügroskoopsuse ja keemiliste ning elektriliste omaduste tõttu paneb aluse õhus leiduvate veeaurude kondenseerumisele hüdrometeorideks, moodustades udu, pilvituse jne.

Õhu koosseis mahuliselt maapinna-lähedastes kihtides on:

Gaasi nimetus.		Mahuprotsent.	Molekulaarkaal (μ).
Lämmastik	N ₂	78,06	28,02
Hapnik	O ₂	20,90	32,00
Argon	Ar	0,937	39,9
Süsihappegaas	CO ₂	0,029 (muutlik)	44,0
Vesinik	H ₂	0,0033	2,02
Neoon	Ne	0,0015	20,0
Heelium	He	0,0005	4,0
Krüptoon	Kr	~0,0001	83,0
Ksenoon	X	~0,000005	130,7
Veeaur	H ₂ O	muutlik	18,02
Osoon	O ₃	jäljed	48,0

Õhkkonda moodustavate gaaside raskusi omavahel võrreldes ¹⁾ leiame, et lämmastik on 14, hapnik 16, argon 20, süsihappegaas 22 korda jne. raskemad kui vesinik. Kui võtta arvesse, et raskemate gaaside rõhumine kõrguse tõusul langeb kergete gaaside rõhumisest kiiremini, siis peame üldiselt järeldama, et õhkkonda moodustavad gaasid peavad kõrgussihis asetsema

¹⁾ Gaaside erikaalud võrdse rõhu ja temperatuuri puhul suhtuvad üksteisesse nagu nende molekulaarkaalud, s. o.

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$$

kus γ_1 ja γ_2 on gaasi erikaalud ning μ_1 ja μ_2 gaasi molekulaarkaalud.

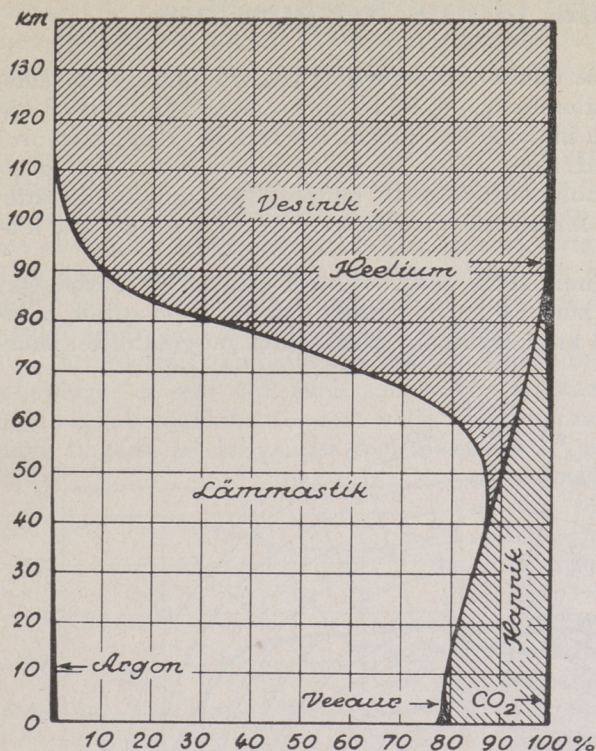
oma raskuste järjekorras, s. o. rasked gaasid maapinna lähedal ja kerged gaasid ülemistes kihtides. Õhu analüüsid aga näitavad, et õhu koosseis kuni 11 km kõrguseni, milleni senini seda koosseisu on küllalt täpselt uuritud, on muutumatu. See nähtus on seletatav selle kõrguseni teotsevate õhu püst- ja horisontaalvooludega, millede mõjul õhkkonda moodustavad gaasid alaliselt segunevad. Suurel määral aitab õhu segunemisele kaasa ka õhus hõljuv tolm, jääkristallid jne., sest need kehakesed soojenevad päikese kiirtest ja soojendavad omakorda endi ümber asetsevat õhku, mille tiheduse muutumisel teki- vad turbulentsed liikumised ja püstvoolud.

Viimasel ajal tuntud inglise füüsiku Ramsay poolt tehtud õhuanalüüs, milleks õhu proov oli võetud 14 km kõrguselt, samuti ka 1933. a. venelaste stratostaadiga 18 km kõrguselt võetud õhuproovi analüüs näitasid, et nendel kõrgustel õhu koosseis on üldiselt samane õhu koosseisuga 11 km kõrguseni. Neist analüüsides võiks järeldada, et vähemalt 18 kuni 20 km kõrguseni on õhu koosseis ühtlane, sest selle kõrguseni võiks seda nähtust seletada, nagu 11 km kõrgusenigi, õhu segunemisega. Nimelt teotsevad polaar- ja paras- vöös 11 km-st kõrgemal horisontaalsed õhuvoolud, mis nähtavasti ekvato- riaalvöös, kus kuni 18 km kõrguseni toimuvad õhu turbulentsed püstvoolud, lõikuvad nende püstvooludega. Seega peaks õhu segunemine esinema 18 kuni 20 km kõrguseni.

Õhu koosseisu suhtes 11 km kõrgemal ei ole senini siiski kindlat seisu- kohta võetud, sest paljud teadlased on arvamisel, et alates 11 km kõrguselt peaks kõrguse suurenemisega õhu koosseisus esinevate raskemate gaaside protsent üldiselt pidevalt vähenema ja kergemate gaaside protsent suure- nema, nagu seda võib jälgida tabelist 1, mis koostatud W. J. Humphreys'i poolt ja kus on antud vastavalt kõrgusele, 0 kuni 140 kilomeetrini, õhu koos- seis mahuprotsentides.

T a b e l 1. Õhu koosseis Humphreys'i järgi (W. J. Humphreys, Physic of the Air).

Kõrgus km	Õhk- konna rõhumine mm Hg	Õhu koosseis mahuprotsentides						
		Argon	Läm- mastik	Veeaur	Hapnik	Süsi- happe- gaas	Vesinik	Hee- lium
0	760	0,93	77,14	1,20	20,69	0,03	0,01	—
5	405	0,94	77,89	0,18	20,95	0,03	0,01	—
11	168,00	0,94	78,02	0,01	20,99	0,03	0,01	—
15	89,66	0,77	79,52	0,01	19,66	0,02	0,02	—
20	40,99	0,59	81,24	0,02	18,10	0,01	0,04	—
30	8,63	0,35	84,26	0,03	15,18	0,01	0,16	0,01
40	1,84	0,22	86,42	0,06	12,61	—	0,67	0,02
50	0,403	0,12	86,78	0,10	10,17	—	2,76	0,07
60	0,0935	0,03	81,22	0,15	7,69	—	10,68	0,23
70	0,0274	0,03	61,83	0,20	4,72	—	32,61	0,61
80	0,0123	—	32,18	0,17	1,85	—	64,70	1,10
90	0,0081	—	9,78	0,10	0,49	—	88,28	1,35
100	0,0067	—	2,95	0,05	0,11	—	95,58	1,31
110	0,0059	—	0,67	0,02	0,02	—	98,10	1,19
120	0,0052	—	0,19	—	—	—	98,74	1,07
130	0,0046	—	0,04	—	—	—	99,00	0,96
140	0,0040	—	0,01	—	—	—	99,15	0,84



Joon. 1.

hed, põhjavalgus jne. Võib oletada, et enne kui tehniliste abinõudega ei ole vallutatud suured kõrgused, ei saa neil kõrgustel valitsevaist olukordadest arvatavasti midagi kindlat öelda. On põhjust arvata, et sääraseks tehnilisteks abinõudeks osutuvad reaktsiooni-põhimõttel töötavad aparaadid, millede kallal praegusel ajal innuga töötatakse, et lahendada super-aerotehnilisi probleeme.

Samuti nagu umbkaudsed on andmed õhkkonna koosseisu kohta suurtes kõrgustes, on nad umbkaudsed ka õhkkonna ulatuse kohta. On väga tõenäone, et õhkkond üldse ei oma kindlat piiri, vaid kõrguse suurenemisega läheneb pidevalt tähtedevahelise maailmaruumi seisukorrale. Näiteks kui arvestada maakera pöörlemise tekitatud tsentrifugaaljõu mõju õhkkonnale ja maakera külgetõmbejõu vähenemist kõrgusega, võib õhkkonna teoreetiliselt piiriks arvata 42 200 km, s. o. maakera 6 raadiuse ulatust, sest sel kõrgusel õhusakesed kaotavad oma kaalu ja lendavad maailmaruumi laiali. Kaugus 42 200 km on maksev juhul, kui õhusakeste nurkkiirus maakera telje suhtes on võrdne maakera nurkkiirusega. Teada on aga, et kaugemad õhukihid pöörlevad aeglasemalt, seega võib õhkkonna teoreetiline piir ulatuda veelgi kaugemale, millist võimalust aga teiselt poolt piirab gaaside difusioon.

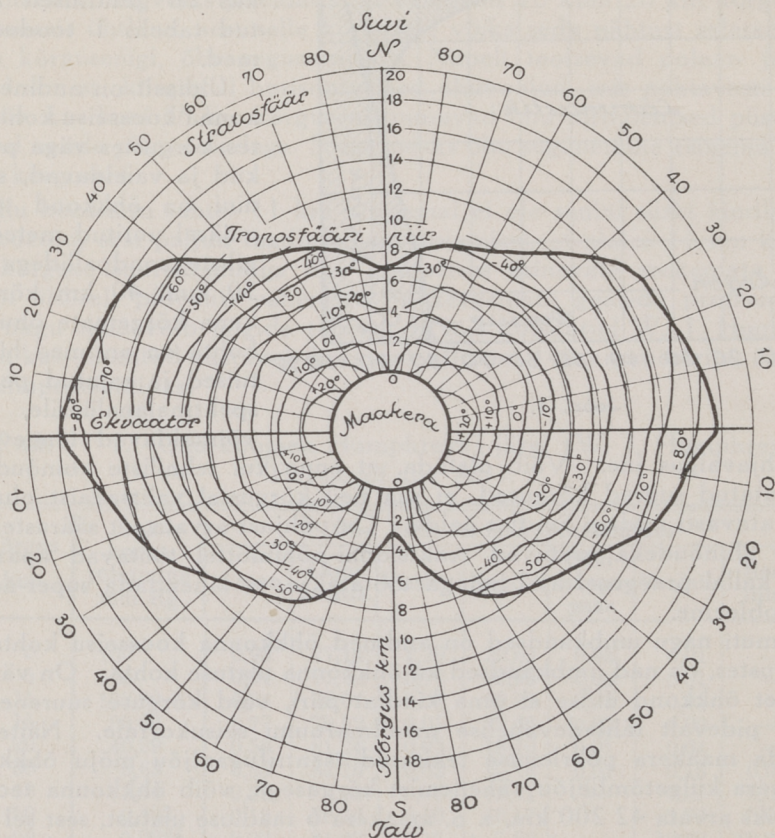
Alates 11 km kõrgusest, nagu nähtub tabelist 1, hakkab hapniku protsent kahanema, kuna lämmastiku protsent tõuseb, saavutades 50 km kõrgusel oma maksimumi 86,78%. 60 km kõrguselt hakkab lämmastiku protsent kiiresti kahanema ja vesiniku protsent suurenema. Piltliku kujutluse õhkkonna koosseisust annab diagramm joonisel 1, kus on graafiliselt kujutatud tabelis 1 toodud andmed.

Üldiselt on andmed õhkkonna koosseisu kohta suurtes kõrgustes väga puudulikud ja vaieldavad, sest senini on õhkkond teataval määral uuritud meteoroloogiliste sondpallidega ainult 30 kuni 40 km kõrguseni, kuna kõrgemate õhukihtide kohta on andmed hüpoteetilised ja rajatud peamiselt spektraalanalüüsile, mida võimaldavad langevad tä-

Õhkkonna jaotus kõrgussihis.

Praegusel ajal jaotatakse õhkkond kõrgussihis kaheks tähtsamaks teineteisest erinevaks õhukihiks: alumiseks —, mida nimetatakse troposfääriks, ja ülemiseks —, mille nimetus on stratosfäär. Kõik meteoroloogilised nähtused toimuvad troposfääris, nagu harilik pilvitus, õhu püstvoolud ehk nn. konvektiivvoolud, tsükloonid, temperatuuri muutused, sademed jne., ja seda arvestades nimetatakse troposfääri ka tegevaks õhukihiks.

Troposfääri paksus on leitud geograafilisest laiusest ja aastaaegadest. Poolustel ulatub ta 7 kuni 11 km ja tõuseb pidevalt ekvaatorile lähenedes, kus ulatub 16 kuni 18 km kõrguseni. Keskmistel geograafilistel laius-



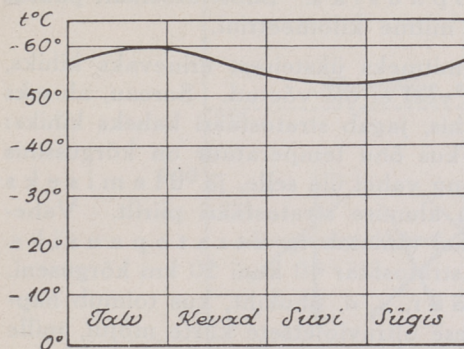
Joon. 2.

tel troposfäär ulatub keskmiselt 11 km kõrguseni. Tsükloonide kohal on troposfääri ülemine piir madalamal ja antitsükloonide kohal kõrgemal. Suurel määral sõltub troposfääri paksus õhu soojuslikust seisukorrast: talvel ja kevadel on troposfääri ülemine piir madalamal ja suvel ning sügisel kõrgemal. Õhu temperatuuri suhtes on märkimisväärt, et troposfääris ühes suu-

renea kõrgusega õhu temperatuur langeb. Selle temperatuuri languse keskmine väärtus on $6,5^{\circ}\text{C}$ 1000-m kõrgusvahe kohta. Troposfääri kõrgus ja tema temperatuuriline seisukord vastavalt geograafilisele laiuslele on näidatud joonisel 2.

Stratosfäär on vastand troposfäärile, kuna temas puuduvad peagu kõik troposfääris toimuvad meteoroloogilised nähtused. Stratosfääri tähtsamaks omaduseks on, et õhk asub seal isothermilises seisukorras¹⁾, s. o. kõrguse suurenemisega stratosfääris peagu ei esine õhu temperatuuri langust, nagu see aset leiab troposfääris. Senini uuritud kõrgusteni on kõrgusega kaasaskäiv õhu temperatuuri muutus stratosfääris 0° kuni 6°C , nagu näha tabelitest 3 ja 4. Peale selle puuduvad stratosfääris õhu konvektiivvoolud ja esinevad ainult õhu horisontaalsed voolud.

Stratosfääri temperatuuri muutumatust kõrguse muutumisel seletatakse asjaoluga, et seal õhk asub soojuslikus tasakaalus, s. o. stratosfääris asuv õhk kiirgab ajaühikus endast välja maailmaruumi sama suure soojushulga, nagu ta seda ise kiirgamise teel maapinnalt vastu võtab.



Joon. 3.

Stratosfääris esineb meridiaanide sihis teatav temperatuuri erinevus. Kõige madalam temperatuur leidub ekvatoriaalses vöös, nimelt -70° kuni -90°C . Poolustele lähenedes stratosfääri temperatuur tõuseb, omandades pooluste piirkonnas väärtused -30° kuni -60°C (vt. joon. 2). Stratosfääris toimub ka aastaegseid temperatuuri muutusi. Keskmistel geograafilistel laiusel stratosfääri keskmine temperatuur on talvel -60°C ja suvel -52°C (vt. joon. 3). Rahvusvaheliselt on stratosfääri keskmiseks aastaseks temperatuuriks võetud $-56,5^{\circ}\text{C}$.

Stratosfääri temperatuuri maksimum on suvel ja miinimum talvel, kusjuures temperatuuri kõikumise amplituud on keskmiselt 6° kuni 10°C ²⁾. Peale selle on pandud tähele, et stratosfääris vahel leiab aset ka mitteperioodilisi temperatuuri muutusi, kuni 10°C ja rohkem, millised on tingitud õhuvooludest.

Õhkkonna temperatuurilise seisukorra üleminek troposfäärist stratosfääri on mitmesugune. Peatüübid on järgmised:

1. **N o r m a a l n e t ü ü p.** Troposfääri temperatuuri pidevale langusele kõrgusega järgneb stratosfääri piiril õhu temperatuuri järsk üleminek isothermiliseks. See tüüp on kujutatud joonisel 4 joonega A³⁾.

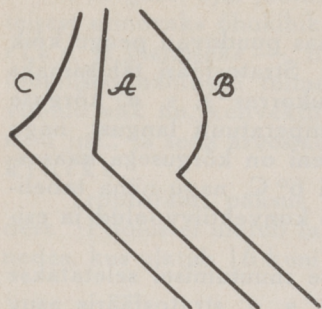
2. **T s ü k l o o n i l i n e t ü ü p.** Temperatuuri pidevale langusele kõrgusega järgneb stratosfääri piiril järsk temperatuuri tõus, millele omakorda järgneb temperatuuri langus, kusjuures õhu temperatuur on kõrgem nor-

¹⁾ Õhu isothermiliseks seisukorraks nimetatakse nähtust, et õhu temperatuur tema rõhumihe muutumise puhul ei muutu, s. o. jääb endiseks.

²⁾ Die Arbeiten d. Preuss. Aeron. Obs. bei Lindenberg, Bd. XVI, 1930. Beitr. z. Physik d. freien Atmosphäre, Bd. XVII, H. 2, 1931.

³⁾ Joonisel 4 on ordinaattelg kõrgustelje ja abstsissitelg temperatuuritelje.

maalse tüübi omast ja läheneb kõrgusega viimasele. See tüüp on joonisel 4 näidatud joonega *B* ja leiab aset peamiselt tsükloonide kohal.



Joon. 4.

3. Antitsüklooniline tüüp. Temperatuuri pidevale langusele kõrgusega järgneb stratosfääri piiril temperatuuri tõus, kusjuures õhu temperatuur on madalam normaalse tüübi omast, kuid läheneb viimasele kõrgusega. See tüüp on joonisel 4 märgitud joonega *C* ja leiab aset antitsükloonide kohal.

Eltoodust järeldub, et stratosfääri alumisel piiril asub sagedasti teatav õhukiht, mille temperatuuriline seisukord (ülemine inversioon) erineb stratosfääri kui ka troposfääri omast (tsüklooniline ja antitsüklooniline tüüp); seda vahepealset õhukihti nimetatakse substratosfääriks ehk tropopausiks. Substratosfääri paksus

on väga mitmesugune, ulatudes vahel mitme kilomeetrini.

Stratosfäär omakorda jaotatakse mitmeks üksteisest erinevaks kihiks, kuid kindlat seisukohta selles küsimuses veel ei ole võetud. Soreau, aluseks võttes temperatuuri muutumise kõrgussihis, jagab stratosfääri kaheks kihiks: alumiseks stratosfääriks, kus õhu temperatuur on kõrgussihis muutumatu ja mis ulatub kuni 27 km ning vahel üle selle, ja ülemiseks stratosfääriks, mis algab peagu alumise stratosfääri piirilt. Vahekihti ülemise ja alumise stratosfääri vahel nimetatakse stratopausiks. Mõnede teadlaste arvamise järgi ulatub stratosfäär 40 kuni 50 km kõrguseni. Sellelt kõrguselt algab nn. osonosfäär, s. o. õhukiht, kus toimub hapniku (O_2) molekulide lagunemine päikese ultravioletsete kiirte mõjul, mille tulemuseks on osooni (O_3) tekkimine. Osonosfäär ulatub umbes 80 km kõrguseni. Selle kihi soojuslikud tingimused arvatakse olevat hoopis erinevad stratosfääri omadest¹⁾ ja tema tähtsamateks omadusteks on, et ta sisaldab osooni ja oma temperatuurilise seisukorra tõttu peegeldab tagasi helilaineid.

Umbes 80 km kõrguselt algab nn. ionosfäär²⁾, mis moodustab viimse maakera ümbritseva õhukihi. Selle kihi iseärasuseks on tema erilised elektrilised omadused, kuna teda moodustavad, nagu arvatakse, kosmiliste kiirte mõjul äärmuseni ioniseerunud hõredad gaasid. Sellest kihist peegelduvad tagasi teatavad raadiolained.

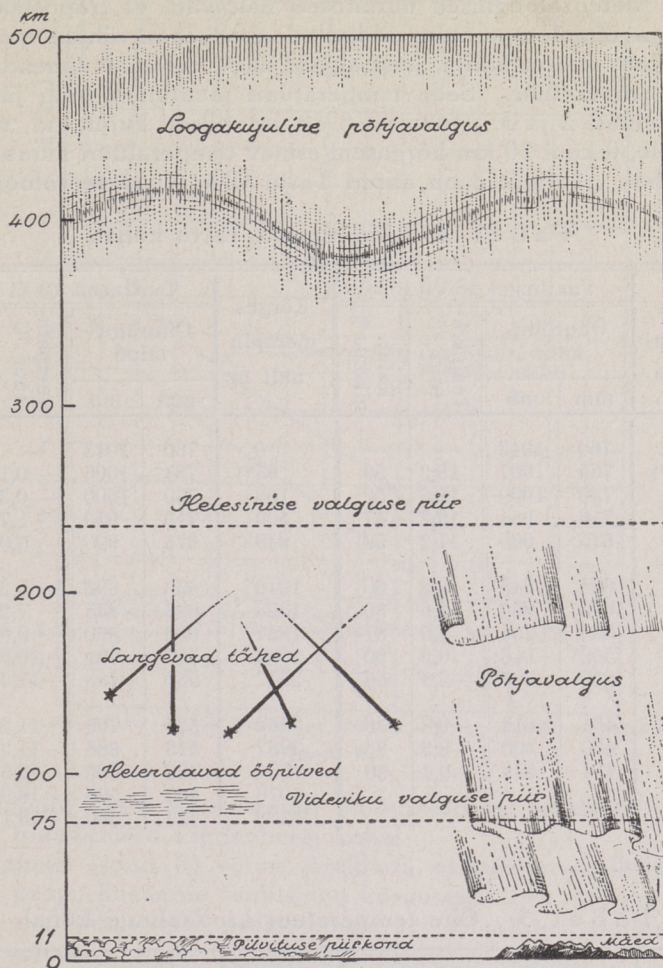
Kõigist eelkirjeldatud õhukihtidest pakub praegusel ajal aerotehnika seisukohast suurt huvi stratosfäär lähema tuleviku lennukite ja õhulaevade liiklemisteena, kus hõreda keskkonna tõttu on võimalik arendada suuri kiirusi. Samuti pakub stratosfäär suurt huvi meteoroloogilisest seisukohast, kuna arvatakse, et ta suuresti mõjutab troposfääris esinevaid meteoroloogilisi jm. nähtusi³⁾.

¹⁾ F. Whipple'i ja E. Wiechert'i järgi on sel kõrgusel temperatuur 20° kuni 40° C võrra kõrgem kui maapinna lähedal.

²⁾ Wattson Watt. The Ionosphere. Nature 1933, July 1, p. 13.

³⁾ Seda vaadet pooldavad saksa teadlased. Norra koolkond seda ei tunnusta.

Üldise kujutluse õhkkonna jaotuse ja temas esinevate nähtuste kohta annab joonis 5.



Joon. 5.

Troposfääri temperatuur.

Õhu temperatuur on tähtsamaid meteoroloogilisi elemente, kuna temast suurel määral olenevad kõik muud meteoroloogilised elemendid. Üldiselt saab õhkkond oma soojuse päikeselt. Osa sellest soojusest saab ta otseselt päikese kiirtelt, mis õhkkonna läbimisel annavad umbes 20% oma soojusest õhkkonnale, kuna ülejäänud 80% kandub maapinnale, kust osa sellest soojusest kandub tagasi õhkkonda, osa muundub mõneks muuks energia liigiks, osa kiirgub tagasi maailmaruumi jne.

Soojuse jaotus õhkkonnas ei ole ühtlane, ta sõltub koha geograafilisest laisusest, veekogudest, maapinna iseloomust, õhu niiskusest, õhuvooludest,

kõrgusest merepinnalt ja veel paljudest muudest asjaoludest. Nendest teguritest oleneb õhu temperatuur ja selle muutumine nii horisontaal- kui ka vertikaalsihis. Meteoroloogilised uurimused näitavad, et troposfääris kõrguse suurenemisega õhu temperatuur üldiselt langeb enamvähem teatava korrapärasusega kuni stratosfäärini, kust algab, nagu varemalt tähendatud, peagu konstantne temperatuur. Seda temperatuuri muutumist võib jälgida jooniselt 6 ja tabelitest 2 ja 3. Joonisel 6 on graafiliselt kujutatud, vastavalt suvele ja talvele, 0 kuni 20 km kõrguseni esinev temperatuuri muutumine Kesk-Euroopa kohal. Tabelis 2 on antud Tartu Ülikooli meteoroloogilise obser-

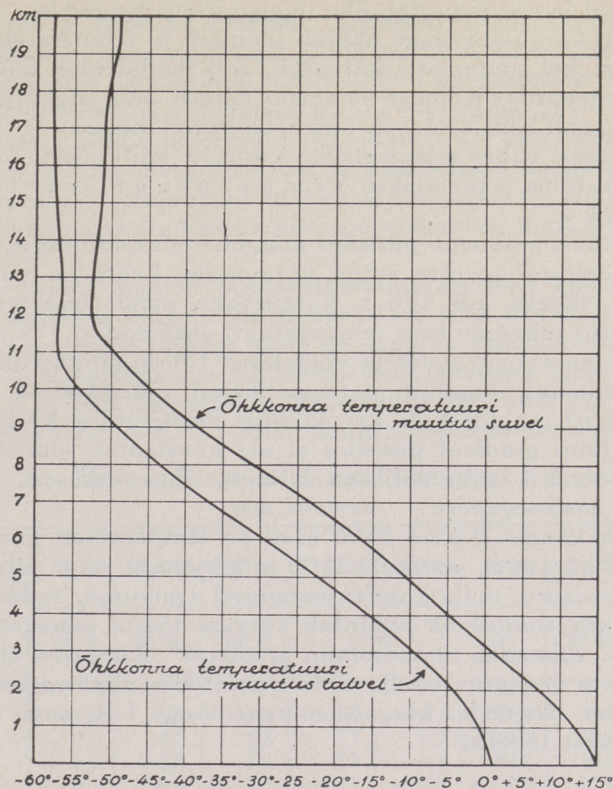
T a b e l 2. Mõõtmised Tartu kohal.

Kõrgus merepin- nalt m	Vaatlused 18.VII 1928				Kõrgus merepin- nalt m	Vaatlused 12.XI 1928			
	Õhurõhu- mine		Tempera- tuur °C	Relat. niiskus %		Õhurõhu- mine		Tempera- tuur °C	Relat. niiskus %
	mm	mb				mm	mb		
0	760	1013	—	—	0	760	1013	—	—
55*)	755	1007	18,3	56	55*)	754	1006	— 0,1	81
111	750	1000	18,5	52	103	750	1000	— 0,3	65
509	716	954	19,3	47	509	713	950	— 1,7	70
1007	675	900	14,2	50	940	675	900	— 5,0	43
1528	634	845	9,2	60	1019	669	892	— 5,2	40
1978	600	800	4,6	80	1528	626	835	— 7,2	27
2038	596	794	4,0	81	1857	600	800	— 9,0	22
2547	560	746	0,5	90	2038	586	781	— 10,0	20
3050	525	700	—2,5	58	2547	550	733	— 11,7	18
4076	461	614	—6,8	38	2882	525	700	— 11,2	16
4253	450	600	—8,3	35	3057	515	686	— 11,5	16
4550	434	579	—9,4	30	4054	450	600	— 16,5	16
					4076	449	598	— 16,9	16
					4308	435	580	— 18,1	15

*) maapind.

T a b e l 3. Õhu temperatuur Lindenbergi kohal.

Kõrgus km	Õhu temperatuur °C				Kõrgus km	Õhu temperatuur °C			
	talvel	keva- del	suvel	sügi- sel		talvel	keva- del	suvel	sügi- sel
0	0	8	17	8	13	— 57	— 53	— 50	— 54
1	— 1	3	10	5	14	— 56	— 52	— 50	— 55
2	— 5	— 2	4	0	15	— 56	— 51	— 50	— 55
3	— 10	— 8	— 1	— 4	16	— 56	— 51	— 50	— 55
4	— 16	— 14	— 6	— 10	17	— 56	— 51	— 49	— 54
5	— 22	— 21	— 12	— 16	18	— 57	— 50	— 48	— 53
6	— 30	— 28	— 18	— 23	19	— 57	— 50	— 47	— 53
7	— 37	— 35	— 25	— 30	20	— 58	— 49	— 46	— 53
8	— 45	— 42	— 33	— 37	21		— 49	— 46	— 52
9	— 51	— 48	— 40	— 43	22		— 49	— 45	— 52
10	— 56	— 53	— 46	— 49	23			— 45	— 51
11	— 59	— 55	— 50	— 53	24			— 44	— 51
12	— 59	— 54	— 50	— 54					



Joon. 6.

vatooriumi poolt 1928. a. teostatud mõõtmised ja tabelis 3 temperatuuri aastaaegsed muudatused Lindenbergi kohal.

Diagrammist (joon. 6) võime järeldada, et kuni stratosfäärini õhu temperatuur on peagu lineaarne funktsioon kõrgusest. See asjaolu, nagu edaspidi selgub, on lähtekohaks peagu kõigis aerotehnilistes arutlustes, mis on seotud õhkkonnaga.

Temperatuuri langus kõrgusega on tingitud peamiselt rõhumise vähenemisest kõrgussihis. Kui teatav õhumass tõuseb alumisest õhukihist kõrgematesse õhukihtidesse, siis ta paisub vastavalt kõrguse tõusul esinevale rõhulangusele, millejuures ühtlasi langeb selle õhumassi temperatuur. Näiteks kui teatav hulk kuiva õhku tõuseb oma kõrgusest 100 m võrra kõrgemale, siis tema temperatuur langeb laienemise (paisumise) tõttu, vaatamata sellele, missugune oli selle õhumassi algkõrgus ja -rõhumine, umbes 1°C võrra (täpsemalt $0,985^{\circ}\text{C}$)¹⁾, 1000-m tõusu puhul 10°C võrra jne. Kui aga õhus on teataval määral niiskust ja temperatuuri langemise puhul esineb veeaurude kondenseerumine (pilvede tekkimine jne.), siis on kõrguse tõusul esinev temperatuuri langus väiksem, sest aurude kondenseerumisel vabaneb teatav hulk

1) Nähtust, et õhumassi temperatuur 100 m kõrgusvahe puhul muutub $0,985^{\circ}\text{C}$ võrra, nimetatakse adiabaatseks protsessiks ja ta leiab aset õhumassi säärasel paisumisel või kokkusurumisel, mil õhumass ei saa soojust juurde võtta ega ära anda.

varjatud soojust ja see pidurdab õhu temperatuuri langemist. Selle tõttu on 0 kuni 2500 m kõrguseni, nagu nähtub jooniselt 6, temperatuuri langus kõrgusega väiksem kui suurematel kõrgustel, sest madalamad õhukihid sisaldavad rohkem veeauru. Kui aga õhumass langeb oma algkõrguselt madalamale, siis vastavalt sellele tõuseb õhumassi temperatuur.

Temperatuuri vahet sajameetrilise kõrguse, või üldiselt teatava pikkusühiku kohta püstitsihis, nimetatakse temperatuuri vertikaalseks gradiendiks.

Temperatuuri gradiendi püstitsihis märgime edaspidi murruga, mille lugejaks on temperatuuri muutus antud kõrgusvahe kohta ja nimetajaks sama kõrgusvahe. Näiteks kui 100-m kõrgusvahe puhul temperatuur muutub $0,5^{\circ}\text{C}$ võrra, siis märgime selle temperatuuri gradiendi $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Meteoroloogias temperatuuri gradient võetaksegi 100-m kõrgusvahe kohta, kuna aga aeromehaanikas, tingitult matemaatilistest rakendustest, temperatuuri gradient, nagu näeme edaspidi, arvutatakse ühemeetrilise kõrgusvahe kohta.

Temperatuuri gradient püstitsihis ei ole konstantne suurus, vaid oleneb maapinna iseloomust, geograafilisest laiusest, õhu niiskusest, õhuvooludest, ilmastikust ja aastaegadest.

Vabas õhkkonnas 0 kuni 2500 m-ni on temperatuuri gradient väiksem kui suurematel kõrgustel, sest kuni 2500 m kõrguseni, nagu juba tähendatud, sisaldab õhk veeauru, mille kondenseerumisel (pilvituse, sademete jne. tekkimisel) vabanev soojushulk pidurdab kõrguse tõusul esinevat temperatuuri langemist, s. o. vähendab temperatuuri gradienti. Kõrgustel üle 2500 m leidub õhus vähem veeauru ja selle tõttu nendel kõrgustel on ka temperatuuri gradient suurem, lähenedes kõrguse suurenemisega 1-le, nagu seda võib jälgida alljärgnevast tabelist:

Kõrgus km	1	2	3	4	5	6	7
Temperatuuri gradient							
100 m kohta	0,44	0,51	0,56	0,60	0,64	0,69	0,72

Eeltoodud põhjustega võib seletada ka asjaolu, et temperatuuri gradiendid talvel, mil õhus leidub vähem veeauru, on enamasti suuremad kui suvel.

Aerotehnikas võetakse temperatuuri gradient merepinnalt kuni 11 000 m kõrguseni rahvusvaheliselt võrdseks $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, s. o. oletatakse, et iga 100-meetrilise kõrgusvahe kohta, merepinnalt kuni 11 000 m kõrguseni, väheneb temperatuur $0,65^{\circ}\text{C}$ võrra, kusjuures õhu temperatuur merepinna kõrgusel on võetud võrdseks $+15^{\circ}\text{C}$. Samuti on rahvusvaheliselt määratud kindlaks, et 11 000 m kõrguselt algab nn. standardne stratosfäär, mille temperatuur on $-56,5^{\circ}\text{C}$. Seega standardses stratosfääris temperatuuri gradient on null.

Temperatuuri korrapärast kahanemist ühes kõrgusega igakord ei toimu, sest, nagu vastavad meteoroloogilised uurimused näitavad, järgneb sagedasti temperatuuri korrapärasele kahanemisele mõnel kõrgusel temperatuuri tõus, s. o. alumisel jahedal õhukihil lasub soojem õhukiht, mille liikumise suund isegi erineb alumise õhukihi liikumise suunast. Säärast kõrguse tõusuga kaasaskäivat temperatuuri tõusu nimetatakse inversiooniks ehk ümberpöördeks.

Temperatuuri inversioonid esinevad enamasti alumistes õhukihtides kuni kõrguseni 2500 m, kusjuures inversioonides temperatuur võib muutuda 15°

kuni 20° C võrra ja vahel ka rohkem. Olenevalt ilmastikust haaravad õhu inversioonkihid vahel suuri pindalasid ja võivad püstsihis omada kuni 2000-m paksust. Kõrgemates õhukihtides, 4000—8000 m, inversioonkihte peagu ei esine, kuid alates 8000 m kõrgusest kuni 12 000 m-ni, kus harilikult algab tropopaus, esineb ülemine inversioon (vt. joon. 4). Inversioonid toimuvad enamasti sügisel ja talvel kõrgrõhualade ja tsükloonide tagakülgedel. Nende tekitajateks on soojad õhuvoolud ja õhu turbulentsed ¹⁾ konvektiivvoolud. Ka tekitab neid alumiste õhukihtide suur soojusekaotus, mida põhjustab maa-pinna kiirgamine.

Peale kõrgussihhi muutub õhu temperatuur ka ühes koha geograafilise laiuks. Troposfääris langeb õhu temperatuur sihis ekvaatorilt poolustele, mis on tingitud peamiselt päikese kiirte kaldenurga vähenemisest horisontaal-pinna suhtes. Stratosfääris aga, vähemalt tema alumises kihis, esineb vastu-pidine nähtus, s. o. õhu temperatuur langeb sihis poolustelt ekvaatorile, nagu seda võib jälgida tabelist 4. ²⁾ Selle nähtuse kohta ei ole senini veel täpset

T a b e l 4. Õhu temperatuuri muutumine olenevalt geograafilisest laiuks.

Kõrgus km	Geogr. asend	68°N	57,5°N	52,5°N	47,5°N	42,5°N	35°N	18°N	1°S
		20°E	15°E	10°E	11°E		0°	20°W	33°E
0		1,0	3,8	8,8	9,8	14,2	22,3	25,5	27,0
1		— 0,6	0,9	5,5	7,1	9,9	16,9	20,0	23,2
2		— 4,6	— 3,3	1,4	3,3	4,1	12,6	16,3	15,4
3		— 9,1	— 8,0	— 3,5	— 1,3	— 0,6	7,9	11,6	7,8
4		— 14,1	— 13,0	— 9,1	— 7,4	— 6,6	3,0	5,5	1,7
5		— 20,2	— 19,1	— 15,0	— 13,5	— 12,5	— 1,8	— 1,0	— 3,8
6		— 26,6	— 25,5	— 21,2	— 20,3	— 19,1	— 7,5	— 4,8	— 9,6
7		— 33,5	— 32,4	— 28,1	— 27,5	— 26,2	— 14,7	— 10,6	— 15,0
8		— 40,8	— 39,9	— 35,4	— 35,1	— 33,5	— 21,7	— 17,1	— 20,8
9		— 46,6	— 45,7	— 42,5	— 42,7	— 39,7	— 29,0	— 25,4	— 26,9
10		— 51,2	— 51,7	— 48,5	— 48,2	— 45,6	— 37,3	— 34,8	— 34,1
11		— 53,0	— 53,9	— 52,9	— 52,9	— 50,3	— 46,2	— 43,5	— 41,6
12		— 53,8	— 54,5	— 55,8	— 55,6	— 53,3	— 52,9	— 51,6	— 50,4
13		— 52,8	— 53,2	— 55,0	— 56,2	— 55,5	— 56,6	— 58,1	— 57,0
14		— 52,3	— 52,6	— 54,6	— 55,8	— 55,3	— 58,3	— 63,2	— 62,2
15		— 51,8	— 52,4	— 54,5	— 55,3	— 55,0	— 58,6	— 68,8	— 66,2
16		— 50,5	— 51,6	— 54,6	— 54,7	— 54,8			— 70,4
17		— 49,2	— 51,5	— 53,8	— 54,0	— 54,1			— 75,4
18		— 48,3	— 51,0	— 53,8	— 53,9	— 53,8			— 82,5
19		— 48,7	— 50,9	— 53,1	— 53,2	— 53,3			— 83,9
20		— 48,0	— 49,7	— 51,4	— 52,0	— 52,1			— 84,3

teaduslikku seletust antud, kuid arvatavasti on see tingitud konvektiivsetest vooludest. Troposfääri alumiste õhukihtide temperatuur oleneb peale geograafilise laiuse suurel määral ka maakoha iseloomust, suurte veekogude lähedusest, merehoovustest jne. Näiteks kui ühendame sama temperatuuriga

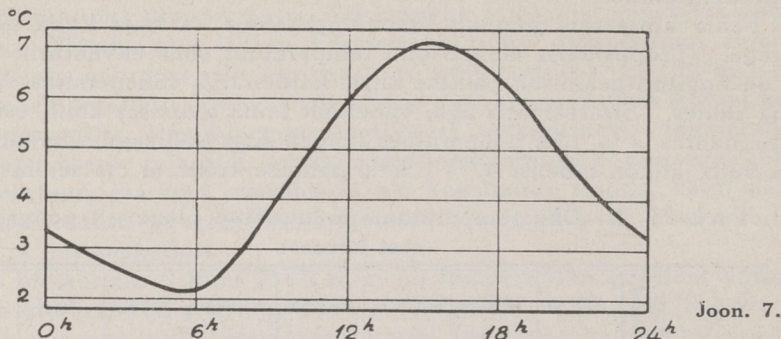
¹⁾ Turbulentseks nimetatakse õhuvoolu, mis ei toimu reeglipäraselt, s. o. voolu, mis on korrapäratu. Niisugune vool koosneb enamasti üksikutest elementaarsetest õhu-keeristest, millede tekkimise põhjustab õhuosakeste omavaheline hõõrdumine liikumisel.

²⁾ Monthly Weather Review, July 1914, ja Meteor. Zeitschr. 1917, S. 325.

maakera punkte omavahel joonega, siis saame mingisuguse korrapäratu kõverjoone, mis kohati kaldub lõuna poole, kohati jällegi põhja poole. See-sugust joont nimetatakse *isotermiks* ehk samasoojajooneks.

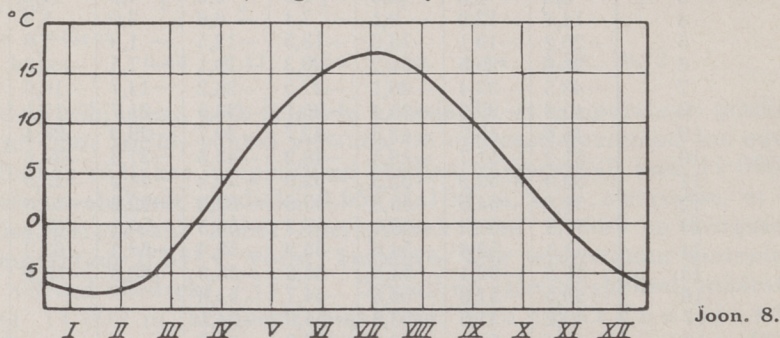
Troposfääris oleneb koha geograafilisest laiuusest ka õhu temperatuuri ööpäevane ja aastane käik.¹⁾ Õhu temperatuuri ööpäevast ja aastast käiku mõjutab veel ümbruskond, s. o. kas antud koht asub merel, mere läheduses, mägismaal jne.

Ööpäevase temperatuuri käigu maksimum on harilikult kella 14 ja 16 vahel ja miinimum enne päikese tõusu, nagu see nähtub jooniselt 7, kus on



antud Tartu 50 aasta (1866—1915) keskmine temperatuuri ööpäevane käik. Õhu temperatuuri ööpäevast käiku mõjutavad peale mainitud tegurite veel pilvitus, sademed, õhuvooulud jne. Kõrgussihis on õhu temperatuuri ööpäevast käiku tunda keskmiselt kuni 1000 m kõrguseni.

Õhu temperatuuri aastase käigu maksimum troposfääris on juulis ja miinimum jaanuaris või veebruaris, nagu nähtub jooniselt 8, kus on antud Tartu



50 aasta (1866—1915) keskmine õhu temperatuuri aastane käik. Kõrgussuunas on õhu temperatuuri aastast käiku tunda ka stratosfääris (vt. tabelit 3 ja joon. 3), kuid üldiselt temperatuuri aastane käik kõrgemates õhukihtides hilineb võrreldes alumiste kihtide aastase temperatuuri käiguga. Samuti väheneb seal ka amplituud.

Maakera ümbritseva alumise õhukihi keskmine temperatuur on vastavate uurimuste järgi $+15^{\circ}\text{C}$.

¹⁾ Õhu temperatuuri ööpäevase ja aastase käigu kirjeldusi võib leida raamatutest: V. Kurrik, Meteoroloogia, ja E. Kägi, Meteoroloogia ja okeanograafia.

Termodünaamiline temperatuuri-astmik.

Antud keha või keskkonna temperatuuri määramine toimub üldiselt nn. temperatuuri-reeperite järgi, mis teatud temperatuuri-intervallis asetsevad kindla korrapärasusega kahe valitud põhireeperi vahel, kui ka väljaspool neid põhireeperiteid. Säärane temperatuurireeperite kogu moodustab termomeetrilise ehk temperatuuri-astmiku. Termomeetrilise astmiku kahe naaberreeperi vahel olevat temperatuuri-intervalli nimetatakse temperatuurikraadiks. Temperatuuri-astmikke on moodustanud paljud teadlased; omavahel erinevad need astmikud nii põhireeperite valikult kui ka põhireeperite-vahelise temperatuuri-intervalli kraadideks jaotamiselt. Tehnikas ja teaduslikkudes töödes tarvitatakse temperatuuri mõiste ühtlustamiseks rootsi täheteadlase A. Celsiuse (1701—1744) poolt koostatud sajakraadi-süsteemilist temperatuuri-astmikku, mis võeti tarvitusele Celsiuse õpilase Strömeri ettepanekul 1750. a. Celsiuse astmiku põhireeperiteks on puhta jää sulamise temperatuur 760-mm elavhõbeda-samba rõhumisel ja samale rõhumisele vastav puhta keeva vee aurude temperatuur. Nende põhireeperite vaheline temperatuuri-intervall on jaotatud 100-ks võrdseks osaks, s. o. sajaks temperatuurikraadiks, kusjuures jää sulamise temperatuur märgitakse nullkraadiga (0°C) ja keeva vee aurude temperatuur $+100^{\circ}\text{C}$. Temperatuuri-astmik ülespoole 100° ja allapoole 0° on jaotatud niisama suurteks temperatuurikraadideks nagu põhireeperite vaheline osagi. Celsiuse astmiku järgi tähistatakse temperatuurid allapoole 0° märgiga miinus.

Teaduslikult täpse ja põhjapaneva temperatuuri-astmiku andis lord Kelvin (W. Thomson); seda astmikku nimetatakse Kelvini absoluutastmikuks ehk termodünaamiliseks astmikuks. Temperatuure, mis on määratud absoluutastmiku järgi või mis sellega ühtuvad, nimetatakse absoluutseteks temperatuurideks. Viimaseid tähistame edaspidi alati tähega T .

Termodünaamiline astmik ei olene ainete füüsikalistest omadustest ja on rajatud termodünaamika teise põhiseaduse alusel toimuvale Carnot' ringprotsessile e. tööringile ¹⁾. Carnot' tööringist on teada, et kõigis neis töörin-

1) Carnot' tööringi on võimalik teostada nn. Carnot' soojusjõumasinas. Selleks peab olema kaks soojusallikat, üks kõrgema temperatuuriga T ja teine madalama temperatuuriga T_1 , mida nimetatakse jahutajaks, kuna kõrgema temperatuuriga soojusallikat võiksime nimetada katlaks. Carnot' masina tööring ehk üks tsükkel koosneb neljast perioodist, mis toimuvad järgmiselt:

1) Oletame, et Carnot' masina silindris on töötav keha, näiteks mingisugune ideaalne gaas, komprimeeritud kõrgema temperatuuriga soojusallika temperatuurini T . Sellel gaasil lastakse kolvi teekonna teataval ulatusel temperatuuri T juures isotermiliselt paisuda, s. o. sääraselt, et gaasi temperatuur paisumise kestel jääks muutumatuks, mis otstarbel gaasile juhitakse paisumisprotsessi vältel pidevalt juurde kõrgema temperatuuriga soojusallikast vastav soojushulk Q .

2) Peale gaasi isotermilist paisumist lastakse gaasil kolvi ülejäänud teekonna ulatusel paisuda adiabaatselt, kuni gaas saavutab madalama temperatuuriga soojusallika — jahutaja temperatuuri T_1 , s. o. sääraselt, et gaas paisudes kuni temperatuurini T_1 ei saa soojust võtta juurde ega anda ära.

3) Kui gaas adiabaatselt paisudes on saavutanud temperatuuri T_1 , hakkab kolb silindris tagasi liikuma, komprimeerides teekonna teataval ulatusel temperatuuri T_1 juures gaasi isotermiliselt, kusjuures gaas selle protsessi vältel annab ära jahutajale soojushulga Q_1 .

gides, mis toimuvad kahe kindla füüsikaliselt fikseeritud temperatuuriga soojusallika vahel, on madalama temperatuuriga soojusallikale, jahutajale, äraantud soojushulga Q_1 suhe kõrgema temperatuuriga soojusallikalt, katlalt ehk nn. soojendajalt, saadud soojushulgaga Q — alati jääv suurus, olenemata sellest, kui suur on katlalt saadud soojushulk Q ja missugune on töötav keha, s. o.

$$\frac{Q_1}{Q} = \text{konst.}$$

Oletame, et on antud rida üksteisest madalamate konstantsete temperatuuridega soojusallikaid $A, A_1, A_2, \dots A_n$, kusjuures soojusallikat A vaatleme kui katelt, ja teisi madalama temperatuuriga soojusallikaid $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ kui jahutajaid, siis, teostades nende soojusallikate vahel Carnot' tööringe järjestusega $A-A_1, A-A_2, A-A_3, \dots A-A_n$ ja märkides kõrgema temperatuuriga soojusallikalt — katlalt A igal eeltähendatud tööringil saadud soojushulga tähega Q ning vastavatele jahutajatele $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ äraantud soojushulgad tähtedega $Q_1, Q_2, Q_3, \dots Q_n$, võime kirjutada suhete rea:

$$\frac{Q_1}{Q}, \frac{Q_2}{Q}, \frac{Q_3}{Q}, \dots \frac{Q_n}{Q}.$$

Kuna need suhted, nagu mainitud, on jäävad suurused, s. o. need suhted ei muuda oma arvsuurstust olenemata sellest, missugused ka oleksid ühel või teisel tööringil katlalt A saadud soojushulgad Q , siis nad iseloomustavad täielikult soojusallika A ja soojusallikate $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ vahelisi temperatuuride intervalle ehk, mis sama, soojusallikate $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ temperatuure soojusallika A temperatuuri suhtes. Eeltoodud suhete rida moodustabki **t e r m o d ü n a a m i l i s e t e m p e r a t u u r i - a s t m i k u** algkujul, nagu sellest mõiste andis lord Kelvin, s. o. Kelvini temperatuuri-algastmiku kujutab

4) Gaasi isotermiline komprimeerimine temperatuuri T_1 juures vältab kolvi teekonna säärase punktini, millest alates peab toimuma gaasi adiabaatne komprimeerimine, et gaas kolvikäigu lõpuks saaks tagasi kõrgema temperatuuriga soojusallika — katla temperatuuri T . Sellega on Carnot' tööring teostunud.

Carnot' tööringil on puhtteoreetiline tähtsus ja ta on ainus võimalik ringprotsess, millega kahe antud temperatuuri T ja T_1 intervallis töötav soojusjõumasin saab muuta võimaliku maksimaalse soojushulga mehaaniliseks tööks. See soojushulk võrdub ühel tööringil katlalt saadud soojushulga Q ja jahutajale äraantud soojushulga Q_1 vahega, s. o. $Q - Q_1$. Soojushulgad Q ja Q_1 ning nendelevastavad absoluutsed temperatuurid T ja T_1 on seotud Carnot' tööringis järgmise matemaatilise vahekorraga:

$$\frac{T_1}{T} = \frac{Q_1}{Q},$$

mis ühtlasi väljendab ka Carnot' masina, s. o. tema tööringi soojuskaotuse koefitsienti. Samast vahekorrast leiame, et tööringi soojuskasulikkuse koefitsient avaldub vahekorraga:

$$\frac{T - T_1}{T} = \frac{Q - Q_1}{Q}$$

Saadud vahekorrast järeldub, et mida kõrgem on näiteks plahvatusjõumasina kütetesegu põlemise temperatuur T ja mida madalam mootori silindrist lahkuvate töötanud gaaside temperatuur T_1 , seda suurem on selle masina soojuskasulikkuse koefitsient. Tegelikud soojusjõumasinad ei saa töötada Carnot' tööringiga ja selle tõttu nende soojuskasulikkuse koefitsient on märksa väiksem, kui seda annab eeltoodud valem. Järelikult olemasolevate soojusjõumasinate suhtes võib Carnot' tööringi vaadelda ainult kui teatavat kriteeriumi.

absoluutsete temperatuuride suhete rida ehk absoluutsete temperatuuride suhtelist astmikku antud peasoojusallika temperatuuri suhtes. Järelikult, tähistades soojusallikate $A, A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ absoluutsed temperatuurid tähtedega $T, T_1, T_2, T_3, \dots T_n$, võime Kelvini suhtelise temperatuuri-astmiku mõiste põhjal kirjutada võrded:

$$\frac{T_1}{T} = \frac{Q_1}{Q}; \quad \frac{T_2}{T} = \frac{Q_2}{Q}; \quad \frac{T_3}{T} = \frac{Q_3}{Q}, \quad \dots \quad \frac{T_n}{T} = \frac{Q_n}{Q} \quad (1).$$

Kui anda mõne soojusallika, näiteks soojusallika A absoluutsele temperatuurile T mingisugune vabalt valitud arvuline väärtus, siis määratakse sellega eelantud võrrete põhjal kindlaks ka soojusallikate A_1, A_2, A_3 jne. temperatuurid absoluutses süsteemis. Sellest järeldame, et absoluutse temperatuuri astmikke (mitte aga suhtelisi) võime moodustada lõpmata palju.

Toodud võrrete põhjal võime püstitada lause: Kaks absoluutset temperatuuri T_1 ja T suhtuvad üksteisesse nagu Carnot' tööringi soojushulgad Q_1 ja Q , kus Q on soojushulk, mis saadud kõrgema temperatuuriga T soojusallikalt — katlalt, ja Q_1 soojushulk, mis on antud ära madalama temperatuuriga T_1 soojusallikale — jahutajale. See absoluutsete temperatuuride omadus ongi termodünaamilise temperatuuri-astmiku teaduslik kriteerium.

Kelvini ehk termodünaamilise temperatuuri-astmiku märgiks on täht K . Näiteks, kui arv 256 tähendab temperatuuri Kelvini astmiku järgi, tähistatakse seda $256^\circ K$.

Võrrete (1) põhjal võime absoluutsetele temperatuuridele anda ka füüsikalise seletuse. Nimelt, võttes võrretes (1) soojushulga Q arvvaartuse võrdseks katla temperatuuriga T , leiame:

$$Q_1 = T_1; \quad Q_2 = T_2; \quad Q_3 = T_3; \quad \dots \quad Q_n = T_n,$$

s. o. absoluutseid temperatuure võime arvuliselt vaadelda kui soojushulki, mida antud võimsusega Carnot' masin ühel tööringil annab ära vastavatele jahutajatele $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$, kui ta järjestikku töötab katla A ja jahutajate $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$ vahel, saades igal tööringil katlalt soojushulga $Q=T$.

Näide 1.

Toome absoluutsete temperatuuride arvutuse näite. Oletame, et füüsikaliselt on kindlaks määratud kadmiumi, väävelhappe ja vee keemise temperatuurid. Määrame nende punktide absoluutsed temperatuurid tingimusel, et kadmiumi keemise temperatuur on 1114 absoluutkraadi. Kui teostaksime Carnot' tööringi kadmiumi ja väävelhappe keemise temperatuuride vahel, leiaksime kalorimeetriliste mõõtmistega, et juhtides kadmiumi keemise temperatuuri juures vastava võimsusega Carnot' masinasse tööringiks 1000 kalorit soojust, annab masin väävelhappe keemise temperatuuri juures sellest soojusest ära jahutajale ~ 538 kalorit, kuna aga $1114 - 538 = 576$ kalorit muutub mehaaniliseks tööks. Tähistades väävelhappe absoluutse temperatuuri tähega T_1 , võime kirjutada võrde:

$$\frac{T_1}{1114} = \frac{538}{1000}; \quad \text{kust } T_1 = 1114 \cdot \frac{538}{1000} \approx 599^\circ K,$$

s. o. väävelhappe keemise absoluutne temperatuur on 599° . Samal viisil leiaksime, et juhtides kadmiumi keemise temperatuuri juures Carnot' masinasse tööringiks 1000 kalorit soojust, annab masin normaalse rõhumise all (760 mm Hg) keeva vee auru tempe-

ratuuri juures sellest soojusest ära jahutajale ~ 335 kalorit. Järelikult vee keemise absoluutne temperatuur T_2 eelatud tingimustel oleks:

$$\frac{T_2}{1114} = \frac{335}{1000} ; T_2 = 1114 \cdot \frac{335}{1000} = 373^\circ \text{K.}$$

Temperatuuride määramisi Carnot' tööringi abil on raske või isegi võimatu teostada, kuna see on seotud, nagu nägime, täpsete kalorimeetriliste mõõtmistega. Tegelikult teostatakse absoluutsete temperatuuride mõõtmisi teisi, võttes aluseks tõsiolu, et absoluutsete temperatuuride suhe on teatav funktsioon gaastermomeetriga määratud temperatuuridest.

Kui gaastermomeetris töötavaks kehaks on ideaalne gaas ja gaastermomeetri astmiku järgi määratud temperatuurid on tähistatud tähtedega t, t_1, t_2 jne., siis funktsionaalne vahekord absoluutsete temperatuuride ja gaastermomeetrilt loetud samade soojusallikate temperatuuride vahel avaldub kaunis täpselt võrrandiga:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t}{\frac{1}{\alpha} + t_1} \dots \dots \dots (2),$$

kus α on ideaalse (täiusliku) gaasi soojuspaisumis-koefitsient vastavalt gaastermomeetri astmikule ja t ning t_1 absoluutsetele temperatuuridele T ja T_1 vastavad gaastermomeetrilt loetud temperatuurid. Selleks et termodünaamilise astmiku ühekraadiline temperatuuri-intervall oleks võrdne gaastermomeetri ühekraadilise temperatuuri-intervalliga, võetakse võrrandis (2) $T_1 =$

$= \frac{1}{\alpha} + t_1$, millega võrrand (2) saab kuju:

$$T = \frac{1}{\alpha} + t \dots \dots \dots (3).$$

Gaastermomeetri termomeetriliseks astmikuks on võetud Celsiuse astmik ja sellele astmikule vastavalt on ideaalse gaasi paisumise koefitsient ¹⁾

$\alpha = \frac{1}{273}$. Asetades võrrandisse (3) α väärtuse, saame lõplikul kujul võrrandi gaastermomeetrilt loetud temperatuuride ümberarvutamiseks absoluutseteks temperatuurideks:

$$T = 273 + t \dots \dots \dots (4).$$

Võrrandist (4) järeldub, et jää sulamise temperatuurile ehk 0°C vastab absoluutne temperatuur 273° ²⁾, s. o. termodünaamilise astmiku nullpunkt

¹⁾ Ideaalse gaasi paisumise koefitsient α näitab, kui palju jääva (konstantse) rõhumise juures gaasi maht suureneb, võrreldes selle mahuga, mida gaas omab 0°C juures, kui tema temperatuur tõuseb 1°C võrra, või kui palju jääva (konstantse) mahu juures gaasi rõhumine suureneb, võrreldes selle rõhumisega, mis gaasil on 0°C juures, kui tema temperatuur tõuseb 1°C võrra.

²⁾ D. Berthelot' järgi vastab 0°C temperatuurile absoluutne temperatuur $273,09^\circ$, seega 100°C vastab $373,09^\circ \text{K}$.

on 273 absoluutkraadi madalamal jää sulamise temperatuurist ehk, mis sama, termodünaamilise astmiku nullpunkt Celsiuse astmiku järgi vastab temperatuurile -273°C . Termodünaamilise astmiku nullpunkti nimetatakse absoluutseks nullpunktiks.

Eeltoodust järeldame, et ideaalse gaasiga töötava gaastermomeetri astmiku ühekraadiline temperatuuri-intervall ühtub termodünaamilise astmiku ühekraadilise temperatuuri-intervalliga, mille tõttu gaastermomeetri astmiku järgi arvutatud temperatuure nimetatakse ka sajakraadi-süsteemilisteks termodünaamilisteks temperatuurideks.

Reaalsed gaasid, nagu teada, erinevad oma omadustega teataval määral ideaalsest gaasist. Nimelt tuleb reaalseste gaaside juures arvestada kahe sugust soojuspaisumis-koefitsienti: soojuspaisumis-koefitsienti jääva rõhumise juures α_v ja termilise rõhumise koefitsienti α_p , s. o. soojuspaisumis-koefitsienti jääva mahu juures. Mõlemad koefitsiendid olenevad gaasi iseloomust, temperatuurist ja rõhumisest. Ideaalsel gaasil on need koefitsiendid võrdsed ja ei olene temperatuurist ega rõhumisest, s. o. $\alpha_v = \alpha_p = \alpha$.

Henningi ja Heuse järgi võib koefitsiente α_p ja α_v teatavas rõhumis-intervallis siduda olenevalt rõhumisest vahetõrjadega:

	$10^7 \alpha_p$	$10^7 \alpha_v$
Heelium	36604-4b	36604-19b
Vesinik	36604+17b	36604-12b
Lämmastik ja õhk	36604+134b	36604+127b

kus b on gaaside rõhumine mõõdetuna elavhõbedasamba kõrgusega meetrites. Eelantud vahetõrjadade võrdluseks katsete tulemustega on tabelis 5 ja 6 antud Regnault' uurimused õhu α_p ja α_v muutumise kohta vastavalt rõhumisele 0°C juures.

Tabel 5. Õhu termilise rõhumise koefitsiendi α_p väärtused.

Rõhumine mm Hg	α_p	
	Regnault' järgi	Võrrandi järgi $\alpha_p = 10^{-7}(36604 + 134b)$
109,72	0,003 648 2	0,003 661 9
174,36	0,003 651 3	0,003 662 7
266,07	0,003 654 2	0,003 664 0
374,67	0,003 658 7	0,003 665 4
760,00	0,003 665 0	0,003 670 6
1678,40	0,003 676 0	0,003 682 9
2144,14	0,003 689 4	0,003 689 1
3655,56	0,003 709 1	0,003 709 4

Melander'i uurimuste järgi õhu ja vesiniku puhul α_p (rõhumiste juures allpool harilikku õhkkonna rõhumist) väheneb ühes rõhumisega kuni teatava miinimumini (õhu puhul 170 mm), mille järel hakkab uuesti suurenema. Amagat' järgi jääb α_p vesiniku jaoks peagu konstantseks kuni 700 Atm rõhumiseni, suurema rõhumise juures α_p väheneb kuni 1800 Atm, mille järel ta muutub uuesti konstantseks kuni rõhumiseni 2800 Atm. Õhu, lämmastiku

T a b e l 6. Õhu soojuspaisumis-koefitsiendi α_v väärtused.

Rõhumine mm Hg	α_v	
	Regnault' järgi	Võrrandi järgi $\alpha_v=10^{-7} (36604+127b)$
109		0,003 661 8
760	0,003 665 0	0,003 670 1
3 844,3	0,003 724 2	0,003 709 2
6 505,3	0,003 768 8	0,003 743 0
10 355,4	0,003 782 5	0,003 791 6
10 879,7	0,003 798 4	0,003 798 6
12 833,2	0,003 797 9	0,003 823 4
14 248,5	0,003 842 2	0,003 841 5

ja hapniku puhul α_p suureneb ühes rõhumisega kuni teatava maksimumini, mille järel ta edaspidise rõhumise suurenemisel hakkab vähenema. Lämmastiku jaoks on selleks piiriks 400 Atm ja hapniku jaoks 600 Atm.

Samuti uuris Amagat α_v muutumist vastavalt rõhumisele ja leidis, et vesiniku jaoks α_v pidevalt väheneb rõhumise suurenemisega, omades 0° kuni 100° C temperatuuri ja 1000 Atm rõhumise juures väärtust 0,00218. Õhu, lämmastiku ja hapniku α_v suureneb ühes rõhumisega kuni teatava maksimumini, mille järel hakkab vähenema.

α_p ja α_v olenevust temperatuurist on ka uuritud paljude teadlaste poolt. Regnault' katsete järgi α_p õhu ja süsihappegaasi jaoks ei olene temperatuurist. Chappuis aga leidis, et α_p samade gaaside jaoks oleneb temperatuurist, nagu näitavad tabeli nr. 7 arvud.

T a b e l 7.

Temperatuur $^\circ\text{C}$	Lämmastik α_p	Süsihappegaas (CO_2) α_p
$0^\circ-20^\circ$	0,003 676 41	0,003 732 75
$0^\circ-40^\circ$	0,003 675 67	0,003 730 29
$0^\circ-100^\circ$	0,003 674 66	0,003 724 77

Jaquero d ja Perot (1904—1905) määrasid õhu, lämmastiku ja hapniku α_p keskmised väärtused temperatuuri-intervallis $0^\circ-1067,4^\circ$ C (kulla sulamise temperatuur). Nende keskmiste väärtuste arvsuurused on antud tabelis nr. 8.

T a b e l 8.

	Algrõhumine 0°C juures mm Hg	α_p
Õhk	230	0,003 664 3
Lämmastik	200—230	0,003 664 3
Hapnik	180—230	0,003 665 4

Witkowsky poolt on uuritud α_v väärtusi õhu jaoks kaunis madalate temperatuurideni. Tema katsetest järeldub, et α_v suureneb temperatuuri langusega, nagu seda näitavad tabelis nr. 9 antud α_v väärtused.

T a b e l 9. α_v väärtused õhu jaoks.

Õhurõhk Atm	Temperatuur °C				
	100°	16°	—35°	—103,5°	—140°
15	0,00379	0,00382	—	—	0,00420
30	0,00392	0,00398	—	0,00434	0,00492
50	0,00410	0,00419	0,00430	0,00487	—
100	0,00441	0,00458	0,00489	0,00579	—
120	0,00449	0,00465	0,00501	0,00577	—

Õhkkonnas esinevate temperatuuride juures on, olenevalt õhurõhumisest ja temperatuurist, α_p ja α_v arvulistes suurustes lahkuminekuid peamiselt kümnendmurru 6. kohas. Seega võime ilma suuremat viga tegemata praktiliste küsimuste lahendamisel võtta õhu jaoks koefitsientide α_p ja α_v keskmiseks väärtuseks ideaalse gaasi paisumise koefitsiendi, s. o.

$$\alpha_p = \alpha_v = \alpha = \frac{1}{273} = 0,003\ 663 \dots (5)^1).$$

Eeltoodud uurimusi arvesse võttes järeldame, et reaalse gaasiga töötava gaastermomeetri järgi arvutatud temperatuurid erinevad tõelikkudest termodünaamilistest temperatuuridest, kusjuures see erinevus on seda väiksem, mida lähedasem on antud gaas ideaalsele gaasile. Järelikult, tähistades gaastermomeetri järgi arvutatud temperatuuri tähega t' ja sellele vastava sajakraadi-süsteemilise termodünaamilise temperatuuri tähega t , võime kirjutada korrektsioonivalemi

$$t = t' + \varepsilon \dots (6),$$

kus ε on gaastermomeetri järgi arvutatud temperatuurile vastav korrektsioon, mille väärtused antakse sellekohastes tabelites vastavalt gaastermomeetri tüübile ja termomeetris töötava gaasi omadustele. Korrektsioonid ε on, eriti vesiniku ja heeliumiga töötavate termomeetrite jaoks, niivõrd väikesed, et neid harilikku mõõtmiste puhul ei arvestata, kuna nad ei ületa gaastermomeetri käsitlemisel esinevaid eksperimentaalseid vigu. Tabelis 10 on antud ε väärtused vesinikuga ja õhuga või lämmastikuga ning konstantse mahuga ja konstantse rõhuga töötavate gaastermomeetrite jaoks.

¹⁾ Vahel võetakse õhu paisumise koefitsient võrdseks

$$\alpha_p = \alpha_v = \frac{1}{272,85} = 0,003665.$$

Tabel 10¹⁾. Gaastermomeetri korrektsioonid ε .

t'	Konstantse mahuga termomeeter		Konstantse rõhuga termomeeter	
	Vesinik	Õhk või lämmastik	Vesinik	Õhk või lämmastik
-200°	+0,07°	+0,52°	+0,25°	+5,42°
-100	0,02	0,05	0,02	0,46
0	0	0	0	0
50	0,000	-0,009	-0,001	-0,024
100	0	0	0	0
200	+0,003	+0,046	+0,005	+0,11
300	0,007	0,114	0,01	0,27
400	0,013	0,194	0,02	0,46
500	0,02	0,280	—	0,65
800	0,04	0,56	—	1,25
1000	0,05	0,77	0,07	1,65

Gaastermomeetrid.

Füüsikast teame, et gaaside maht konstantse rõhumise juures on võrdeline gaaside temperatuuriga ja et konstantse mahu puhul gaaside rõhk on samuti võrdeline temperatuuriga, kusjuures gaaside rõhu või mahu arvutamisel vastavalt temperatuurile tuleb aluseks võtta rõhk või maht, mida gaas omab 0° C temperatuuril. Tähistades gaasi soojuspaisumis-koefitsiendi konstantse rõhumise juures tähega α_v ja termilise rõhumise koefitsiendi tähega α_p , võime eelnimetatud seadused matemaatiliselt avaldada kujul:

$$v_1 = v_0 (1 + \alpha_v t_1) \dots \dots \dots (7),$$

$$p_1 = p_0 (1 + \alpha_p t_1) \dots \dots \dots (8),$$

kus v_0 ja p_0 on gaasi maht ja rõhuline 0° C juures ja v_1 ning p_1 gaasi maht ja rõhuline t_1 ° C temperatuuril. Lahendades võrrandid (7) ja (8) temperatuuri t_1 suhtes, leiame:

$$t_1 = \frac{v_1 - v_0}{\alpha_v v_0} \dots \dots \dots (9),$$

$$t_1 = \frac{p_1 - p_0}{\alpha_p p_0} \dots \dots \dots (10).$$

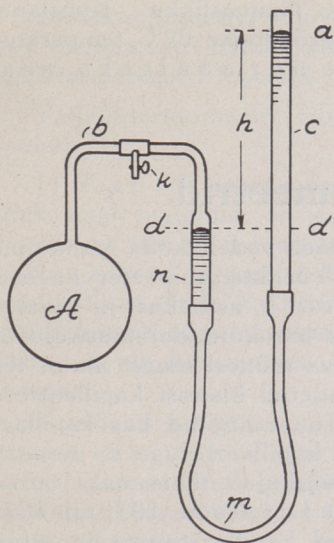
Nendel võrranditel põhjenebki temperatuuri määramine gaastermomeetriga.

Võrrandi (9) järgi temperatuuri arvutamiseks määratakse gaastermomeetris gaasi maht v_0 temperatuuril 0° C. Selle järel määratakse maht v_1 , asetades termomeetri keskkonda, mille temperatuuri tahetakse mõõta, lastes seal termomeetris asetseval gaasil paisuda sama rõhu all, nagu see toimus

¹⁾ D. Berthelot, Trav. et Mém. du Bur. int. XIII 1907; Cath. u. Kam. Onnes, Arch. néerl. 6, 1. 1922.

v_0 määramise puhul. Teades koefitsiendi α_v väärtust, saame määrata ka antud keskkonna temperatuuri. Sellel printsiibil töötavat termomeetrit nimetatakse konstantse rõhuga gaastermomeetriks. Konstantse rõhuga termomeetritele eelistatakse nn. konstantse mahuga gaastermomeetrit, millega temperatuuri määramine põhjeneb võrrandil (10).

Konstantse mahuga gaastermomeeter (joon. 9) koosneb kuiva gaasiga täidetud, klaasist, portselanist või metallist valmistatud kera- või silindrikujulisest balloonist A , mis kapillaartoru b kaudu on ühendatud elavhõbemanomeetriga. Ballooni A täitmine gaasiga toimub kraani k kaudu. Manomeeter



Joon. 9.

koosneb püstloodis asetsevatest klaastorudest n ja c , mis on omavahel ühendatud kummist toruga m . Manomeetri abil on võimalik hoida balloonis A asetseva gaasi mahtu konstantsena, tõstes või langetades manomeetri haru c vastavalt gaasi rõhumisele nõnda, et elavhõbeda nivoo $d-d$ asuks alati toru n seinale tehtud kriipsu kohal. Nivoode $a-a$ ja $d-d$ vaheline kõrgus h määrab balloonis A asetseva gaasi rõhumise õhkkonna rõhumise suhtes.

Antud keskkonna temperatuuri määramiseks asetatakse termomeetri balloon A esiteks keskkonda, mille temperatuur on 0°C (sulavasse jäässe), et gaas omandaks temperatuuri 0°C . Selle temperatuuri juures asetatakse ballooni nii palju antud kuiva gaasi, et gaas oleks, arvates absoluutsest tühjusest, rõhumise all p_0 , mis tavaliselt praktiliste kaalutluste kohaselt on $p_0 = 1000 \text{ mm Hg}$. Järelikult peab selle tingimuse täitmiseks manomeetri elavhõbeda nivoode vahelise kõrguse h_0 arvutama võrrandiga $h_0 = 1000 - b$, kus b on õhkkonna baromeetriline rõhuline millimeetrites termomeetri kõrgusel ¹⁾.

Kui gaastermomeeter on eelkirjeldatud viisil korraldatud, asetatakse termomeetri balloon A keskkonda, mille temperatuuri tahetakse määrata, kusjuures manomeetri haru c kõrgust reguleeritakse sääraselt, et elavhõbeda nivoo $d-d$ asetseks toru c seinale tehtud kriipsu kohal, millega saavutame gaasi mahu muutumatuse. Kui balloonis A asetsev gaas on omandanud antud keskkonna temperatuuri, määratakse elavhõbeda tasemete vaheline kõrgus h_1 ja selle järgi arvutatakse gaasi rõhuline p_1 võrrandiga

$$p_1 = b_1 + h_1,$$

kus b_1 on õhkkonna baromeetriline rõhuline termomeetri kõrgusel ¹⁾. Teades p_0 , p_1 ja gaasi termilise rõhumise koefitsiendi α_p väärtusi, on võimalik arvutada rõhumisele p_1 vastavat temperatuuri t_1 .

¹⁾ Täpsete mõõtmiste puhul peab rõhumised taandatama normaaltingimustesse.

Teostades temperatuuri t_1 arvutamist võrrandiga (10), teeksime võrdlemisi tunduva vea, sest võrrandis (10) ei ole arvestatud ballooni ja kapillaartoru mahu muutumist vastavalt temperatuurile. Temperatuuri t_1 arvutamiseks täpset võrrandit ei hakka me siin tuletama, kuna sel edaspidise kohta ei ole tähtsust.

Gaastermomeetris tarvitatakse töötavaks kehaks vesinikku ja heeliumi, sest need gaasid, eriti heelium, on kaunis lähedased ideaalsele gaasile. Temperatuuride jaoks üle 100°C vesinikku harilikult ei tarvitata, kuna ta juba 300°C temperatuuril muutub keemiliselt aktiivseks ja omab suurt difusiooni. Sellevastu heelium kõrges kuumuses ei ole keemiliselt aktiivne, on difusioonikindel ja oma madala keemispunkti tõttu ulatub peagu üle terve termodünaamilise temperatuuri-astmiku. Peale vesiniku ja heeliumi tarvitatakse gaastermomeetri töötavaks kehaks ka õhku ja lämmastikku. Konstantse

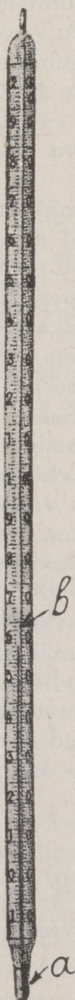
mahuga vesiniktermomeetrit, mille algrõhumine 0°C temperatuuril on $p_0 = 1000\text{ mm Hg}$, nimetatakse normaalseks vesiniktermomeetriks.

Vedeliktermomeetrid.

Vedeliktermomeetri ehitus põhjeneb vedelikkude mahu muutumisel vastavalt temperatuurile. Vedeliktermomeeter koosneb tundmikust a (joon. 10), kapillaartorust b , astmikust ja väliskesktast. Tundmik on kera-, silindri- või harukordadel muukujuline, vedelikuga täidetud, klaasist või harva mõnest muust aineist tehtud reservuaarike, mille külge on joodetud klaasist kapillaartoru. Temperatuuri-astmiku jaotuskriipsud on märgitud kas kapillaartorule või eraldi astmikule, mis ühes kapillaartoruga on monteeritud vastavakujulisse väliskesta. Väliskujult tähtsamaks termomeetri liigiks on *kepptermomeeter* (joon. 10), mis kujutab endast klaastoru, sissemonteeritud kapillaartoruga ja astmikuga ning külgejoodetud tundmikuga. Termomeetrivedelikuks tarvitatakse elavhõbedat, alkoholi, toluooli ja erilisel madalate temperatuuride mõõtmiseks — pentaani. Vedeliktermomeetriga temperatuuri määramine toimub vedeliku näiliku paisumise mõjul kapillaartorru tungiva vedeliku samba taseme järgi ehk, mis sama, kapillaartorru tungiva vedeliku samba pikkuse järgi. Vedeliku-samba pikkus antud temperatuuri jaoks sõltub kapillaartoru läbimõõdust ja vedelikureservuaarikese mahust. Mida väiksem on kapillaartoru läbimõõt ja mida suurem on vedelikureservuaarikese maht, seda pikem on antud temperatuuri-intervalli jooks kapillaartorus vedelikusamba taseme teekond ja loomulikult seda suurema täpsusega saab määrata temperatuuri, sest astmiku jaotised on sel puhul pikemad. Üldiselt oleneb termomeetri konstruktiivne külg nõuetest, mida ühel või teisel juhul termomeetrile esitatakse.

Vedeliktermomeetrite põhireeperiteks on puhta jää sulamise temperatuur 760-mm elavhõbedasamba rõhumise juures ja samale rõhumisele vastav puhta keeva vee aurude temperatuur.

Joon. 10. Astmiku jagamiseks asetatakse termomeeter keeva vee aurudesse



ja tehakse astmikule, kapillaartorus asetseva vedelikusamba taseme kohale, vastav kriips (100°C). Selle järel asetatakse termomeeter sulavasse jäässe ja märgitakse astmikule sellele temperatuurile vastava vedelikusamba taseme asukoht (0°C). Nende kriipsude vahe jagatakse astmikul saajaks võrdseks osaks, pikendades nõudekohaselt astmiku jagamist niisama suurteks osadeks nii ülespoole 100° kui ka allapoole 0° . Alkohol-, toluool- ja pentaantermomeetritel allpool 0°C on põhireeperiks võetud 760-mm elavhõbedasamba rõhumisel toimuv süsihappegaasi keemise temperatuur, mis normaalse vesiniktermomeetri järgi vastab temperatuurile $-78,5^{\circ}\text{C}$.

Eelkirjeldatud viisil gradueeritud vedeliktermomeetri astmiku järgi määratud temperatuurid erinevad tunduvalt tõelistest temperatuuridest, s. o. sajakraadi-süsteemilistest termodünaamilistest temperatuuridest. See nähtus vedeliktermomeetri juures on tingitud paljudest põhjustest, mis mõjutavad termomeetri näitamistäpsust. Tõelise temperatuuri leidmiseks vajavad vedeliktermomeetri lugemid rida korrektsioone.

Vedeliktermomeetri täpsust mõjutavateks põhjusteks on alljärgnevad asjaolud:

1) Kapillaartoru geomeetiline kuju. Termomeetri astmik, nagu mainitud, on jagatud lineaarselt võrdseteks osadeks. Kapillaartoru õõnsus aga ei moodusta kunagi täpset silindrilist ruumala ning seega astmiku jaotised ei jaga tema mahtu võrdseteks osadeks, nagu see peaks olema. Kuna vedeliku näilik paisumine on võrdeline temperatuuriga, siis vedelikutaseme edasipaigutumine kapillaartorus võrdsetes temperatuuriintervallides ei ole konstantne. Sellest ongi tingitud termomeetri lugemi teatav viga.

Kapillaartoru õõnsuse ebasilindrilikkusest tingitud viga leitakse nn. termomeetri kalibreerimisega, mis seisab selles, et termomeetri kapillaartoru mahu täpse uurimisega leitakse termomeetri lugemile kapillaartoru ebasilindrilikkusest tingitud korrektsioon. Parandades termomeetri lugemist mainitud korrektsiooniga, saame termomeetri lugemi kapillaartoru mahu võrdjaotusliku ehk nn. ideaalse astmiku järgi.

2) Vedeliku ja tundmiku (vedelikureservuaarikese) vahelistest mõjutustest sõltumatud füüsikalised omadused.

a) Vedeliku kapillaarne depressioon. Kapillaarse depressiooni tõttu on vedelik nii tundmikus kui ka kapillaartorus kokku surutud, mille tõttu vedeliku tase asetseb kapillaartorus oma õigest asendist veidi madalamal. Kapillaarsusest tingitud viga on seda suurem, mida väiksem on kapillaartoru läbimõõt, sest toru läbimõõdu vähenemisega suureneb kapillaarne depressioon. Nähtusel on rohkem teoreetiline tähtsus, kuna praktiliselt see arvestamist ei vaja.

b) Kapillaartoru seinte märgumine. Kapillaartoru seinte märgumisest tingitult osa vedelikku jääb toru seintele ning seega tekib lugemisse teatav viga. Seda viga ei ole elavhõbetermomeetritel, sest toru seinad elavhõbedaga ei märgu.

c) Tundmiku soojusmahtuvusest tingitud näitamise hilinemine.

Tundmikul ja temas asetseval vedelikul on teatav soojusmahtuvus. Seega keskkonnas, mille temperatuuri mõõdetakse, temperatuuri muutumise puhul ei tundmik ega vedelik suuda kohe anda ära või neelda nii palju soojust, et nad omandaksid kohe keskkonna temperatuuri, ja selle tõttu antud momendil nende paisumine ei vasta keskkonna temperatuurile. Seega termomeetri näitamine hilineb, s. o. jääb maha tõelisest temperatuurist. Sellest nähtusest tingitud vea suurus oleneb vedeliku ja tundmiku materjali soojusjuhtivusest, nende massist, keskkonna soojusjuhtivusest, mille temperatuuri määrame, ja keskkonna temperatuuri muutumise kiirusest. Vea võib arvata võrdseks nulliga, kui keskkonnas, mille temperatuuri määrame, temperatuuri muutumise kiirus ei ületa antud termomeetri jaoks kindlaks määratud piire. Peale vedeliktermomeetrite esineb hilinemisviga ka kõigil muudel termomeetritel ja termograafidel.

d) Tundmiku mahu progressiivne vähenemine. Tundmiku termilise valmistamise järel toimuvad tundmiku klaasis molekularsed ümberpaigutumised, mis põhjustavad tundmiku mahu vähenemist ja kutsuvad esile peareeperite (0° ja 100°) pidevat ülespoole-nihkumist, millega ühtlasi ka teised jaotised muudavad oma asupaika. See nähtus kestab palju aastaid peale tundmiku valmistamist. Järelikult vajavad vedeliktermomeetrid aeg-ajalt peareeperite kontrollimist.

3) Vedeliku ja tundmiku välistest mõjutustest sõltuvad füüsikalised omadused.

a) Termomeetri peareeperite ajutine nihkumine. Termomeetri soojenemise ja sellele järgneva jahtumise järel, tingitult klaasis esinevatest termilistest järelmõjudest, ei saavuta tundmik oma endist madalama temperatuuri juures olnud mahtu mitte kohe, vaid alles teatava aja möödumisel. See esialgne maht, mida tundmik omab peale jahtumist, on veidi suurem mahust, milleni ta hiljem kokku tõmbub, mille tõttu esinebki, vastavalt mahtude vahele, termomeetri peareeperite ajutine allapoole-nihkumine. Analoogiline nähtus esineb, kui tundmiku temperatuur väga madalalt temperatuurilt tõuseb kõrgema temperatuurini. Sel puhul tundmiku maht on veidi väiksem mahust, milleni ta paisuks teatava aja möödumisel; selle tagajärjel termomeeter näitab ajutiselt veidi kõrgemat temperatuuri vastavalt tundmiku mahtude vahele. Järelikult termomeetri soojenemisel või jahtumisel peareeperid nihkuvad ära oma õigest asendist, mille tõttu termomeetri näitamine vajab korrektsiooni. Selle korrektsiooni suurus oleneb kapillaartoru ja tundmiku klaasi sordist. Heade klaasisortide puhul ei ole korrektsioon suur, nagu nähtub tabelist nr. 11, kus on antud mõne termomeetriklaasi-sordi jaoks nullpunkti allanihkumised termomeetri jahtumisel temperatuurilt 100°C kuni 0°C .

Tabel 11. Termomeetri nullpunkti ajutine nihkumine.

Klaasisort	Nullpunkti allanihkumine $^{\circ}\text{C}$
Jena klaas 16 ^{III}	0,04 — 0,08
„ klaas 59 ^{III}	0,03 — 0,04
„ klaas 1565 ^{III}	0,01
Kuumendatud Jena klaas	0,03
Kõva prantsuse klaas (verre dur)	0,07 — 0,11

Rahvusvahelise Kaalude ja Mõõtude Büroo uurimused näitavad, et nullpunkti allanihkumine kaob seda kiiremini, mida kõrgem oli termomeetri temperatuur enne tema asetamist nulltemperatuuri (sulavasse jäässe). Sellest tingitult termomeetri peareeperite kontrollimisel kontrollitakse enne vee keemispunkt ja selle järel kohe nullpunkt. Sama büroo katsetega selgus, et termomeetri põhireeperite ajutine nihkumine on väiksem, kui valmis termomeetreid pikaajaliselt (mitu nädalat) kuumendada väavli, elavhõbeda või kadmiumi aurudes. Kuumendatud prantsuse termomeetrid on varustatud pealkirjaga „recuit“.

b) Tundmiku elastne deformeerumine välisrõhu mõjul. Tundmikule mõjuv välisrõhumine kutsub esile vedelikusamba teatava tõusu kapillaartorus. Selle korrektsiooni Δt väärtus avaldub valemiga

$$\Delta t = -\beta_e (b - 760) \dots \dots \dots (11),$$

kus b on tundmikule mõjuv välisrõhumine mm Hg ja β_e teatav koefitsient, mille väärtus kõigub $0,0001^\circ \text{C}$ ja $0,0004^\circ \text{C}$ vahel.

Valemist (11) nähtub, et korrektsioonil Δt on miinusmärk, kui tundmikule mõjuv rõhumine b on üle 760 mm Hg, ja plussmärk —, kui b on alla 760 mm Hg. Korrektsioon on võrdne nulliga, kui $b = 760$ mm Hg.

Näide 2.

Õhkonna baromeetiline rõhumine $b = 450$ mm Hg, koefitsient $\beta_e = 0,00025$, korrektsioon Δt valemi (11) järgi on siis:

$$\Delta t = -0,00025 (450 - 760) = 0,08^\circ \text{C}.$$

c) Kapillaartorus asetseva vedelikusamba rõhumisest tingitud tundmiku elastne deformatsioon. Kapillaartorus asetseva vedelikusamba rõhumise mõjul teataval määral suureneb tundmiku maht, mille tagajärjel vedelikusamba tase langeb veidi madalamale. Sellest nähtusest tingitud korrektsioon $\Delta_1 t$ avaldub valemiga

$$\Delta_1 t = \beta_1 l_t \frac{\gamma_t}{\gamma_0} \sin \alpha \dots \dots \dots (12),$$

kus γ_t on vedeliku erikaal temperatuuril t , γ_0 — vedeliku erikaal temperatuuril 0°C , α — nurk kapillaartoru telje ja horisontaali vahel, l_t — temperatuurile t vastav vedelikusamba pikkus kapillaartorus, arvates tundmiku keskpunktist, ja β_1 — koefitsient, mille väärtus on $\beta_1 = \beta_e + 0,0000154$. Vedelikusammas oma rõhu tõttu on veidi kokku surutud, millest on tingitud see, et β_1 on suurem kui β_e .

Valemist (12) nähtub, et korrektsioon $\Delta_1 t$ on võrdne nulliga, kui termomeetri kapillaartoru asetseb horisontaalselt, sest siis on $\sin \alpha = 0$.

4) Termomeetriveredeliku ja tundmiku paisumine. Vedeliktermomeetris kapillaatorru tungiva vedelikusamba maht on funktsionaalne suurus temperatuurist ja peale selle veel vedeliku näiliku paisumise koefitsiendist α' , mis võrdub vedeliku tõelise paisumise koefitsiendi α'' ja tundmiku paisumise koefitsiendi β' vahega, s. o.

$$\alpha' = \alpha'' - \beta' \dots \dots \dots (13).$$

Ei α'' ega β' ole konstantsed suurused, vaid sõltuvad teataval määral temperatuurist. Termomeetri lugemid, tingitult α'' ja β' muutumisest, vajavad, välja arvatud põhireeperid, tõeliste temperatuuride leidmiseks korrigeeringuid.

5) Termomeetri lugemi sõltuvus termomeetri asetusest keskkonna suhtes. Kui antud keskkonna temperatuuri määramisel termomeetri vedelikusammas kapillaartorus ei asetse üleni mõõdetavas keskkonnas, vaid ulatub sealts välja, ning väljaspool temperatuur erineb mõõdetava keskkonna temperatuurist, siis vedelikusamba pikkus kapillaartorus erineb sellest pikkusest, mida vedelikusammas omaks sel puhul, kui ta asetseks täielikult mõõdetavas keskkonnas. Selle nähtuse põhjuseks on, et väljaspool asetsev vedelikusammas kui ka kapillaartoru paisuvad vastavalt välistemperatuurile. Väljapoole ulatuva vedelikusamba pikkusele vastava korrektsiooni δ leiame valemiga

$$\delta = kn(t - t_s) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14),$$

kus t on tundmiku temperatuur, mis esimesel lähenemisel võetakse võrdseks termomeetri lugemiga, t_s — mõõdetavast keskkonnast väljaulatuva termomeetriverdeliku samba keskmine temperatuur, mis määratakse kindlaks teise termomeetriga, mille tundmik asetseb vedelikusamba väljaulatuva osa keskkohal, n — vedelikusamba väljaulatuva osa pikkus temperatuurikraadides ja k — vedeliku näiliku paisumise koefitsient, mille väärtus on vedelikust ja klaasisordist.

Tabelis 12 on antud k väärtused elavhõbe-termomeetrite jaoks vastavalt klaasisordile. Tabelist leitakse k temperatuuride t ja t_s keskmise aritmeetilise, s. o. temperatuuri $\frac{t+t_s}{2}$ järgi.

Tabel 12. Termomeetri elavhõbeda näiliku paisumise koefitsient.

Keskmine temperatuur	K l a a s i s o r t				
	Verre dur	Jena kl. 16 ^{III}	Jena kl. 59 ^{III}	Jena kl. 1565 ^{III}	Kuumutatud Jena klaas
$\frac{t + t_s}{2}$					
50	0,000 158	0,000 158	0,000 164	0,000 172	0,000 164
100	0,000 158	0,000 158	0,000 164	0,000 172	0,000 164
150	0,000 158	0,000 158	0,000 165	0,000 173	0,000 165
200	0,000 159	0,000 159	0,000 167	0,000 175	0,000 167
250		0,000 161	0,000 170	0,000 177	0,000 171
300		0,000 164	0,000 174	0,000 180	0,000 174
350			0,000 177	0,000 184	0,000 178
400			0,000 182	0,000 188	0,000 182
450			0,000 187	0,000 194	0,000 188
500			0,000 195	0,000 200	0,000 195

Näide 3.

Vee keemise temperatuuri määramisel on Jena klaasist 1565¹¹¹ elavhõbetermo-
meeter asetatud vette kuni astmiku $+20^{\circ}\text{C}$ jaotiseni. Leida parandus δ , kui termomeeter
näitab temperatuuri $t = 99,5^{\circ}\text{C}$ ja väljaulatuva vedelikusamba keskmine temperatuur

on $t_s = 30^\circ\text{C}$. Antud juhul $n = 99,5 - 20 = 79,5$ ja $\frac{t + t_s}{2} = \frac{30 + 99,5}{2} = 64,7$, millele tabelis 12 vastab koefitsient $k = 0,000172$, seega valemi (14) järgi on parandus

$$\delta = kn(t - t_s) = 0,000172 \cdot 79,5 (99,5 - 30) = 0,95^\circ.$$

Parandatud temperatuur on

$$99,5^\circ + 0,95^\circ = 100,45^\circ\text{C}.$$

Kõrgete temperatuuride puhul tuleb arvutada veel teine lähenemine, võttes tundmiku temperatuuri võrdseks $t + \delta$.

Termomeetrite kompareerimine (tareerimine).

Eespool nägime, et vedeliktermomeeter vajab oma lugemite ühtlustamiseks vesinik- või heeliumtermomeetri lugemitega terve rea korrektsioone. Praktiliselt saadakse sellest üle sel teel, et antud termomeetri lugemeid võrreldakse n. n. normaaltermomeetriga, s. o. termomeetriga, mille iga lugemi jaoks on teada vastav korrektsioon lugemi ühtlustamiseks vesinik- või heeliumtermomeetri omaga. Need korrektsioonid on saadud võrdlusandmete põhjal ja on koondatud teatud termomeetri jaoks vastavasse korrektsioonitabelisse või -diagrammi. Korrektsioonid on antud tavaliselt termomeetri vertikaalse asendi jaoks ja taandatud normaalarhümisele (760 mm Hg). Peale tabelist või diagrammist saadud korrektsiooni tuleb lugemit veel parandada eelmise peatüki punktides 2c, 3b, 3c ja 5 antud korrektsioonidega.

Termomeetrite võrdlemine normaaltermomeetriga toimub n. n. komparaatorites, kus on võimalik antud keskkonna temperatuuri nõudekohaselt muuta või konstantsena hoida.

Normaaltermomeetriteks tehnikas tarvitatakse plaatinast elektrilisi takistustermomeetreid ja mitmesuguseid termoelemente (vt. „Rahvusvaheline temperatuuri-astmik“). Füüsikakabinettides tarvitatakse peagu eranditult normaal-elavhõbetermomeetreid ja nende moodustamiseks on kaks võimalust:

1) Antud elavhõbetermomeeter kompareeritakse (võrreldakse) kas normaalse vesiniktermomeetriga või mõne täpse normaaltermomeetriga.

2) Termomeeter valmistatakse kindlate reeglite järgi kindlatest klaasisortidest, millede kohta on teada iga lugemi jaoks vastav korrektsioon. Tabelis 13 on antud näitena Jena klaasidest valmistatud kepp-elavhõbetermomeetrite lugemid nende ideaalastmiku järgi, vastavalt normaalse vesiniktermomeetri lugemitele. Tabeli andmed on kehtivad termomeetrite jaoks, millede kapillaartoru on gaasitühi näitamise intervalli puhul 0° kuni 100° . Näitamise intervalli puhul 100° kuni 300° peab kapillaartoru olema gaasitühi või võib sisaldada vähesel määral gaasi (rõhumine mitte üle 0,5 at). Näitamise ulatuse puhul üle 300° on kapillaartoru täidetud kuni 30 at rõhu all oleva, elavhõbeda suhtes neutraalse gaasiga, et tõsta elavhõbeda keemispunkti, sest normaalarhümisel elavhõbe keeb juba 357°C temperatuuril.

Tabel 13. Elavhõbetermomeetri astmiku võrdlus normaalse vesiniktermomeetri astmikuga.

Temperatuur vesinik- termomeetri järgi °C	Temperatuur elavhõbetermomeetri järgi °C.			
	Jena klaas 16 III	Jena klaas 59 III	Jena klaas 1565 III	Kuumenda- tud Jena klaas
— 30	— 30,28	— 30,13		
— 20	— 20,16	— 20,07		
— 10	— 10,07	— 10,03		
0	0,00	0,00	0,00	0,00
+ 10	+ 10,06	+ 10,02	+ 10,03	
20	20,09	20,04	20,05	
30	30,11	30,04	30,06	
40	40,12	40,03	40,06	
50	50,12	50,03	50,05	
60	60,10	60,02	60,04	
70	70,08	70,01	70,03	
80	80,06	80,00	80,02	
90	90,03	89,98	90,01	
100	100,00	100,00	100,00	100,00
150	149,99	150,23	150,04	
200	200,29	200,84	200,90	201,13
250	251,1	252,2	252,1	252,6
300	302,7	304,4	303,9	305,1
350		358,0	356,6	358,6
400		412,6	410,5	413,5
450		468,8	465,9	470,0
500		526,9	523,1	528,4
550			582	589
600			644	
650			708	
700			775	

Tabelis 14 on antud Jena klaasist 16^{III} valmistatud, pentaaniga, toluooliga ja alkoholiga täidetud termomeetrite ideaalastmikule taandatud lugemite võrdlus normaalse vesiniktermomeetri lugemitega.

Tabel 14. Pentaan-, toluool- ja alkoholtermomeetri astmiku võrdlus normaalse vesiniktermomeetri astmikuga.

Vesinik- termomeeter °C	Pentaan- termomeeter °C	Toluool- termomeeter °C	Alkohol- termomeeter °C
— 200	— 174,2		
— 190	— 166,6		
— 180	— 159,0		
— 170	— 151,4		
— 160	— 143,8		
— 150	— 136,1		
— 140	— 128,4		
— 130	— 120,6		
— 120	— 112,7		
— 110	— 104,7		
— 100	— 96,6		
— 90	— 88,3		
— 80	— 79,8		

Vesinik- termomeeter °C	Pentaan- termomeeter °C	Toluool- termomeeter °C	Alkohol- termomeeter °C
— 78,5	— 78,5	— 78,5	— 78,5
— 70	— 71,0	— 70,4	— 70,3
— 60	— 62,0	— 60,8	— 60,6
— 50	— 52,6	— 51,1	— 50,7
— 40	— 43,0	— 41,2	— 40,9
— 30	— 32,9	— 31,2	— 30,9
— 20	— 22,4	— 21,0	— 20,8
— 10	— 11,5	— 10,6	— 10,5
0	0,0	0,0	0,0
+ 10	+ 12,0		
20	24,4		
30	37,6		+ 33,6
100		+ 124,4	

Elektrilised takistustermomeetrid.

Elektriline temperatuuri mõõtmine põhjeneb mõnede metallide sellel omadusel, et metalli oomiline takistus on funktsioon ainult temperatuurist ja et eritakistus ühe ja sama temperatuuri puhul omab alati sama arvvaartust, olenemata sellest, missuguse temperatuurimuutuse metall läbi teeb. Callendar'i ja Griffiths'i uurimuste järgi on temperatuuri mõõtmiseks kõige kohasem puhtast plaatinast traat, kuna plaatina oomiline takistus täpselt vastab mainitud omadustele. Temperatuuri mõõtmiseks valmistatakse plaatinatraad, dist nõudekohane spiraalikujueline takistus, mis asetatakse keskkonda, mille temperatuuri tahetakse mõõta. Lülides selle takistuse, mida edaspidi nime-tame termomeetri tundmikuks, ühendusse vastavate elektriliste mõõteriista-dega, on võimalik tundmiku takistuse järgi kindlaks määrata mõõdetava keskkonna temperatuuri. Tundmiku takistuse valik oleneb peamiselt tema töötamise tingimustest ja mõõdetava temperatuuri intervallist, ning kõigub mõnest oomist kuni 100 oomini. Konstruktiivselt koosneb tundmik ühest või kahest risti-asestsevast vilgukivilehest, millele on bifilaarselt mähitud 0,03 kuni 0,2 mm läbimõõduga plaatinatraat. Nii saadud takistusmähis kaetakse õhukese, suure soojusjuhtivusega metallkestaga, mis on kinnitatud tundmiku aluse külge.

Plaatinatraadiga tundmiku oomiline takistus temperatuuri-intervallis 0° C kuni 660° C avaldub võrrandiga

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \dots \dots \dots (15)$$

ja temperatuuri-intervallis -190° C kuni 0° C võrrandiga

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C (t - 100) t^3] \dots \dots \dots (16).$$

Platina kõlblikkuse kriteeriumiks on tingimused:

$$\frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,390 \dots \dots \dots (17),$$

$$\frac{R_{444,6}}{R_0} \geq 2,645 \quad (18),$$

$$\frac{R_{-183}}{R_0} \leq 0,25 \quad (19).$$

Valemites (15) kuni (19) on t temperatuur Celsiuse kraadides, R_0 — platinatraadi oomiline takistus 0°C temperatuuril, R_t — platinatraadi oomiline takistus temperatuuri t juures; R_{100} , $R_{444,6}$ ja R_{-183} — samad takistused normaalsel rõhumisel (760 mm Hg) toimuva vee keemise (100°C), väävli keemise ($444,6^\circ\text{C}$) ja vedela hapniku keemise (-183°C) temperatuuri juures. Suurused A , B ja C on konstandid, mis määratakse eksperimentaalselt vee, väävli ja vedela hapniku keemistemperatuuride kaudu. R_0 määratakse jää sulamise temperatuuri kaudu. Puhta plaatina puhul $A=3,978 \cdot 10^{-3}$; $B=5,8 \cdot 10^{-7}$; $C \sim 5 \cdot 10^{-12}$.

Võrranditest (15) ja (16) järeldame, et kui teada takistust R_t , on võimalik kindlaks määrata temale vastavat temperatuuri t . Takistuse R_t määramine toimub Wheatstone'i silla abil, millesse on ühe haru takistuseks lülitatud termomeetri tundmik, nagu näidatud joonisel 11 antud skeemil.

Skeemil on tähtedega R_1 ja R_2 märgitud Wheatstone'i silla konstantsed takistused, R_3 — reguleeritav, meile tuntud takistus ja R_t — termomeetri tundmik. Tundmiku takistuse R_t mää-

ramiseks reguleeritakse takistus R_3 säärseks, et galvanomeetri G osuti asetub nullile, s. o. et voolutugevus diagonaalis AB muutub võrdseks nullile ($i_0=0$). Sel puhul silla külge DA ja AC läbib ühtlane vool i_1 ning külge DB ja BC — ühtlane vool i_2 . Antud juhul ahelates DAB ja CAB on pingelange-
miste summa null, s. o. silla tippudega A ja B ühendatud voltmeeter näitab nullpinget.

Matemaatiliselt avaldub see vahekordades:

$$R_t \cdot i_1 - R_3 \cdot i_2 = 0; \quad R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot i_2 = 0.$$

Viies nendes võrrandites viimased liikmed paremale poole ja jagades nii saadud esimest võrrandit teisega, saame peale koondamist:

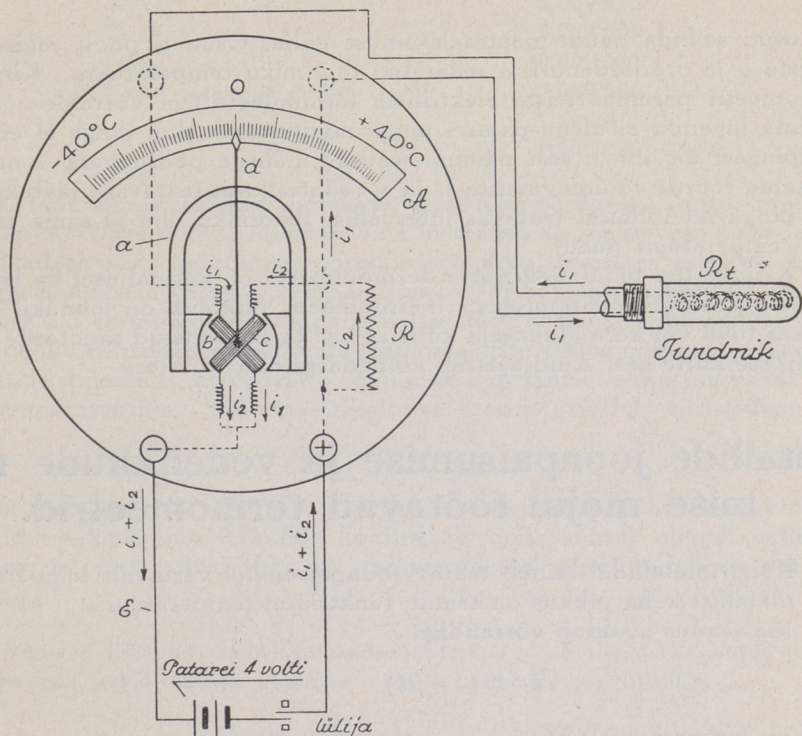
$$\frac{R_t}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (20).$$

Kuna takistused R_1 , R_2 ja R_3 on teada, saame võrde (20) järgi kindlaks määrata tundmiku takistuse R_t :

$$R_t = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (21),$$

ja R_t järgi leida temperatuuri t .

Wheatstone'i sillaga temperatuuri määramisi teostatakse peale eelkirjelatud meetodi veel mitmel muul viisil, kuid oma käsitluselt on nad kohased ainult laboratoorseteks mõõtmisteks. Käsitlusviisi lihtsuselt kui ka konstruktsioonilt ja näitamistäpsuselt osutub otstarbekohaseks kahe ristmähisega pöördkatsaga oommeetri põhimõttel töötav takistustermomeeter (Hartmann ja Braun), mille skeem on antud joonisel 12.



Joon. 12.

Termomeeter koosneb tundmikust, temperatuuri näitamise seadme ja 4-voldilisest patareist. Näitamisseadme peaosad on: loogakujuline permanentmagnet a , mille pooluste vahelises magnetiväljas võivad oma teljel vabalt keerelda kaks kindla nurga all üksteise külge kinnitatud mähist c ja b . Mähiste teljega on ühendatud osuti d , mis astmikul A näitab tundmiku takistuse R_t vastavat temperatuuri. Osutit d hoiab nullasendis mähiste b ja c teljega ühendatud spiraalvedru (mida joonisel ei ole näidatud). Näitamismehhanismi üks mähistest b on ühendatud järjestikku tundmiku takistusega R_t ja teine mähis c on ühendatud järjestikku konstantse takistusega R , mis on võrdne takistusega, mida omab tundmik jää sulamise temperatuuril.

Ühendades temperatuuri näitamise seadme patareiga (4 voolti), saame kaks vooluringi; ühe läbi tundmiku, mille voolutugevus on $i_1 = \frac{E}{R_t + R_0}$, ja

Tabel 15. Joonpaisumise keskmised
koefitsiendid 0° C kuni 100° C.

Alumiinium	0,000 024
Pronks	0,000 018
Raud ja teras	0,000 011
Kuld ja konstantaan	0,000 015
Nikkel	0,000 013
Plaatina	0,000 009
Höbe	0,000 019
Klaas, olenevalt sordist	0,000 006
	kuni
	0,000 009

plaadike, teda moodustavate metallide erinevate paisumiste tõttu, muudab oma algkuju. Ühes sellega muudab oma asukohta ka plaadikese vaba ots ja paigutab edasi mööda temperatuuriastmikku, näidates astmikul tundmiku kuju muutusele vastavat temperatuuri. Termomeetri astmikule on jaotised märgitud termomeetri kompareerimise teel normaaltermomeetriga.

Vedeliku rõhumisega töötavate termomeetrite ehitus põhjeneb teatavate vedelikkude omadusel, et vedeliku rõhumine konstantse mahu juures on võrdeline temperatuuriga. Matemaatiliselt see seadus avaldub võrrandiga

$$p = p_0 + ct \quad (23) \quad ^1$$

kus p_0 on vedeliku rõhumine 0° C juures, p — temperatuurile t vastav rõhumine ja c — keskmine termiline koefitsient, mille suurus oleneb vedeliku iseloomust ja õige vähe veel ka temperatuurist ning vedeliku algrõhumisest p_0 .

¹⁾ Võrrand (23) on saadud võrrandist (8), kus α_p on asendatud, antud temperatuuri-intervalli jaoks, vedeliku keskmise termilise rõhumise koefitsiendiga γ_t :

$$p = p_0 (1 + \gamma_t t);$$

avades sulud saame

$$p = p_0 + p_0 \gamma_t t.$$

Vedelikkudel, välja arvatud vesi, on γ_t peagu pöördvõrdeline algrõhumisega p_0 , seega nende korrutist $p_0 \gamma_t$, mis võrrandis (23) on tähistatud tähega c , võib lugeda peagu konstantseks ja ühes sellega ka olenematuks algrõhumisest p_0 , nagu see nähtub tabelist 16.

Tabel 16. $p_0 \gamma_t = c$ väärtused etüül-etri jaoks vastavalt algrõhumisele ja temperatuurile.

Algrõhumine p_0 at	Temperatuuri intervall °C									
	0—10	0—20	0—30	0—40	0—50	0—60	0—70	0—80	0—90	0—100
1	10,00	9,95	9,93	9,90	9,86	9,80	9,76	9,71	9,66	9,61
71	10,50	10,45	10,40	10,33	10,26	10,20	10,14	10,09		
150	10,80	10,75	10,73	10,65	10,62	10,57	10,51			
239	11,20	11,15	11,10	11,05	11,02	11,00	10,93			
338	11,70	11,60	11,53	11,48	11,46					
448	12,10	12,10	12,03	12,00						

Vedelikkude rõhumise muutumise sõltuvust temperatuurist kasutatakse termomeetrite ehitamiseks. Selleks vedelik asetatakse teatava algrõhu all poolringi-kujulisse, õhukeste elastsete seintega, ovaalse ristlõikega torru (Burtoni toru). Kui vedeliku temperatuur Burtoni torus tõuseb, siis vastavalt temperatuurile suureneb vedeliku rõhumine toru seintele, mille tagajärjel toru sirgub sedavõrd, et toru seintele mõjuv rõhumine tasakaalustub. Toru sirgumine vedeliku rõhumise suurenemisel kui ka tagasikõverdumine vedeliku rõhumise vähenemisel on teatav kindel funktsioon vedeliku rõhumisest ehk, mis sama, vedeliku temperatuurist, sest vedeliku rõhumine torus on võrrandi (23) põhjal funktsioon vedeliku temperatuurist. Järelikult võime Burtoni toru kasutada termomeetri tundmikuna. Selleks kinnitatakse Burtoni toru üks ots kindlalt termomeetriseadme kesta külge, kuna teine ots ühendatakse vastava mehhanismi kaudu osutiga, mis termomeetri astmikul näitab Burtoni toru vaba otsa edasipaigutumisele vastavat temperatuuri. Astmiku jaotised märgitakse astmikule termomeetri kompareerimise abil normaaltermomeetriga.

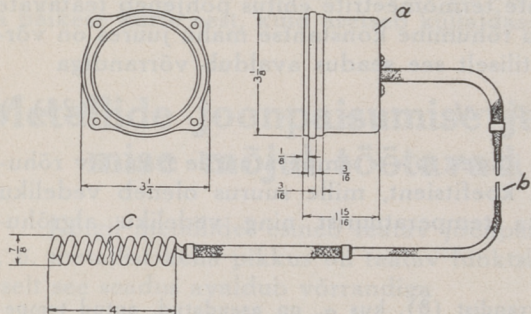
Vedeliku rõhumisega töötavaid termomeetreid tarvitatakse aerotehnikas mootorite jahutusvee, mootorite määrideõli ja õhu temperatuuri mõõtmiseks.

Nendes termomeetrites tundmik on eraldatud Burtoni torust ja asetatud keskkonda, mille temperatuurilist seisukorda on tarvis jälgida.

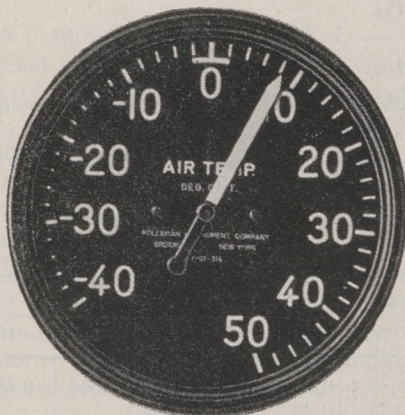
Tundmiku moodustab sel puhul suurt soojusjuhtivust omav metalltoru, kust vedeliku rõhumine kantakse üle kapillaartoru kaudu instrumentide lauale paigutatud termomeetri Burtoni torule. Ühe säärase õhutempera-

tuuri mõõtmiseks määratud termomeetri seade on näidatud joonisel 13, kus tähega *a* on märgitud termomeeter, *c* — tundmik ja *b* — tundmikku termomeetriga ühendav kapillaartoru, mis on kaitstud võimalikkude vigastuste ja temperatuurimuudatuste vastu sellekohase soomusisolatsiooniga. Sama termomeetri eestvaade, nimelt vaade temperatuuristmikuks, on näidatud joonisel 14.

Eelkirjeldatud termomeetrite vedelikkudeks tarvitatakse mitmesuguseid alkohole ja toluooli.



Joon. 13.

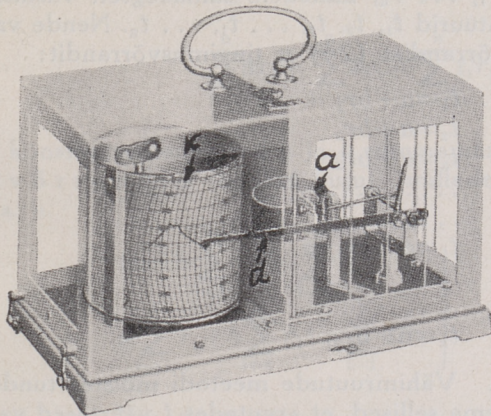


Joon. 14.

Termograafid.

Temperatuuri käiku teatavas ajavahemikus registreeritakse aparaadiga, mida nimetatakse *termograafiks*. Termograafi üldvaade on antud joonisel 15. Termograaf koosneb tundmikust *a* (Burtoni toru või bimetall-plaat), mille üks ots on kindlalt ühendatud tundmiku alusega, kuna teine ots omab vaba liikumise võimalust ja on kangidesüsteemi kaudu ühendatud hoovaga *d*. Temperatuuri muutumisel esineb, nagu teame, tundmiku vaba otsa teatav edasipaigutumine, mis kangidesüsteemi kaudu paneb liikuma hoova *d*. Hoova *d* vaba otsa külge kinnitatud sulg kirjutab glütseriintindiga liikumise käigu paberlindile, mis on mähitud kellamehhanismi abil keerlevale trumlile *k*. Paberlint on jaotatud paralleelsete joonte süsteemiga risti trumli *k* teljele Celsiuse kraadidesse ja trumli *k* liikumise suunas ajaühikutesse, nõnda et lindile sule poolt kirjutatud joon kujutab vastavalt ajale temperatuuri käiku.

Termograafid nagu termomeetridki ei näita otsekohe tõelist temperatuuri. Tõeliste temperatuuride leidmiseks peab termograafi lindile märgitud



Joon. 15.

lugemid ümber töötama, korrigeerides neid vastavalt antud termograafi instrumentaalsetele vigadele. Selleks otstarbeks koostatakse iga riista jaoks sellekohane korrigeerimis tabel või -diagramm, kust iga lugemi jaoks saab kindlaks määrata instrumentaalse vea suuruse või otsekohe tõelise temperatuuri.

Korrigeerimistabeli või -diagrammi koostamiseks kontrolli-

takse termograafi lugemeid samaaegselt samadesse tingimustesse asetatud normaaltermomeetri lugemitega. Saadud vaatlusandmete põhjal moodustatakse termograafi lugemite korrigeerimise võrrand, mille abil koostatakse korrigeerimis tabel või -diagramm. Korrigeerimisvõrrandi üldkuju on:

$$t = a + br \dots \dots \dots (24)^1,$$

kus *r* on termograafi lugem (ordinaat), *t* — sellele lugemile vastav tõeline temperatuur, s. o. normaaltermomeetri järgi, ja *a* ning *b* — konstantsed suurused, mis iga mõõteriista jaoks kindlaks määratakse vaatlusandmete põhjal. Nimelt iga vaatluse puhul määratud temperatuurid *t* ja *r* peavad rahuldama võrrandit (24), ja seega saame moodustada sama palju võrrandeid kahe

¹⁾ Võrrand (24) on saadud empiirilisel, oletusel, et *t* ja *r* on omavahel seotud lineaarselt.

tundmatuga, kui palju on tehtud vaatlusi. Nii saadud võrrandites tundmatuteks on koefitsient b ja vabaliige a . Järelikult lahendades kaks nendest võrranditest leiame a ja b arvvaartused.

Arvesse võttes, et vaatlustel termograafi ja normaaltermomeetri lugemite määramisel teeme alati teatava vea ja et tegelikult t ja r , antud temperatuuri-intervallis, ei ole seotud täpselt lineaarse vahekorraga, peame järeldama, et eelkirjeldatud viisil määratud koefitsiendi b ja vabaliikme a arvvaartused teataval määral erinevad täpsetest väärtustest. Selleks et leida koefitsiendi b ja vabaliikme a arvvaartusi, millede puhul võrrand (24) antud temperatuuri-intervallis annaks t väärtused võimalikult lähedased tõelisele temperatuurile, arvutatakse a ja b arv suurused vähimruutude meetodi järgi. Suuruste a ja b arvutamiseks vähimruutude meetodiga peab termograafi kontrollvaatlusi antud temperatuuri-intervalli jaoks olema rohkem kui kaks, kusjuures a ja b väärtused saame seda täpsemalt, mida rohkem kontrollvaatlusi on.

Arvutus vähimruutude meetodi järgi toimub järgmiselt. Oletame, et antud temperatuuri-intervallis on tehtud n kontrollvaatlust ja määrati termograafi lugemid $r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_n$, milledele samaaegselt vastasid normaaltermomeetri järgi temperatuurid $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_n$. Nende vaatluste andmeil saame moodustada võrrandist (24) n tingimusvõrrandit:

$$\begin{aligned} t_1 &= a + br_1 \\ t_2 &= a + br_2 \\ t_3 &= a + br_3 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ t_i &= a + br_i \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ t_n &= a + br_n, \end{aligned}$$

milledes a ja b on tundmatud. Vähimruutude meetodi mõistes tundmatute a ja b arvvaartused peavad olema sellised, et arvutades t väärtused vastavalt termograafi lugemitele ($r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_n$) võrrandiga (24), saaksime hálbed (kõrvalekalded) tõelistest temperatuuridest ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_n$) säärased, et nende hálvete ruutude summa oleks minimaalne.

Eelantud tingimusvõrrandite järgi nende hálvete avaldised on:

$$\begin{aligned} a + br_1 - t_1 \\ a + br_2 - t_2 \\ a + br_3 - t_3 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ a + br_i - t_i \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ a + br_n - t_n \end{aligned}$$

ja seega hálvete ruutude summa miinimumi avaldis, mille tähistame tähega S , on:

$$S = (a + br_1 - t_1)^2 + (a + br_2 - t_2)^2 + (a + br_3 - t_3)^2 + \dots + (a + br_n - t_n)^2 = \min.,$$

või sümboolselt:

$$S = \sum_{i=1}^n (a + br_i - t_i)^2 = \min. \quad \dots \quad (25).$$

Miinimumi korral peavad osalised tuletised võrrandist (25) a ja b suhtes olema nullid. Seega:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (a + br_i - t_i) = 0;$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (a + br_i - t_i) r_i = 0.$$

Avades klambrid, saame anda võrranditele kuju:

$$\sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n br_i = \sum_{i=1}^n t_i;$$

$$\sum_{i=1}^n ar_i + \sum_{i=1}^n br_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i r_i.$$

Võttes konstantsed suurused a ja b summamärgi alt välja, saame nn. normaalsuhted lõplikul kujul, milledest leiamegi a ja b arvsuured, s. o.

$$\left. \begin{aligned} na + b \sum_{i=1}^n r_i &= \sum_{i=1}^n t_i \\ a \sum_{i=1}^n r_i + b \sum_{i=1}^n r_i^2 &= \sum_{i=1}^n t_i r_i \end{aligned} \right\} \dots \quad (26),$$

kus n on kontrollvaatluste arv.

Võrrandites (26) esinevate liikmete arendused on:

$$\left. \begin{aligned} b \sum_{i=1}^n r_i &= b(r_1 + r_2 + r_3 \dots + r_i + \dots + r_n) \\ \sum_{i=1}^n t_i &= t_1 + t_2 + t_3 \dots + t_i + \dots + t_n \\ a \sum_{i=1}^n r_i &= a(r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_i + \dots + r_n) \\ b \sum_{i=1}^n r_i^2 &= b(r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \dots + r_i^2 + \dots + r_n^2) \\ \sum_{i=1}^n t_i r_i &= t_1 r_1 + t_2 r_2 + t_3 r_3 + \dots + t_i r_i + \dots + t_n r_n \end{aligned} \right\} \dots \quad (27).$$

Avaldistes (27) peab suurused t ja r võtma samade märkidega, milledega nad kontrollvaatlustel saadud.

Kui soovitakse termograafi lugemitele arvutada antud temperatuuriintervalli jaoks tõelisi temperatuure suurema täpsusega, siis oletatakse, et t ja r on seotud omavahel paraboolselt, s. o. korrektsioonivõrrand võetakse kujul:

$$t=a+br+cr^2 \dots \dots \dots (28).$$

Võrrandis (28) esinevate koefitsientide b ja c ning vabaliikme a arv-
suurused määratakse sama meetodiga nagu võrrandi (24) puhul, kuid nüüd
peab antud temperatuuriintervalli jaoks kontrollvaatlusi olema rohkem kui
kolm, et oleks võimalik moodustada kolm normaalvõrrandit kolme tundmatu
 a , b ja c arvsuuruste arvutamiseks. Normaalvõrrandite kujud sel puhul on:

$$\left. \begin{aligned} na+b\sum_{i=1}^n r_i+c\sum_{i=1}^n r_i^2&= \sum_{i=1}^n t_i \\ a\sum_{i=1}^n r_i+b\sum_{i=1}^n r_i^2+c\sum_{i=1}^n r_i^3&= \sum_{i=1}^n t_i r_i \\ a\sum_{i=1}^n r_i^2+b\sum_{i=1}^n r_i^3+c\sum_{i=1}^n r_i^4&= \sum_{i=1}^n t_i r_i^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (29).$$

Kui temperatuuri-intervall on suur, siis on soovitav korrektsioonivõrran-
diga täpsemate tulemuste saavutamiseks antud temperatuuri-intervall jagada
mitmeks osaintervalliks ja koostada iga osaintervalli jaoks eraldi korrekt-
sioonivõrrand.

Näide 4.

Temperatuuri-intervalli jaoks +10° C kuni +20° C on tehtud 6 kontrollvaatlust.
Arvutada võrrandi (24) koefitsient b ja vabaliige a , kui termograaf ja normaaltermo-
meeter näitasid järgnevaid temperatuure:

Normaaltermomeeter	10,2°	11,6°	12,6°	13,6°	19,7°	21,3°
Termograaf	9,2°	10,8°	11,7°	13,0°	19,0°	21,0°

Normaalvõrrandite koefitsientide arvutlust on lihtne toimetada alljärgnevas tabel-
süsteemis:

i	1	2	3	4	5	6	Summa
t_i	10,2	11,6	12,6	13,6	19,7	21,3	89,0 = $\sum t_i$
r_i	9,2	10,8	11,7	13,0	19,0	21,0	85,0 = $\sum r_i$
$t_i r_i$	93,8	125,3	147,4	176,8	380,2	447,3	1370,8 = $\sum t_i r_i$
r_i^2	84,6	116,6	136,9	169,0	372,5	441,0	1320,7 = $\sum r_i^2$

Võrrandite (26) järgi saame normaalvõrrandid:

$$\begin{aligned} 6a+85b &= 89, \\ 85a+1320,7b &= 1370,8, \end{aligned}$$

kust leiame, et

$$a = 1,45 \text{ ja } b = 0,944.$$

Järelikult korrektsioonivõrrandi kuju on:

$$t = 1,45 + 0,944 r \dots \dots \dots (a).$$

Paraboolse võrrandi (28) puhul, näites toodud samade andmete põhjal, saame koefitsientide b ja c ning vabaliikme a arvutamiseks normaolvõrrandid:

$$6a + 85b + 1321c = 89;$$

$$85a + 1321b + 22287c = 1371;$$

$$1321a + 22287b + 401298c = 22970.$$

Lahendades selle võrrandite-süsteemi leiame, et:

$$a = 2,13; b = 0,848; c = 0,00315.$$

Seega korrektsioonivõrrandi kuju on:

$$t = 2,13 + 0,848r + 0,00315r^2 \dots \dots \dots (b).$$

Alljärgnevas tabelis on võrdluseks antud käesolevas näites toodud termograafi lugemite ümberarvutus võrrandite (a) ja (b) järgi.

Termograafi lugem r_i	9,2	10,8	11,7	13,0	19,0	21,0	
Temperatuur normaaltermomeetri järgi t_i	10,20	11,60	12,60	13,60	19,70	21,30	
Temperatuur võrrandi (a) järgi	10,14	11,65	12,50	13,73	19,68	21,28	
Temperatuur võrrandi (b) järgi	10,20	11,65	12,48	13,68	19,66	21,32	
Hälve, mille annab võrrand (a) Δa	0,06	-0,05	0,10	-0,13	0,02	0,02	
$\Delta^2 a$	0,0036	0,0025	0,0100	0,0169	0,0004	0,0004	$\Sigma \Delta^2 a = 0,0338$
Hälve, mille annab võrrand (b) Δb	0,00	-0,050	0,12	-0,08	0,04	-0,02	
$\Delta^2 b$	0,0000	0,0025	0,0144	0,0064	0,0016	0,0004	$\Sigma \Delta^2 b = 0,0253$

$$\Delta^2 a \text{ keskmine} = \frac{0,0338}{6} = 0,0056; \Delta a = \sqrt{0,0056} = 0,07;$$

$$\Delta^2 b \text{ keskmine} = \frac{0,0253}{6} = 0,0042; \Delta b = \sqrt{0,0042} = 0,06.$$

Järelikult on paraboolne võrrand antud juhul keskmiselt 0,01 võrra täpsem (hälvete ruutude summa on väiksem), milline täpsus harilikult termograafi puhul (täpsus 0,1°) on peagu ülearune.

Temperatuuri-mõõteriistade näitamise hilinemine muutuva temperatuuriga keskkonnas ja päikese kiirgamise mõju mõõteriistadele.

Nagu eespool nägime, esineb vedeliktermomeetrite juures muutuva temperatuuriga keskkonnas termomeetri näitamise hilinemine, s. o. termomeetri näitamisid jäävad maha keskkonna temperatuurist. Selle põhjuseks on, et tundmik ei suuda nii ruttu ära anda või neelda nõnda palju soojust, et ta kohe omandaks keskkonna temperatuuri. Aerotehnikas on muutuva temperatuuriga keskkonnaks õhkkond, eriti tõusude ja laskumiste puhul, kuna püstsihis troposfääri piirkonnas on õhkkonnal, nagu teame, alati teatav temperatuuri gradient. Seega on õhu temperatuuri muutumine ajaühikus seda suurem, mida kiiremini toimub tõus või laskumine.

Temperatuuri-mõõteriista korrapärase asetusviisi puhul õhuvoolu suhtes, kui mõõteriist on küllaldaselt kaitsitud päikese kiirgamise eest, oleneb mõõteriista näitamise lahkumine õhu temperatuurist, nagu seda on tõestanud Hergesell, antud mõõteriista tundmiku nn. soojusliku inertsuse koefitsiendist a ja mõõteriista temperatuuri muutumise kiirusest, mille

väärtus antud momendil avaldub suhtega $\frac{dt}{d\tau}$ (temperatuuri gradient aja suhtes), kus dt on temperatuuri muutumine ajavahemikus $d\tau$. Kui tähistada õhu temperatuur antud momendil tähega t_0 ja mõõteriista poolt samal momendil näidatud ning instrumentaalse veaga korrigeeritud temperatuur tähega t , avaldub korrigeerimisvõrrand kujul:

$$t_0 = t + a \frac{dt}{d\tau} \quad \dots \quad (30)$$

Kui teada antud mõõteriista soojusliku inertsuse koefitsiendi a väärtust ja funktsionaalset vahekorda õhu temperatuuri t_0 ja aja τ vahel, on võimalik võrrandiga (30) arvutada õhu temperatuuri t_0 mõõteriista poolt näidatud temperatuuri t järgi.

Mõõteriista soojusliku inertsuse koefitsiendi a väärtus väljendub valemiga:

$$a = \frac{m c}{\lambda s} \quad \dots \quad (31),$$

kus m on tundmiku mass, c — tundmiku keskmine soojusmahtuvuse koefitsient, s — tundmiku pindala ja λ — õhu konvektiivne soojusjuhtivuse koefitsient. Viimane koefitsient suureneb ühes õhuvoolu kiirusega ja väheneb õhu tiheduse vähenemisega. Seoses õhu tihedusega väljendub koefitsient a , Wigand'i uurimuste järgi, bimetallilise tundmiku puhul vahekorraga:

$$a = a_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{0,60} \quad \dots \quad (32),$$

kus ρ_0 on õhu tihedus vastavalt koefitsiendi a_0 väärtusele ja ρ — õhu tihedus vastavalt koefitsiendile a .

Eeltoodust järeldame, et konstantse õhutiheduse puhul mõõteriista tundmiku soojusliku inertsuse koefitsient a väheneb õhuvoolu kiiruse suurenemisega. Järelikult, mida suurem on tundmikust mööduva õhuvoolu liikumise kiirus, seda väiksem on õhu

temperatuuri ja termomeetri poolt näidatud temperatuuri vahe $t_0 - t$, s. o. seda väiksem on termomeetri näitamise hiline misest tingitud hälve.

Temperatuuri-mõõteriista soojusliku inertsuse koefitsient konstantse kiirusega õhuvoolu jaoks määratakse kindlaks eksperimentaalselt mõõteriista lugemi fikseerimisega antud ajavahemiku alg- ja lõppmomendil. Kui mõõteriist teatava temperatuuri-lugemiga asetada antud kiirusega, konstantse temperatuuriga õhuvoolu, siis koefitsiendi a arvutus toimub võrrandiga, mille saame võrrandist (30), kui temas võtame õhuvoolu temperatuuri $t_0 = \text{konst.}$ ja integreerime võrrandit aja suhtes vaatluse algmomendist τ_1 kuni vaatluse lõppmomendini τ_2 ja temperatuuri suhtes — vaatluse algmomendil mõõteriista poolt näidatud temperatuurist t_1 kuni vaatluse lõppmomendil mõõteriista poolt näidatud temperatuurini t_2 . Integreerimiseks anname võrrandile (30) kuju:

$$\frac{dt}{t_0 - t} = \frac{1}{a} d\tau$$

ja võtame $t_0 - t = t'$, kust leiame, et $dt = -dt'$. Tehes võrrandis eelmainitud asendused ja integreerides, saame:

$$-\int_{t_1}^{t_2} \frac{dt'}{t'} = \frac{1}{a} \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau; \quad \ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{a} (\tau_2 - \tau_1).$$

Tehtud asenduste põhjal on: $t'_1 = t_0 - t_1$ ja $t'_2 = t_0 - t_2$; seega lahendades võrrandi a suhtes, saame:

$$a = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\ln \frac{t_0 - t_1}{t_0 - t_2}} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\ln \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}}$$

Arvutlemise lihtsustamiseks asendame võrrandis esineva naturaallogaaritmi tema avaldisega kümnendlogaritmi kaudu, s. o. avaldisega $\frac{1}{M} \log \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}$, kus M on logaritmide moodul ($M = \log e = 0,434\ 294$). Tehes selle asenduse, saame koefitsiendi a arvutlemiseks võrrandi:

$$a = \frac{0,434(\tau_2 - \tau_1)}{\log \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}} \dots \dots \dots (33),$$

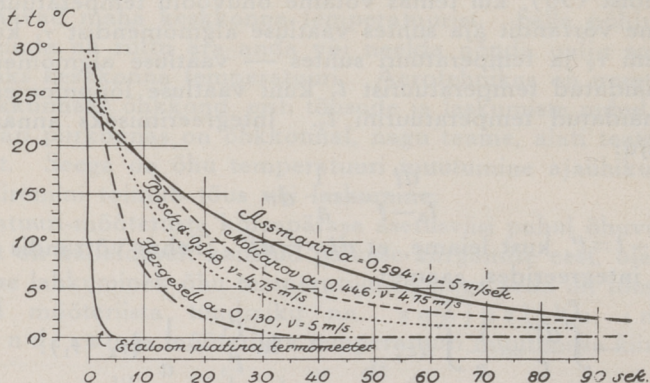
kus $\tau_2 - \tau_1$ on ajavahemik minutites, t_0 — antud kiirusega õhuvoolu konstantne temperatuur, t_1 — katsetatava temperatuuri-mõõteriista poolt näidatud temperatuur vaatluse algmomendil τ_1 , ja t_2 — sama mõõteriista poolt näidatud temperatuur vaatluse lõppmomendil τ_2 .

Soojusliku inertsuse koefitsiendi a leidmisel pole oluline, kas temperatuurimõõteriista temperatuur oli kõrgem või madalam õhu temperatuurist, sest võrrandis (33) jääb suhe

$$\frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0} > 1,$$

kuna $t_1 - t_0$ on absoluutselt alati suurem kui $t_2 - t_0$ ja mõlemad esinevad alati ühe ja sama märgiga.

Joonisel 16 on antud Assmann'i, Bosch'i, Molčanov'i ja Hergesell'i termograafide ning plaatinast etaloonse elektrilise takistustermomeetri temperatuuri näitamise käik vastavalt ajale konstantse temperatuuriga ja konstantse kiirusega õhuvoolus, kui mõõteriista õhuvoolus asetseva tundmiku temperatuur t vastava seadise abil tõsteti kõrgemaks õhuvoolu õhu temperatuurist t_0 . Jooniselt nähtub, et kõige tundlikum temperatuuri muutumise suhtes on plaatinatermomeeter.



Joon. 16.

Kui joonisel 16 võtta $t-t_0$ telg logaritmiline, siis temperatuuri-mõõte-riista temperatuuri näitamise muutuse kõvera saame sirgena ¹⁾, nagu näidatud joonisel 17. Sel puhul, nagu nähtub jooniselt 17, joonlõik $\overline{cd}$, mis vastab ajavahemikule $\tau_n - \tau_1$, võrdub $\log \frac{t_1 - t_0}{t_n - t_0}$. Seega võime võrrandi (33),

koefitsiendi a arvutamiseks, kirjutada kujul:

$$a = \frac{0,434 (\tau_n - \tau_i)}{cd} , (33^a).$$

Joonlõik $\overline{cd}$ tuleb mõõta logaritmilise telje astmiku mõõtühikuis.

Praktiliselt on koefitsiendi a määramiseks soovitat kasutada logaritmilist paberit, kusjuures temperatuuri-mõõteriista temperatuuri muutuse sirge

¹⁾ Võrrandi (33) võime kirjutada kujul:

$$a [\log (t_1 - t_0) - \log (t_2 - t_0)] = 0,434 (\tau_2 - \tau_1).$$

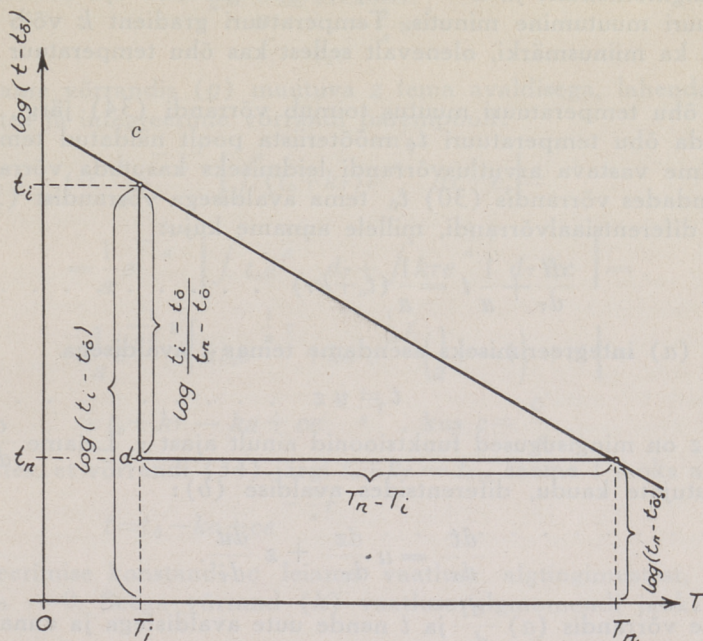
Kui tähistame $\log (t-t_0) = y$, siis võrrand avaldub kujul:

[illegible]

Võrrandi (A) vahed $y_1 - y_2$ ja $\tau_2 - \tau_1$ on jooksivad koordinaadid, sest peale y_2 ja τ_2 võivad olla veel: $y_3, \tau_3; y_4, \tau_4; \dots y_i, \tau_i$ jne. Järelikult, tähistades $y_1 - y_2 = y'$ ja $\tau_2 - \tau_1 = \tau'$, saame võrrandi (A) kujul:

$$y' = \frac{0,434}{a} \tau,$$

mis on sirge võrrand.



Joon. 17.

määramiseks on kasulik võtta rohkem kui kaks punkti. Sirge tõmbamine läbi paberile kantud punktide rea võib toimuda silma järgi, pingulitõmmatud niidiga proovides.

Tabelis 17 on antud mõnede temperatuuri-mõõteriistade soojusliku inertsi koefitsiendi väärtused vastavalt õhuvoolu kiirusele õhu normaalse tiheduse $\rho = 0,125 \text{ kg sek.}^2 \text{ m}^{-4}$) juures.

T a b e l 17. Soojusliku inertsi koefitsiendid.

	Õhuvoolu kiirus m/sek.				
	2	2,15	4,75	5	5,25
Assmanni meteorograaf	0,832			0,594	
Boschi	0,537		0,349		
Molčanovi	0,716		0,466		
Hergeselli	0,198			0,130	
Assmanni elavhõbetermomeeter (suurem mudel)	0,436	0,366	0,284		0,274

Juhul, kui keskkonna temperatuur muutub aja suhtes kindla gradiendi k järgi, nagu see esineb õhkkonnas tõusude või laskumiste puhul, võime õhu temperatuuri muutuse olenevalt ajast avaldada võrrandiga

$$t^5 = t_0 + k\tau \quad (34),$$

1) Vt. peatükki „Õhu tihedus“.

kus t_0 on õhu temperatuur vaatluse algmomendil, τ — aeg minutites arvates vaatluse algmomendist ja k — temperatuuri gradient aja suhtes, s. o. õhu temperatuuri muutumine minutis. Temperatuuri gradient k võib omada nii pluss- kui ka miinusemärgi, olenevalt sellest kas õhu temperatuur tõuseb või langeb.

Kui õhu temperatuuri muutus toimub võrrandi (34) järgi, siis selleks et arvutada õhu temperatuuri t_δ mõõteriista poolt näidatud temperatuuri t järgi, võime vastava arvutusvõrrandi leidmiseks kasutada võrrandit (30).

Asendades võrrandis (30) t_δ tema avaldisega võrrandist (34), saame lineaarse diferentsiaalvõrrandi, millele anname kuju:

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{1}{a} t = \frac{1}{a} (t_0 + k\tau) \quad (a).$$

Võrrandi (a) integreerimiseks asendame temas t avaldisega

$$t = u z \quad (b),$$

kus u ja z on mingisugused funktsioonid ainult ajast τ . Leiame $\frac{dt}{d\tau}$ avaldise uute muutujate kaudu, diferentsides avaldise (b):

$$\frac{dt}{d\tau} = u \frac{dz}{d\tau} + z \frac{du}{d\tau}.$$

Asendame võrrandis (a) $\frac{dt}{d\tau}$ ja t nende uute avaldistega ja anname võrrandile kuju:

$$u \frac{dz}{d\tau} + z \left(\frac{du}{d\tau} + \frac{1}{a} u \right) = \frac{1}{a} (t_0 + k\tau) \quad (c).$$

Nüüd valime u jaoks avaldise, mille puhul võrrandi c vasakpoole teine liige muutub nulliks, s. o. et võrrand c omaks kuju:

$$u \frac{dz}{d\tau} = \frac{1}{a} (t_0 + k\tau) \quad (d).$$

See nõue täitub, kui võrrandis (c) suuruse z koefitsient on null, s. o. kui u avaldise arvutame võrrandist

$$\frac{du}{d\tau} + \frac{1}{a} u = 0 \quad (e).$$

Integreerides võrrandit (e) leiame:

$$\ln u = -\frac{1}{a} \tau + \ln c_1 \text{ ehk } \ln \frac{u}{c_1} = -\frac{1}{a} \tau,$$

kust potentseerimisega saame avaldise u jaoks:

$$u = c_1 e^{-\frac{1}{a} \tau} \quad (f).$$

Võrrandis (f) on c_1 integreerimise konstant ja e — naturaallogaritmide alus. Asendades võrrandis (d) u tema avaldisega võrrandist (f), lahendades võrrandi dz suhtes ja integreerides võrrandit, saame

$$z = \frac{1}{ac_1} \int (t_0 + k\tau) e^{\frac{1}{a} \tau} d\tau + c \quad (g).$$

Võrranditest (b) ja (f) leiame:

$$z = \frac{t}{u} = \frac{t}{c_1 e^{-\frac{1}{a}\tau}}.$$

Asendame võrrandis (g) muutuva z tema avaldisega, lahendame võrrandi t suhtes ja integreerime võrrandi parempoolt:

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{a} e^{-\frac{1}{a}\tau} \left[\int (t_0 + k\tau) e^{\frac{1}{a}\tau} d\tau + c \right] = \\ &= \frac{1}{a} e^{-\frac{1}{a}\tau} \left[\int t_0 e^{\frac{1}{a}\tau} d\tau + \int k\tau e^{\frac{1}{a}\tau} d\tau + c \right] = \\ &= \frac{1}{a} e^{-\frac{1}{a}\tau} \left[at_0 e^{\frac{1}{a}\tau} + ka^2 e^{\frac{1}{a}\tau} \left(\frac{1}{a}\tau - 1 \right) + c' \right] = \\ &= t_0 + k\tau - ka + c e^{-\frac{1}{a}\tau}, \text{ kus } c = \frac{c'}{a}. \end{aligned}$$

Arvesse võttes, et võrrandi (34) järgi $t_0 + k\tau = t_0$, saame t jaoks avaldise

$$t = t_0 - ka + c e^{-\frac{1}{a}\tau} \quad (h).$$

Integreerimise konstandi c leiame vaatluse algtingimustest, sest siis $t = t_0 = t_0$ ja $\tau = 0$. Seega võrrand (h) vaatluse algmomendi jaoks avaldub kujul:

$$c - ka = 0,$$

kust leiame:

$$c = ka.$$

Asendades võrrandis (h) integreerimise konstandi c tema avaldisega ja lahendades võrrandi t_0 suhtes, saamegi võrrandi õhu temperatuuri t_0 arvutamiseks:

$$t_0 = t + ka \left(1 - e^{-\frac{1}{a}\tau} \right) \quad (35).$$

Võrrandist (35) nähtub, et ajavahemiku τ suurenemisega $e^{-\frac{1}{a}\tau}$ läheb piiriliselt nullile, millest järeldame, et vahe $(t_0 - t)$ arvuliselt pidevalt kasvab ühes ajaga τ , kuid kunagi ei ületa korrutise ak absoluutset väärtust, s. o. temperatuuri-mõõteriista näitamise hiline mis hõlme kunagi ei ületa piiri, mis avaldub võrrandiga

$$t_0 - t = ka \quad (36).$$

Suurus ka ei olene aja-mõõteühikust, kuigi a ja k üksikult sellest olenevad.

Võrrandi (33) järgi:

$$a = \frac{0,434 (\tau_2 - \tau_1)}{\log \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}}$$

Temperatuuri gradient k aja suhtes avaldub vahekorras:

$$k = \frac{t_0 - t_1}{\tau_2 - \tau_1},$$

seega

$$ka = \frac{0,434 (t_{0_2} - t_{0_1})}{\log \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}},$$

s. o. korrutis ka ei olene aja-mõõteühikust.

Muutliku gradiendi korral, kui soovime termomeetri parandust leida igal ajamomendil, võib temperatuuri käigu jaotada osadesse nii, et iga osa kohta saab kasutada antud võrrandit, s. o. temperatuuri käik tuleb koostada sirgjoonelistest osadest. Kui tahame aga hinnata maksimaalset viga, siis tuleb seda teha suurima esineva gradiendiga osa kaudu.

Suurt mõju termomeetri näitamistäpsusele vabas õhkkonnas õhu temperatuuri mõõtmisel avaldab päikese kiirgamine, kui termomeetri tundmik ei ole küllaldaselt selle eest kaitstud. Päikese kiirgamisest tingitud viga võib teatavates tingimustes osutada kaunis suureks. Tabelis 18 on toodud W. Köppen'i katsete tulemused mitmet tüüpi termomeetrite kohta. Katsed on tehtud maapinna-lähedases õhukihis vaba juurdepääsuga otsesele ja kaudsele kiirgamisele ning tuulele.

T a b e l 18. Päikese kiirgamise mõju termomeetritele.

Termomeetri tüüp	Päikese kiirgamisest tingitud viga °C
1. Silindrilise tundmikuga elavhõbe-kepptermomeeter $\frac{1}{2}^{\circ}$ jaotistega	2,7
2. Minimaal-piiritustermomeeter	3,0
3. Augusti psühromeetri termomeeter $\frac{1}{5}^{\circ}$ jaotistega	2,9
4. Kerakujulise tundmikuga elavhõbetermomeeter $\frac{1}{2}^{\circ}$ jaotistega . .	2,9

Tabeli andmed vastavad, nagu juba öeldud, maapinna-lähedasele õhukihile. Kõrguse suurenemisega, nagu katsed näitavad, suureneb ka kiirgamisest tingitud viga, kuna sel puhul jäävad ära maapinna lähedal esinevad intensiivsed konvektiivvoolud.

Lihtsaim abinõu kiirgamisest tingitud vea vähendamiseks on mõõteriista varjamine kiirgamisallikate eest ja võimalikult suurema õhuvoolu tekitamine ümber mõõteriista, eriti aga tundmiku juures.

Mõõteriista varjavad ekraanid peavad olema kahekordsed, kordasid üksteisest eraldava õhuvahega ja küllaldase ventilatsiooniga. Neil peab olema võimalikult läikiv pind ja väike mass, et nende soojusmahtuvus oleks minimaalne.

Eeltoodust järeldame, et lennukil ei tohi välisõhu temperatuuri mõõtmiseks määratud mõõteriistu asetada päikese ega mootori soojuse kiirgamise mõjupiirkonda, samuti ka mitte kohtadesse, kus puudub küllaldane õhuvool, sest siis nende näitamistäpsus jätab palju soovida.

Harilikum viis vaba õhu temperatuuri mõõtmiseks igapäevases elus on, et termomeeter riputatakse päikesest varjatud kohta ja võetakse termomeetri lugem. Vabal väljal, kus varjulist kohta ei ole ja ka selleks, et kiiresti määrata õhu temperatuuri, seotakse termomeeter nõõri otsa ja keerutatakse seda

nööri otsas ringi (umbes 100 korda). Nii puutub termomeeter kokku paljude õhukihtidega ja omandab kiiresti nende temperatuuri. Üldiselt peab termomeetrit seni ringi keerutama, kuni lugem muutub konstantseks.

Näide 5.

Tõusul õhkkonna temperatuuri muutumine minutis on $-2,0^{\circ}\text{C}$. Leida:

1) Boschi meteorograafi temperatuuri näitamise võimalik hiline mine, kui termomeetri tundmik asub õhuvoolus, mille kiirus on 5 m/sek. ja õhutihedus 0,125, millele vastab mõõteriista soojusliku inertsuse koefitsient $a = 0,349$ (vt. tabelit 17).

2) Leida mõõteriista temperatuuri näitamise hiline mine samadel tingimustel, kui õhutihedus on $\rho = 0,060$ (mis vastab kõrgusele ~ 7000 m), oletades, et mõõteriista soojusliku inertsuse koefitsient muutub võrrandi (32) järgi.

Esimesel juhul temperatuuri näitamise hiline mine on võrrandi (36) põhjal:

$$t_{\delta} - t = -0,349 \cdot 2,0 = -0,69^{\circ}\text{C}.$$

Teisel juhul õhutiheduste suhe on $0,125 : 0,060 = 2,08$ ning seega võrrandi (32) põhjal koefitsiendi a väärtus on:

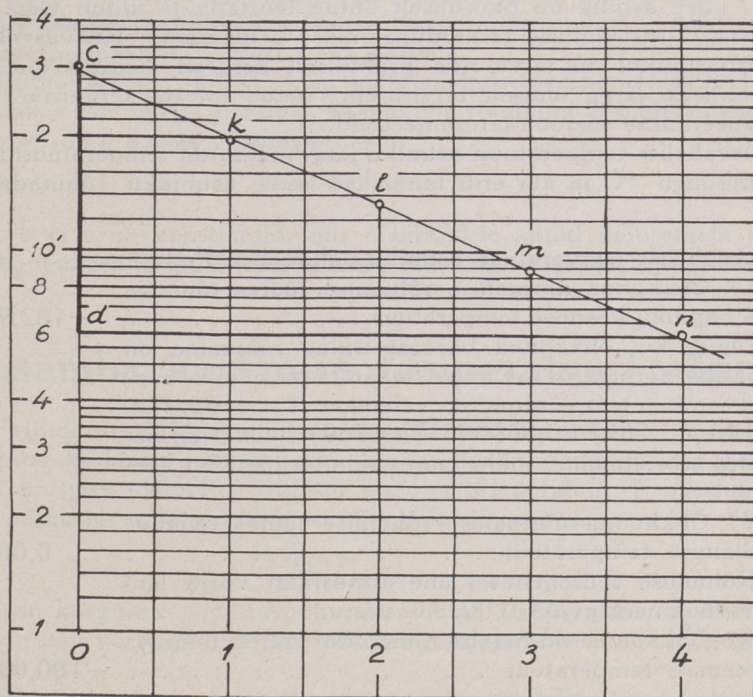
$$a = 0,349(2,08)^{0,60} = 0,542,$$

ja näitamise hiline mine:

$$t_{\delta} - t = -0,542 \cdot 2,0 = -1,08^{\circ}\text{C}.$$

Näide 6.

Määrata piiritusega töötava termomeetri soojusliku inertsuse koefitsient paigalseisva õhu jaoks, mille temperatuur $+20^{\circ}\text{C}$, kui termomeetri temperatuur tõsteti kunst-



Joon. 18.

likult üle $+50^{\circ}\text{C}$. Vaatluse algmomensil ($\tau = 0$) termomeeter näitas temperatuuri $+50^{\circ}\text{C}$, esimese minuti lõpul $+39,9^{\circ}\text{C}$, teise minuti lõpul $+33^{\circ}\text{C}$, kolmanda minuti lõpul $+28^{\circ}\text{C}$ ja neljanda minuti lõpul $+26^{\circ}\text{C}$.

Kanname logaritmilisele paberile logaritmilise telje suunas vastavalt ajavahemikudele 1, 2, 3 ja 4 minutit (joon. 18) temperatuuride vahed: $50^{\circ}-20^{\circ}=30^{\circ}\text{C}$; $39,4^{\circ}-20^{\circ}=19,4^{\circ}\text{C}$; $33^{\circ}-20^{\circ}=13^{\circ}\text{C}$; $28,8^{\circ}-20^{\circ}=8,8^{\circ}\text{C}$ ja $26^{\circ}-20^{\circ}=6^{\circ}\text{C}$ (punktid *c*, *k*, *l*, *m*, *n*). Saadud jooniselt leiame, et joonlõik $\overline{cd}$ on 34,5 mm ja logaritmilise astmiku mõõtühik (0—10) on 50 mm, seega joonlõik $\overline{cd}$ sisaldab $\frac{34,5}{50} = 0,69$ logaritmilist ühikut ning võrrandi (33a) järgi soojusliku inertsuse koefitsient on:

$$a = \frac{0,434 \cdot 4}{0,69} = 2,52.$$

Rahvusvaheline temperatuuri-astmik.

Sajakraadi-süsteemiline termodünaamiline temperatuuri-astmik (vt. lk. 17) moodustab üldiselt põhiastmiku, millele võimaluse piires taandatakse kõik temperatuurid. Kuid arvestades raskusi, milledega praktiliselt on seotud täpse termodünaamilise astmiku teostamine, on tehnikas rahvusvaheliselt tarvitusele võetud nn. „rahvusvaheline temperatuuri-astmik“. See astmik on praktiliselt lihtne teostada ja ühtub väga lähedasealt sajakraadi-süsteemilise termodünaamilise astmikuga. Rahvusvahelisel temperatuuri-astmikul on terve rida praktiliselt kergesti määratavaid põhirepereid, millede järgi, üldiselt tarvitusele võetud interpoleerimismeetodite alusel, gradueeritakse etaloon-termomeetreid.¹⁾

Rahvusvahelise temperatuuri-astmiku järgi määratud temperatuurid märgitakse sümboliga $^{\circ}\text{C}$ ja kui eriti tahetakse seda astmikku rõhutada, siis $^{\circ}\text{C}$ (Int.).

Rahvusvahelise temperatuuri-astmiku põhireperid on:

1) Õhkkonna normaalse rõhumise juures toimuva vedela hapniku keemise temperatuur $-182,97^{\circ}\text{C}$.

Juhul, kui õhkkonna baromeetiline rõhumine on üle või alla normaalse rõhumise, määratakse vedela hapniku keemise temperatuur t valemiga $t = -182,97 + 0,0126(b-760) + 0,0000065(b-760)^2$, kus b on baromeetiline rõhumine, mille juures toimub hapniku keemine.

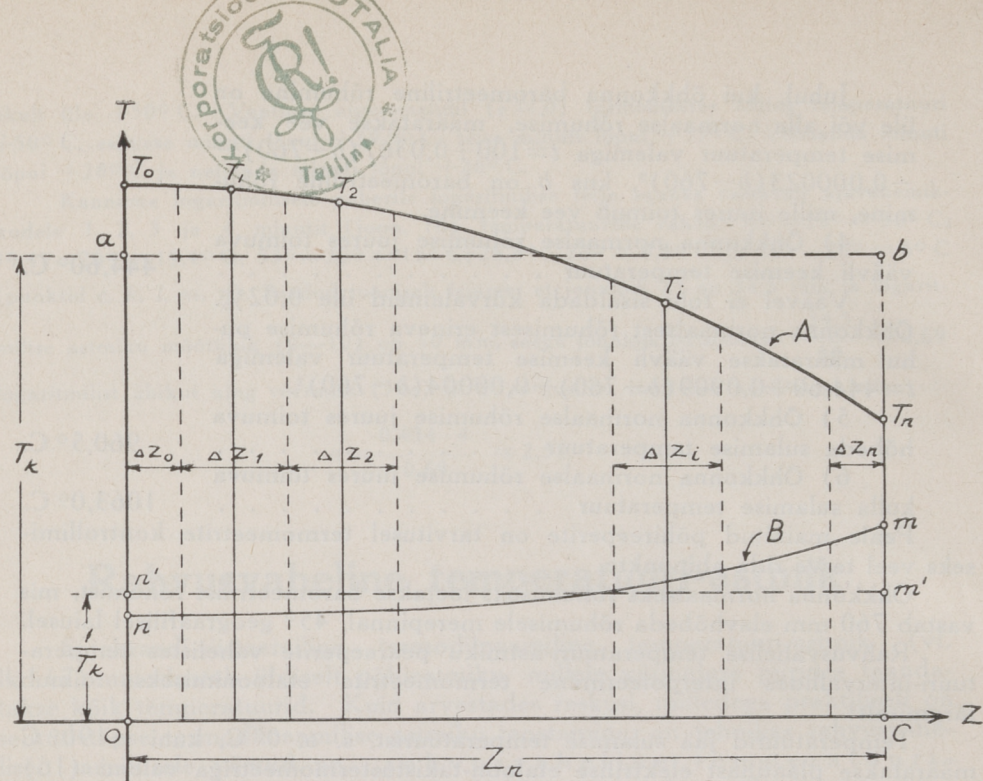
2) Õhkkonna normaalse rõhumise juures toimuva jää sulamise temperatuur $0,000^{\circ}\text{C}$.

Rõhumise suurenemisel ühe atmosfääri võrra langeb vee külmumispunkt $0,007^{\circ}\text{C}$ võrra.

3) Õhkkonna normaalse rõhumise juures toimuva vee keemise temperatuur $+100,000^{\circ}\text{C}$.

¹⁾ Täpsed termomeetrid, mis on aluseks teiste termomeetrite kontrollimisel.

49



Joon. 19.

keskmise, kusjuures iga temperatuuri kaaluks peab võtma vastava kihi paksuse $\Delta z_0, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots \Delta z_i, \dots \Delta z_n$, milledes mõõdetud temperatuuri võib vaadelda konstantsena. Tähistame õhusamba, mille kõrgus olgu z_n , keskmise temperatuuri tähega T_k , siis selle temperatuuri kaaluks on õhusamba kõrgus z_n . Keskmise temperatuuri T_k korrutis tema kaaluga z_n peab võrduma õhusamba kõrguse ulatusel võetud temperatuuride $T_0, T_1, T_2, \dots T_i, \dots T_n$ ja nende temperatuuridele vastavate kaalude $\Delta z_0, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots \Delta z_i, \dots \Delta z_n$ korrutiste summaga (pindala $oabco$ peab võrduma pindalaga oT_0T_nco), s. o. $T_k z_n = T_0 \Delta z_0 + T_1 \Delta z_1 + T_2 \Delta z_2 + \dots + T_i \Delta z_i + \dots + T_n \Delta z_n =$
 $= \sum_{i=0}^n T_i \Delta z_i$, kust leiame, et

$$T_k = \frac{1}{z_n} \sum_{i=0}^n T_i \Delta z_i \dots \dots \dots (39).$$

Teoreetiliselt peab kihi paksust, mille ulatusel temperatuur on konstantne, lugema diferentsiaalseks suuruseks, s. o. $\Delta z_i = dz$. Järelikut sel puhul võrrand (39) omandab kuju:

$$T_k = \frac{1}{z_n} \int_0^{z_n} T dz \dots \dots \dots (40),$$

kus T_k on maapinnalt kõrguseni z_n ulatuva õhusamba keskmine temperatuur.

Juhul, kui temperatuuri muutumine kõrgusega toimub konstantse gradiendi järgi, siis võrrand (38) avaldub kujul

$$T = T_0 - \delta z \quad (41), ^1)$$

kus T_0 on õhu absoluutne temperatuur kõrgusel $z=0$, δ — temperatuuri gradient ühemeetrise kõrguse kohta ja T — kõrgusele z vastav absoluutne temperatuur.

Asendades võrrandis (40) T tema avaldisega võrrandist (41) ja integreerides võrrandit (40) kõrgusest $z=0$ kuni kõrguseni $z=z_1$, saame

$$T_k = \frac{1}{z_1 - 0} \int_0^{z_1} (T_0 - \delta z) dz = \frac{T_0}{z_1 - 0} \int_0^{z_1} dz - \frac{\delta}{z_1 - 0} \int_0^{z_1} z dz = T_0 - \frac{\delta z_1}{2} = \frac{T_0 + (T_0 - \delta z_1)}{2}.$$

Võrrandi (41) järgi on avaldis $T_0 - \delta z_1$ kõrgusele z_1 vastav temperatuur T_1 ning seega avaldub T_k lõplikult kujul:

$$T_k = \frac{T_0 + T_1}{2} \quad (42).$$

Võrrandile (42) võime anda teise kuju. Kui teeme asenduse $T_0 = 273^\circ + t_0$ ja $T_1 = 273^\circ + t_1$, siis saame:

$$T_k = 273^\circ + \frac{t_0 + t_1}{2} \quad (43),$$

kus t_0 on temperatuur maapinnal, s. o. kõrgusel $z=0$, ja t_1 — temperatuur kõrgusel z_1 , arvates Celsiuse nullist. Temperatuurid t_0 ja t_1 allpool 0°C tuleb võtta miinusemärgiga ja pealpool 0°C — plussmärgiga.

Kui temperatuuri arvutamise aluseks võtta 0°C , siis võrrand (43) omandab kuju:

$$t_k = \frac{t_0 + t_1}{2} \quad (44)^2),$$

kus t_k on maapinnalt kõrguseni z_1 ulatuva õhusamba keskmine temperatuur arvates Celsiuse nullist.

Toodust järeldame, et kui temperatuur kõrgusega muutub konstantse gradiendi järgi, siis antud õhusamba keskmine temperatuur võrdub õhusamba alg- ja lõppkõrguse temperatuuride algebralise poolsumma.

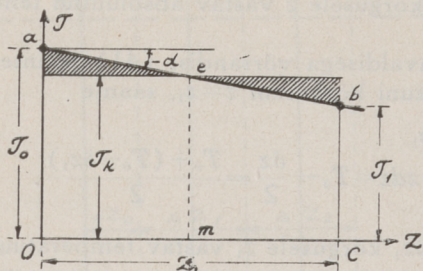
Võrrandeid (42) ja (44) on võimalik tuletada ka lihtsamalt. Nimelt võrrandiga (41) antud temperatuuri muutus kõrgusega kujutab koordinaat-tasapinnal sirgjoont, mis temperatuuri telge T lõikab koordinaatide algpunktist 0 kaugusel T_0 (joon. 20) ja on pööratud nurga $-\alpha$ võrra kõrgustelje Z poole. Nurga $-\alpha$ suurus, nagu seda järeldame võrrandist (41), oleneb temperatuuri gradiendist δ , sest viimane on antud juhul ühtlasi ka sirgjoone ab tõusunurga $(-\alpha)$ tangensiks, s. o. $\text{tg}(-\alpha) = \delta$. Järelikult kujund $Oabc$ on

¹⁾ Võrrandis δ tuleb võtta plussmärgiga, kui õhu temperatuur kõrgusega väheneb. Kui aga õhu temperatuur kõrgusega tõuseb, siis δ tuleb võtta miinusemärgiga.

²⁾ Kirjutada $T_k = t_k + 273$ ja asetada võrrandisse (43).

trapets ja seega T_k arvsuurus on võrdne trapetsi keskjoone pikkusega em , mis võrdub aluste Oa ja bc pikkuste poolsummaga, s. o.

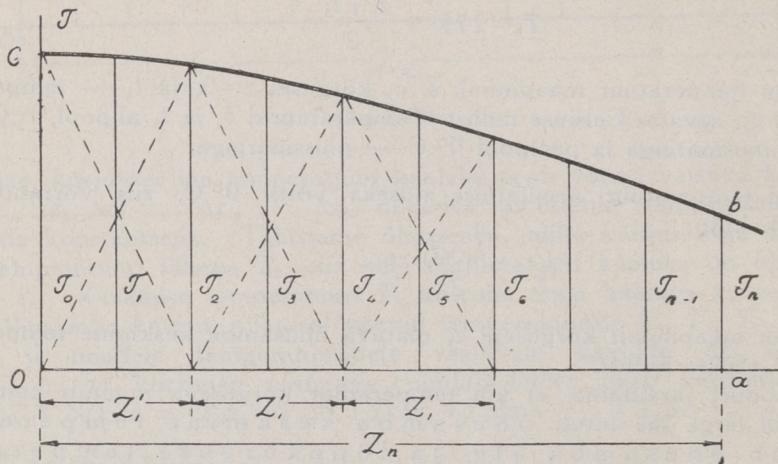
$$T_k = \overline{em} = \frac{Oa + bc}{2} = \frac{T_0 + T_1}{2}.$$



Joon. 20.

Võrrandiga (40) saame õhusamba keskmist temperatuuri arvutada ainult siis, kui on teada analüütiliselt temperatuuri käik kõrgussihis. Tihtilugu ei saa õhkkonnas kõrgussihis esinevale temperatuuri käigule analüütilist kuju anda. Küll aga on võimalik seda temperatuuri käiku saada graafiliselt kujutatud funktsioonina, ehitades viimase vastava diagrammi näol lennul tehtud vaatlusandmete põhjal.

Kui kõrgussihis esinev temperatuuri käik on antud graafiliselt vastava diagrammi näol, nagu näidatud joonisel 21, siis näiteks kõrguseni z_n ulatuva õhusamba keskmise temperatuuri T_k leidmiseks tuleb võrrandis (40) esineva



Joon. 21.

integraali väärtus leida graafiliselt, temperatuuridiagrammilt määratud ordinaatide kaudu. Lihtsamaid graafilise integreerimise valemeid on nn. Simpsoni valem, mille järgi võrrandis (40) esinev integraal avaldub kujul:

$$\int_0^{z_n} T dz = \frac{z_n}{3n} (T_0 + 4 T_1 + 2 T_2 + 4 T_3 + 2 T_4 + \dots + 4 T_{n-1} + T_n) \quad \dots (45)^1.$$

¹⁾ „Simpsoni valem“ on tuletatud eeldusel, et temperatuuri käiku kujutav kõver A (joonis 22) asendatakse ruutparabooliga, mis läbib kõrgusvahemiku z_2 alumisele ja

ülemisele piirile vastavaid temperatuurikõvera A punkte k ja p ning temperatuurikõvera punkti m , mis asetseb lõigu z_2 keskel, s. o. mis jagab kõrgusvahe z_2 pooleks. Ruutparabooli võrrandi, nagu teada analüütilisest geometriast, võime üldiselt avaldada kujul:

$$T = az^2 + bz + c,$$

kus koefitsientide a , b ja c väärtuse määravad temperatuurikõvera punktide k , m ja p koordinaadid. Punkti k koordinaadid on $T = T_0$ ja $z = 0$ (algkõrgus), punkti m koordinaadid on $T = T_1$ ja $z = \frac{1}{2}z_2$ ja punkti p koordinaadid on $T = T_2$ ja $z = z_2$. Asetades nende punktide koordinaadid eelantud paraboolivõrrandisse, saame kolm alljärgnevat tingimust:

$$T_0 = c$$

$$T_1 = \frac{1}{4}az_2^2 + \frac{1}{2}bz_2 + c$$

$$T_2 = az_2^2 + bz_2 + c.$$

Saadud võrrandite süsteemist leiame, et

$$a = \frac{2(T_0 + T_2 - 2T_1)}{z_2^2}; \quad b = \frac{4T_1 - 3T_0 - T_2}{z_2}; \quad c = T_0.$$

Asetades koefitsientide a , b ja c avaldised paraboolivõrrandisse, saame punkte k , m ja p läbiva parabooli võrrandi:

$$T = \frac{2(T_0 + T_2 - 2T_1)}{z_2^2} z^2 + \frac{4T_1 - 3T_0 - T_2}{z_2} z + T_0.$$

Järelikult avaldub võrrandis (40) esinev integraal antud juhul:

$$\int_0^{z_2} T dz = \int_0^{z_2} \frac{2(T_0 + T_2 - 2T_1)}{z_2^2} z^2 dz + \int_0^{z_2} \frac{4T_1 - 3T_0 - T_2}{z_2} z dz + \int_0^{z_2} T_0 dz.$$

Teostades integreerimise ja ja koondades sarnased liikmed, saame:

$$\int_0^{z_2} T dz = \frac{z_2}{6} (T_0 + 4T_1 + T_2).$$

Saadud integraali väärtus annab pindala $Okpn$ (joon. 22). Kui ordinaatide arvu, mis peavad võrdsete kauguste järgi üksteisele järgnema, suurendame indeksist 0 (null) kuni indeksini n , kus n on paarisarv, siis kõveraaluse pindala võime leida sama reeglga, tarvitades seda eraldi iga kolme ordinaadiga määratud pindala kohta, millised joonisel 21 on märgitud diagonaalidega. Seega pindala $Ocba$ avaldub summana:

$$\begin{aligned} \int_0^{z_n} T dz = & \frac{z'_1}{6} (T_0 + 4T_1 + T_2) + \frac{z'_1}{6} (T_2 + 4T_3 + T_4) + \dots + \\ & + \frac{z'_1}{6} (T_{n-2} + 4T_{n-1} + T_n). \end{aligned}$$

Võttes $\frac{z'_1}{6}$ sulgude ette, koondades sarnased liikmed ja arvesse võttes, et antud juhul

$$z'_1 = z_n : \frac{n}{2}, \text{ sest } z_n = z'_1 \cdot \frac{n}{2},$$

saame lõplikult:

$$\int_0^{z_n} T dz = \frac{z_n}{3n} (T_0 + 4T_1 + 2T_2 + 4T_3 + \dots + 4T_{n-1} + T_n),$$

mida oligi vaja tõestada.

Asetades võrrandiga (45) antud integraali avaldise võrrandisse (40) ja koondades suuruse z_n , saame avaldise keskmise temperatuuri jaoks kujul:

$$T_k = \frac{1}{3n} (T_0 + 4 T_1 + 2 T_2 + 4 T_3 + 2 T_4 + 4 T_5 + \dots + 4 T_{n-1} + T_n) \dots (46),$$

kus $T_0, T_1 \dots T_{n-1}$ ja T_n on temperatuuridiagrammilt määratud ordinaadid (vt. joon. 21), milledest T_0 on algkõrgusele (tavaliselt maapind) vastav ordinaat, s. o. õhu absoluutne temperatuur algkõrgusel, T_n — lõppkõrgusele vastav ordinaat, s. o. õhu absoluutne temperatuur lõppkõrgusel, ja $T_1, T_2 \dots T_{n-1}$ on vahepealsed ordinaadid.

Ordinaatide $T_0, T_1, T_2 \dots T_{n-1}$ ja T_n suhtes on tingimuseks, et nende üldarv peab olema paaritu, ja seega, kui ordinaatide loetelu algab indeksiga null, siis viimase ordinaadi indeks n peab olema alati paarisarv ja võrduma ordinaatide üldarvuga miinus üks.

Ordinaadid T_0, T_1, T_2, T_3 jne. tuleb diagrammil mõõta üksteisest võrdsetel kaugustel. Järelikult, kui tähistame ordinaatide vahekauguse tähega l ning kõrguse tähega z_n , leiame vahekauguse suuruse võrrandiga

$$l = \frac{z_n}{n} \dots (47).$$

Võrrandites (45) ja (46) ordinaatide ees asetsevad koefitsiendid 1, 4, 2, 4, 2 jne., nagu nähtub võrrandist, tuleb asetada sääraselt, et koefitsient 4 asetseks iga paarituarvulise indeksiga märgitud ordinaadi ees ja koefitsient 2 — paarisarvulise indeksiga märgitud ordinaadi ees. Esimese ja viimase ordinaadi, s. o. indeksitega 0 ja n märgitud ordinaatide koefitsient on 1.

Ordinaatide arvu valik võrrandis (46) oleneb temperatuurikõvera A iseloomust; mida korrapäratum on temperatuurikõver, seda rohkem tuleb võtta ordinaate, et saada T_k väärtust suurema täpsusega. Kui temperatuurikõver on Z -telje poole langev korrapäraselt voolav kõverjoon, siis saame T_k jaoks küllaldase täpsuse, kui võtame kolm ordinaati. Sel puhul $n=2$ ja võrrand (46) avaldub kujul

$$T_k = \frac{1}{6} (T_0 + 4 T_1 + T_2) \dots (48).$$

Juhul, kui temperatuurikõver diagrammil avaldub sirgjoonena, siis võrrand (48) muutub võrrandiks (42), sest sel puhul T_1 kui trapetsi keskjoon on: $T_1 = \frac{1}{2} (T_0 + T_2)$.

Võrrandites (46) ja (48) on ordinaadid arvutatud absoluutsest nullpunktist, kuid joonisel 19 antud diagrammi võib ehitada ka ordinaatide järgi, mis on arvutatud Celsiuse nullist. Sel puhul temperatuurid allpool 0°C asetsevad allpool Z -telge ja sellest diagrammi-osast mõõdetud ordinaadid tuleb valemissse viia miinusmärgiga. Sääraselt diagrammilt saame keskmise temperatuuri arvatult Celsiuse nullist.

Õhusamba keskmiseks temperatuuriks võib peale aritmeetilise keskmise võtta veel muid keskmisi, nagu geomeetriline keskmine jne. Eriti sobiv on selleks tarvitada nn. h a r m o o n i l i s t k e s k m i s t¹⁾, mis leitakse antud õhusamba ulatusel võetud temperatuuride pöördväärtuste kaudu. Tähistame, nagu varemgi, õhusamba ulatusel võetud temperatuure tähtedega $T_0, T_1, T_2, \dots T_1, \dots T_n$ ja õhusamba keskmise temperatuuri tähega T_k (vt. joon.

¹⁾ Vt. „Polütroopne õhkkond“.

19) ning temperatuuridele vastavad kaalud, s. o. kihi paksused, milles mõõdetud temperatuuri võib vaadelda konstantsena, — tähtedega $\Delta z_0, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_i, \dots, \Delta z_n$. Nendele temperatuuridele vastavad pöördväärtused on $\frac{1}{T_0}, \frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}, \dots, \frac{1}{T_i}, \dots, \frac{1}{T_n}$, millede käiku joonisel 19 kõrguse z_n ulatusel kujutab kõver $B^1)$. Ka antud juhul, nagu keskmise aritmeetilise puhulgi, jääb kehtivaks lause, et keskmise temperatuuri pöördväärtuse $\frac{1}{T_k}$ korrutis tema kaaluga, s. o. õhusamba kõrgusega z_n , on võrdne õhusamba kõrguse ulatusel võetud temperatuuride pöördväärtuste $\frac{1}{T_0}, \frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}, \dots, \frac{1}{T_i}, \dots, \frac{1}{T_n}$ ja nendele temperatuuridele vastavate kaalude, s. o. õhukihi paksuste $\Delta z_0, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_i, \dots, \Delta z_n$ korrutiste summaga²⁾:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_k} z_n &= \frac{1}{T_0} \Delta z_0 + \frac{1}{T_1} \Delta z_1 + \frac{1}{T_2} \Delta z_2 + \dots + \frac{1}{T_i} \Delta z_i + \dots + \frac{1}{T_n} \Delta z_n = \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{1}{T_i} \Delta z_i. \end{aligned}$$

Lahendades selle võrrandi T_k suhtes saame:

$$T_k = \frac{z_n}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{T_i} \Delta z_i} \dots \dots \dots (49).$$

Arvates võrrandis (49) õhukihi paksuse Δz_i võrdseks dz , võime võrrandile (49) anda kuju:

$$T_k = \frac{z_n}{\int_0^{z_n} \frac{dz}{T}} \dots \dots \dots (50).$$

Kui temperatuur kõrgusega muutub konstantse gradiendiga δ , s. o. võrrandi (41) järgi, siis, asendades võrrandis (50) dz tema avaldisega dT kaudu, saame leida antud juhu jaoks T_k avaldise. Diferentsides võrrandit (41) leiame, et

$$dT = -\delta dz; \quad dz = -\frac{dT}{\delta}.$$

Asendades võrrandis (50) dz tema avaldisega ja integreerides võrrandit (50) nullkõrgusele vastavast temperatuurist T_0 kuni kõrgusele z_1 vastava temperatuurini T_1 , saame:

$$T_k = -\frac{\delta z_1}{\int_{T_0}^{T_1} \frac{dT}{T}} = -\frac{\delta z_1}{\ln T_1 - \ln T_0} = \frac{\delta z_1}{\ln \frac{T_0}{T_1}}.$$

¹⁾ Joonisel 19 kõvera B ordinaatide mõõtkava on 100 korda suurem kõvera A ordinaatide mõõtkavast.

²⁾ Pindala *onmco* peab võrduma pindalaga *on'm'co* (joon. 19).

Selleks et võrrandile anda arvutlemiseks lihtsamat kuju ja et logaritmimist toimetada kümnendlogaritmidega, asendame võrrandi (41) põhjal $\delta z_1 = T_0 - T_1$ ja võrrandis esineva naturaalogaritmi $\ln \frac{T_0}{T_1}$ tema avaldisega kümnend-

logaritmi kaudu, s. o. $\frac{1}{M} \log \frac{T_0}{T_1}$, kus M on logaritmide moodul ($M = \log e = 0,434294$), saame konstantse temperatuurigradiendi puhul T_k arvutusvõrrandi lõplikul kujul:

$$T_k = 0,434294 \frac{T_0 - T_1}{\log \frac{T_0}{T_1}} \dots \dots \dots (51).$$

Võrranditega (42) ja (51) T_k jaoks saadavad resultaadid erinevad üksteisest kaunis vähe. Näiteks 4000-m kõrguse puhul, kui temperatuuri gradient on $0,0065^\circ\text{C/m}$, on vahe $0,2^\circ\text{C}$, ja 10 000-m kõrguse puhul $1,38^\circ\text{C}$. Järelikult võrrandit (51) on mõtet tarvitada ainult suurte kõrguste jaoks.

Kui temperatuuri muutus kõrgusega on antud diagrammiga, siis võrrandis (50) esineva integraali arvutluseks võime kasutada Simpsoni valemit, mis avaldub võrrandiga (45), kuid sel juhul tuleb ordinaatideks võtta temperatuuride pöördväärtused, s. o. suurused:

$$\frac{1}{T_0}, \frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}, \frac{1}{T_3} \dots \dots, \frac{1}{T_{n-1}}, \frac{1}{T_n},$$

ja seega integraali avaldis on:

$$\int_0^{z_n} \frac{1}{T} dz = \frac{z_n}{3n} \left(\frac{1}{T_0} + 4\frac{1}{T_1} + 2\frac{1}{T_2} + 4\frac{1}{T_3} + \dots + 4\frac{1}{T_{n-1}} + \frac{1}{T_n} \right) \dots \dots (52).$$

Asendades võrrandis (50) esineva integraali tema avaldisega võrrandis (52) ja koondades z_n , saame T_k avaldise kujul:

$$T_k = \frac{3n}{\frac{1}{T_0} + 4\frac{1}{T_1} + 2\frac{1}{T_2} + 4\frac{1}{T_3} + \dots + 4\frac{1}{T_{n-1}} + \frac{1}{T_n}} \dots \dots (53).$$

Võrrandis (53) esinevate ordinaatide, nende koefitsientide ja indeksi n kohta on kehtivad samad reeglid nagu võrrandi (46) puhul.

Kui võrrandis (53) piirdume kolme ordinaadiga, s. o. kui temperatuurijoon diagrammil on ladusalt voolav kõver (puuduvad temperatuuri inversioonid), siis võrrand (53) omab kuju:

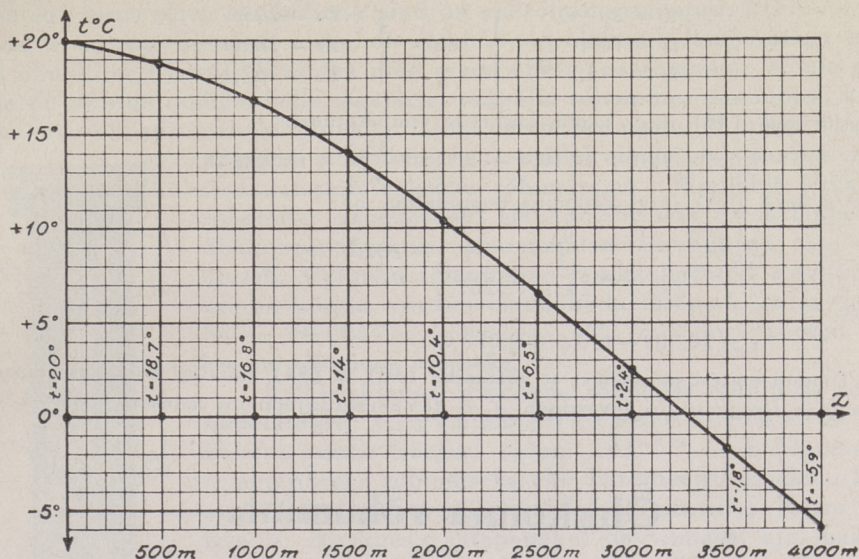
$$T_k = \frac{6}{\frac{1}{T_0} + 4\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}} \dots \dots \dots (54).$$

Võrrandites (53) ja (54) peab temperatuurid arvutama ainult absoluutsest nullist.

Arvutlustes, kus temperatuurid ja kõrgused on määratud harilikkude mõõduriistadega, ei ole mingit mõtet kasutada T_k arvutamiseks võrrandeid (53) ja (54), kuna kõrguste ja neile vastavate temperatuuride määramistel on tehtud kindlasti suuremaid vigu, kui seda annavad võrrandid (46) ja (48) võrrandite (53) ja (54) suhtes.

Näide 7.

Arvutada joonisel 23 antud temperatuuridiagrammist keskmine temperatuur kuni kõrguseni 4000 m.



Joon. 23.

Arvutamiseks võrrandite (46) ja (53) järgi valime ordinaadid kõrguse iga 500 m järel.

Diagrammist nähtub, et:

$$\begin{array}{l}
 t_0 = 20^{\circ}\text{C} \\
 t_1 = 18,7^{\circ}\text{C} \\
 t_2 = 16,8^{\circ}\text{C} \\
 t_3 = 14^{\circ}\text{C} \\
 t_4 = 10,4^{\circ}\text{C} \\
 t_5 = 6,5^{\circ}\text{C} \\
 t_6 = 2,4^{\circ}\text{C} \\
 t_7 = -1,8^{\circ}\text{C} \\
 t_8 = -5,9^{\circ}\text{C}
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \end{array}} \right\} \text{ ehk } \left\{ \begin{array}{l}
 T_0 = 293^{\circ} \\
 T_1 = 291,7^{\circ} \\
 T_2 = 289,8^{\circ} \\
 T_3 = 287^{\circ} \\
 T_4 = 283,4^{\circ} \\
 T_5 = 279,5^{\circ} \\
 T_6 = 275,4^{\circ} \\
 T_7 = 271,2^{\circ} \\
 T_8 = 267,1^{\circ}
 \end{array} \right.$$

Arvutades keskmise temperatuuri arvates 0°C ja arvesse võttes, et antud juhul $n=8$, saame võrrandi (46) järgi:

$$\begin{aligned}
 t_k &= \frac{1}{3,8} (20 + 4 \cdot 18,7 + 2 \cdot 16,8 + 4 \cdot 14 + 2 \cdot 10,4 + 4 \cdot 6,5 + 2 \cdot 2,4 - 4 \cdot 1,8 - 5,9) = \\
 &= \frac{1}{24} \cdot 222,9 = +9,29^{\circ}\text{C}.
 \end{aligned}$$

Võrrandi (53) järgi on keskmise temperatuuri väärtus:

$$\begin{aligned}
 T_k &= \frac{3 \cdot 8}{\frac{1}{293} + 4 \cdot \frac{1}{291,7} + 2 \cdot \frac{1}{289,8} + 4 \cdot \frac{1}{287} + 2 \cdot \frac{1}{283,4} + 4 \cdot \frac{1}{279,5} + 2 \cdot \frac{1}{275,4} + 4 \cdot \frac{1}{271,2} + \frac{1}{267,1}} \\
 &= \frac{24}{0,0850882} = 282,06^{\circ}.
 \end{aligned}$$

või arvates 0°C kohalt:

$$t_k = 282,06 - 273 = +9,06^{\circ}\text{C}.$$

Selleks et saavutada keskmist temperatuuri võrrandite (48) ja (54) järgi, valime ordinaadid $z = 0$, $z = 2000$ -m ja $z = 4000$ -meetrise kõrguse kohta. Diagrammist nähtub, et sel puhul ordinaadid on:

$$\left. \begin{array}{l} t_0 = 20^\circ \text{ C} \\ t_1 = 10,4^\circ \text{ C} \\ t_2 = -5,9^\circ \text{ C} \end{array} \right\} \text{ ehk } \left\{ \begin{array}{l} T_0 = 293^\circ \\ T_1 = 283,4^\circ \\ T_2 = 267,1^\circ \end{array} \right.$$

Võrrandi (48) järgi saame keskmise temperatuuri:

$$t_k = \frac{1}{6} (20 + 4 \cdot 10,4 - 5,9) = \frac{55,7}{6} = +9,28^\circ \text{ C.}$$

Võrrandi (54) järgi keskmine temperatuur on:

$$T_k = \frac{6}{\frac{1}{293} + 4 \frac{1}{283,4} + \frac{1}{267,1}} = 282,07^\circ,$$

või siit:

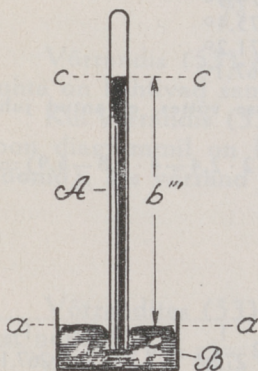
$$t_k = 282,07 - 273 = +9,07^\circ \text{ C.}$$

Toodud näitest järeldame, et võrrandid (48) ja (54) annavad küllaldase täpsuse, kui puudub temperatuuri inversioon, s. o. temperatuurijoon on ladusalt voolav kõver.

Õhkkonna rõhumine.

Õhk, olgugi et ta on kerge aine, omab maakera külgetõmbejõu mõjul kaalu, mille tõttu ümber maakera hoidubki õhukiht, mida nimetame õhkkonnaks ehk atmosfääriks. Kõigile õhkkonnas kui ka maapinnal asuvaile kehadele ja samuti maapinnale enesele avaldab õhkkond teatavat rõhumist.

Vaatlused näitavad, et õhusammas, mille aluspinnaks merepinna kõrgusel on üks ruutmeeter ja kõrguseks kogu õhkkonna kõrgus, kaalub keskmiselt 10332 kg. Seega rõhub õhkkond merepinna kõrgusel igale ruutmeetrilisele pindalale 10332-kilogrammise raskusega. Õhkkonna rõhu suurus antud pindalale oleneb selle pindala kohal asuva õhusamba kõrgusest. Kui tõuseme ülespoole, siis väheneb õhkkonnas rõhumine, sest tõusmisega väheneb meie kohal oleva õhusamba kõrgus, kuna allapoole-laskumisel suureneb õhusamba kõrgus ja vastavalt sellele suureneb ka õhkkonna rõhumine.



Joon. 24.

Õhkkonna rõhumist võrreldakse elavhõbedasamba rõhumisega, mis oma raskusega tasakaalustab õhkkonna rõhumise. Säärased elavhõbedasamba moodustamiseks võetakse umbes 900 mm pikkune ühest otsast kinnine klaastoru A (joonis 24), mis elavhõbedat täis valatakse¹⁾, mille lahtine ots suletakse ja siis vertikaalselt asetatakse elavhõbedaga täidetud kaussi B. Kui avame kaussi elavhõbedas asetseva klaastoru alumise otsa,

¹⁾ Tegelikult toimub „valamine“ aurustatud elavhõbedade kondenseerumise teel klaastorus, mis õhust tühjaks pumbatakse (tugevasti hõrendatakse).

langeb elavhõbeda tase klaastorus mingisuguse horisontaaljooneni cc ja jääb sellele kõrgusele püsima. See nähtus on tingitud asjaolust, et välisrõhk selle seadise puhul saab rõhuda ainult kausis oleva elavhõbeda pinnale, kuna aga torus oleva elavhõbeda pind on välisõhust eraldatud. Pealpool seda pinda, s. o. toru ülemises otsas, on elavhõbeda allapoole-langemisega tekkinud õhutühjus (Torricelli tühik) ning seega õhkkonna rõhumine sellele pindalale on võrdne nulliga. Selle tagajärjel välisõhu rõhumine, mis mõjub kausis oleva elavhõbeda vabale pinnale, laseb elavhõbeda-samba torus langeda niisuguse kõrguseni (cc), millel elavhõbeda-samba raskus tasakaalustub välisõhu rõhumisega. Järelikult õhkkonna rõhumise vähenemisel elavhõbeda tase torus langeb ja õhkkonna rõhumise suurenemisel elavhõbeda tase torus tõuseb. Välisõhu rõhumisega tasakaalustatud elavhõbeda-samba kõrgus võrdub elavhõbeda tasemete cc ja aa vahelise vertikaalse kõrgusega b''' , mis ongi võetud õhkkonna rõhumise mõõteks.

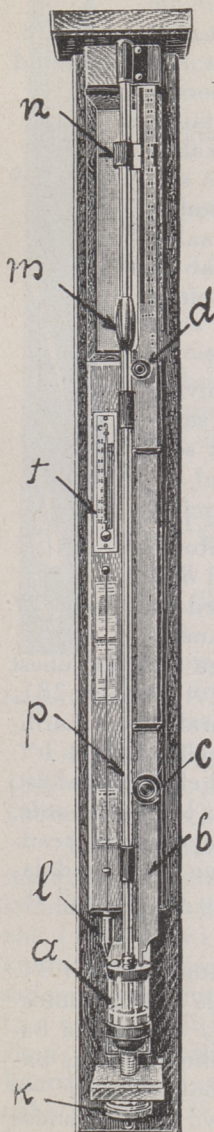
Eelkirjeldatud õhkkonna rõhumise mõõtmise seadist nimetatakse *elavhõbedabaromeetrik*s ja elavhõbeda-samba kõrgust (joon. 24) b''' — õhkkonna baromeetriliseks rõhumiseks ehk baromeetri seisuks. Baromeetrist rõhumist mõõdetakse millimeetrites. Norra teadlase V. Bjerknes'e ettepanekul on viimasel ajal hakatud õhkkonna rõhumist mõõtma millibaarides, millest lähemalt kõneleme allpool. Baromeetri elavhõbeda horisontaalseid pindu nimetatakse nivoopindadeks. Seega mõõdetakse baromeetrist rõhumist nivoopindade-vahelise kõrgusega.

Õhkkonna baromeetrist rõhumist kui ka õhkkonna rõhumist ühe-ruutmeetrilisele pindalale nimetatakse aeromehaanikas õhkkonna staatiliseks rõhumiseks.

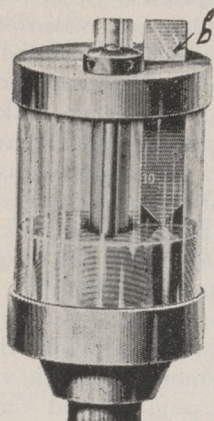
Õhurõhumist millimeetrites elavhõbeda-samba kõrguse järgi tähistatakse sümboolselt $mm\ Hg$.

Joonisel 24 näidatud baromeetrit nimetatakse *anumbaromeetrik*s. Peale anumbaromeetrite tarvatakse veel *sifoon- ja anum-sifoonbaromeet*reid.

Anumbaromeetri üldvaade (firma Wilh. Lambrecht AG., Göttingen) on antud joonisel 25. Tähtedega on märgitud: p — baromeetri toru, mille alumine ots ulatub anumasse a asetsevasse elavhõbedasse, l — lood baromeetri vertikaalsesse asendisse seadmiseks, t — termomeeter, k — kruvi, mille abil suletakse baromeetri toru alumine ots riista transporteerimisel, et õhk ei satuks torusse, b — valgevasest astmik elavhõbeda-samba kõrguse mõõtmiseks, mille ülemises otsas asetseb noonius n (näitetäpsusega kuni 0,1 mm) mikromeetrilise kruviga d . Astmiku b alumine teravikuga varustatud ots ulatub läbi anuma a kaane elavhõbeda alumise nivooni. Astmiku teraviku sead-



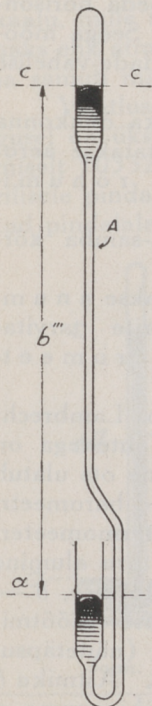
joon. 25.



Joon. 26.

tub õhkkonna rõhumisega. Õhkkonna rõhumise suuruse annab ka selle baromeetri juures ülemise (cc) ja alumise (aa) nivoo pinna vaheline elavhõbeda-samba kõrgus b''' .

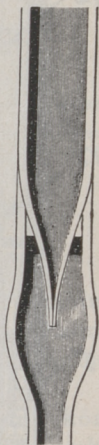
Lihtsa sifoonbaromeetri üldvaade on antud joonisel 29. Tähtedega on märgitud: a — baromeetri toru, b — astmik nivoo-pindade vahelise kõrguse mõõtmiseks ja k — kruvi astmiku sead-miseks, mille abil astmiku alumine nullpunkt sea-takse alumisele nivoole.



Joon. 28.

mine alumise nivoo tasemele toimub mikromeetrilise kruviga c . Anuma, astmiku teraviku ja alumise nivoo üldvaade on suurendatult näidatud joonisel 26. Joo-nisel 25 on veel tähega m märgitud nn. õhumulli-püüdja, mis ei lase juhuslikult baromeetri toru sattu-nud õhumullil pääseda pealpool ülemist nivood asu-vasse tühikusse. Õhumullipüüdja on suurendatult näi-datud joonisel 27, kust selgub ka tema tegevuse print-siip.

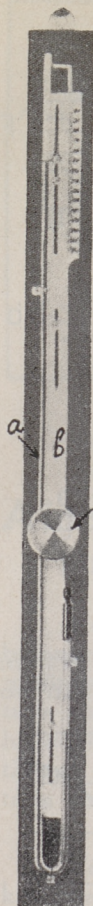
Sifoonbaromeetri skeem on näidatud joonisel 28. Baromeeter koosneb ülemisest otsast kinnijoodetud klaastorust A , mille alumine ots on looga-kujuliselt üles keeratud. Klaastoru on täide-tud elavhõbedaga, mis toru vertikaalse asendi puhul langeb toru ülemises osas seni alla, kuni nivoo cc ja aa vahel moodus-tuva elavhõbeda-samba raskus tasakaalus-



Joon. 27.

Anumsifoonbaromeetri skeem on antud joo-nisel 30. Anumsifoonbaromeeter erineb sifoon-baromeetrist sellega, et baromeetri toru A on oma sifoonharuga n ühendatud üleni elavhõbedaga täidetud kinnise anuma N kaudu. Seega anum-sifoonbaromeeter töötab täpselt samuti nagu hariliku ühest tükist painutatud toruga sifoonbaromeeter (vt. joonist 28), s. o. õhkkonna baromeetrilise rõhumise määrab, nagu harili-kulgi sifoonbaromeetril, nivoo cc ja aa vaheline kõrgus b''' . Erinevus on selles, et anuma põhi p on tehtud elastest nahast, mida kruvi k abil on võimalik tõsta üles- või lasta allapoole, mis võimaldab baromeetri sifoontorus n nivoo pinna sead-mist, s. o. saame soovikohaselt nivoo pinda aa lasta madala-male või tõsta kõrgemale. Peale eelkirjeldatu on skeemil tä-hega m märgitud õhumullipüüdja.

Anumsifoonbaromeetri üldvaade on antud joonisel 31. Tähtedega on märgitud: L — vesilood, mille abil baromee-ter seatakse täpselt vertikaalsesse asendisse, J — mööda ba-romeetri toru kruvide K abil vertikaalsihis liikuv noonius ba-romeetri nivoo pindade vahelise kõrguse mõõtmiseks, F — nooniusse täpsusseadme mikromeetriline kruvi, b — alumise nivoo pinna noonius, c — nooniusse seade kruvi, E — baro-meetri alumise nivoo pinna seade kruvi.



Joon. 29.

Joonisel 32 on näidatud noonius suurendatud kujul. Nooniuse astmik, joonisel märgitud *No*, võimaldab nivoopindade vahelist kõrgust mõõta, nagu ka astmikult nähtub, 0,02-mm täpsusega.

Joonisel 31 näidatud baromeetri raskus on 16 kg.

Nagu juba öeldud, muutub õhkkonna rõhumine ühes kõrgusega, kuid õhkkonna rõhumine teatavas ajavahemikus muutub ka ühel ja samal kõrgusel. See õhkkonna rõhumise muutumine võib oma iseloomult olla kas perioodiline või juhuslik. Perioodilise muutusena esineb õhkkonna rõhumise ööpäevane ja aastane käik. Juhuslikku iseloomu omavad näiteks tsükloonidest tingitud õhkkonna rõhumise muutused jne.

Geograafiline laiuskraad	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Amplituud mm	1,96	1,81	1,62	1,30	0,92	0,54	0,18

Õhkkonna rõhumise ööpäeval käigul on kaks maksimumi ja kaks miinimumi. Maksimumid üldiselt on kella 9—10 ja 21—22, kuna miinimumid esinevad kella 3—4 ja 15—16. Õhkkonna rõhumise ööpäevase käigu amplituud, s. o. rõhumise maksimumi ja miinimumi vahe, on troopilises vöös 2 kuni 3 mm ja väheneb pooluste suunas, nagu nähtub ülalolevast tabelist.

Joonisel 33 on antud 50 aasta (1866—1915) keskmine õhkkonna rõhumise ööpäevane käik Tartus, kust nähtub, et maksimumid on kella 12 ja 24 ning miinimumid kella 6 ja 18 paiku.

Õhkkonna rõhumise aastane käik oleneb maako-
hast. Näiteks mereäärsetes kohtades on aastane rõhumise muutus väiksem kui mandritel. Joonisel 34 on antud 50 aasta (1866—1915) keskmine õhkkonna rõhumise aastane käik Tartus.

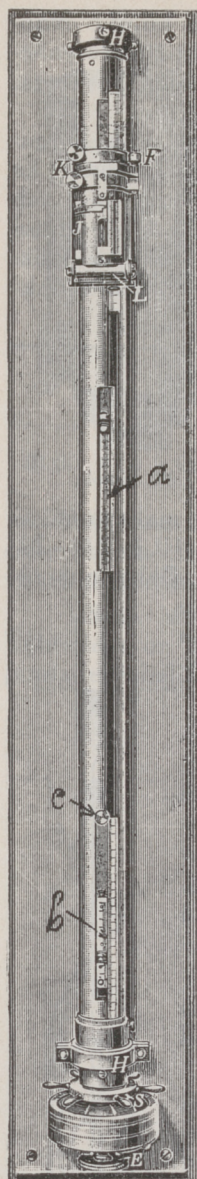
Kõige kõrgem õhkkonna rõhumine on mõõdetud Riias (800 mm Hg) ja kõige madalam — Hiina merel taifuuni ajal (686,5 mm Hg).

Kui geograafilisel kaardil ühendame omavahel joonega merepinnale taandatud, antud ajamomendil ühesuuruse õhkkonna-rõhumisega punktid, saame nn. s a m a r õ h u j o o n e d ehk i s o b a a r i d. Neid kaarte, kui neile peale rõhumise on kantud veel teised ilmastiku-elementid (temperatuur, pilvitus, sademed, tuul jne.), nimetatakse s ü n o p t i l i s t e k s k a a r t i d e k s. Neil kaartidel kujutavad isobaarid enamasti kinnisi ringi- või ellipsikujulisi kõverjooni. Isobaarid joonestatakse kaardile iga 5-millibaarilise õhurõhumisvahe järele¹⁾, nagu näha jooniselt 35.

1) Vt. peatükki „Õhkkonna rõhumise mõõtmine millibaarides“.



Joon. 30.

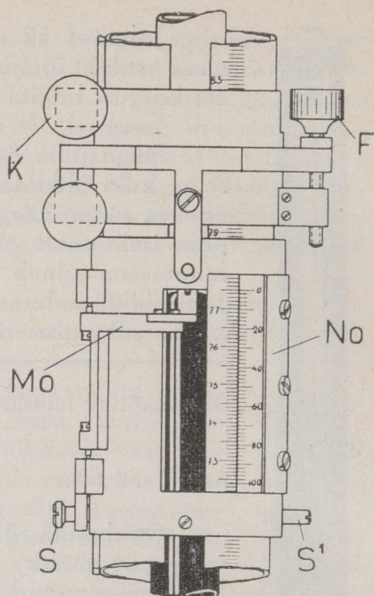


Joon. 31.

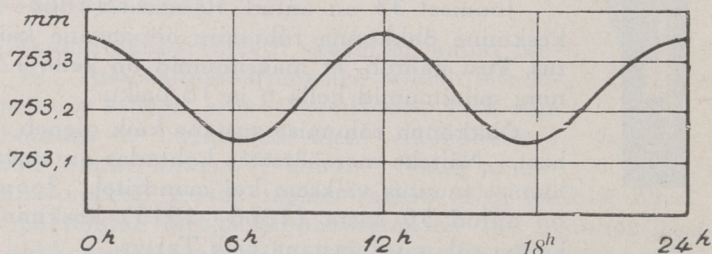
Sünoptilise kaardi järgi on võimalik otsustada, kui kiiresti tõuseb või langeb õhkkonna rõhumine antud suunas, ja selle järgi määrata õhumasside liikumise suunda, kiirust jne.

Õhkkonna rõhumise muutumist horisontaalsuunas mõõdetakse nn. õhkkonna baromeetrilise rõhumise gradiendiga.

Õhkkonna baromeetrilise rõhumise gradiendiks nimetatakse üldiselt samale horisontaalpinna (meteoroloogias merepinna) kõrgusele taandatud ja samaaegselt mõõdetud õhkkonna-rõhumiste vahet kahe punkti vahel, millede kaugus üksteisest, risti isobaarile, on üks meridiaani kraad, s. o. 111 km (täpsemalt 111,2 km) ehk 60 meremiili. Suunda risti iso-



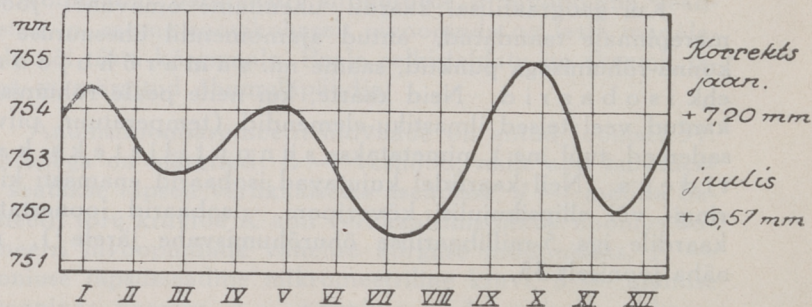
Joon. 32.



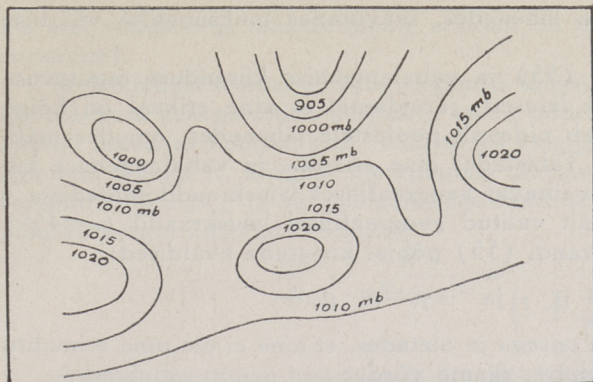
Joon. 33.

baaridele nimetatakse gradiendi sihiks.

(Aasta keskm. 760,15 mm)



Joon. 34.



Joon. 35.

Kui õhkkonnas, vastavalt antud ajamomendile, läbi kõikide samarõhupunktide mõtteliselt kujundame pinna, siis saame nn. isobaarpinna. Need pinnad on kõrgrõhu alal kumerusega ülespoole ja madalrõhu alal kumerusega allapoole. Isobaarpinna lõikejoon vertikaalpinnaga annab vertikaalpindse isobaari.

Aine erikaalu muutuvus olenevalt temperatuurist, geograafilisest laiuusest ja kõrgusest.

Mehaanikast teame, et keha raskus on keha massi ja kehale mõjuva vabalangemise kiirenduse korrutis. Järelikult aine erikaal ¹⁾, mis on ühte kantmõõtühikusse mahtuva aine raskus, võrdub sellesse kantmõõtühikusse mahtuva aine massi ja temale mõjuva vabalangemise kiirenduse korrutisega. Tähistades aine erikaalu tähega γ , ühte kantmõõtühikusse mahtuva aine massi tähega m ja vabalangemise kiirenduse tähega g , võime eelöeldu põhjal kirjutada vahekorra:

$$\gamma = mg \quad (55).$$

Võrrandis (55) esinev mass m on antud aine jaoks muutumatu suurus, kui aine ei muuda oma erimahtu ²⁾; see tingimus püsib, kui antud ainele mõjuv rõhumine ja temperatuur jäävad muutumatuks. Vabalangemise kiirendus g ei ole konstantne suurus, vaid muutub ühes koha geograafilise laiuusega ja kõrgusega (kaugusega maakera keskpunktist). Järelikult aine erikaal kui vabalangemise kiirendusest sõltuv suurus muutub samuti olenevalt nii koha geograafilisest laiuusest kui ka kõrgusest merepinnalt.

Vabalangemise kiirenduse muutumine ühes geograafilise laiuskraadiga on tingitud maakera geoidsest kujust ja eriti maakera pöörlemisest esilekutsutud tsentrifugaaljõu muutumisest ühes koha geograafilise laiuusega ³⁾. Nimelt on tsentrifugaaljõul maksimaalne väärtus ekvaatoril ja poolustele lähenedes see väheneb pidevalt, muutudes poolustel võrdseks nullile. Seega vabalangemise kiirendus, mis on tsentrifugaaljõust ja maakera külgetõmbejõust esilekutsutud kiirenduste geomeetriline summa, on ekvaatoril kõige väiksem

¹⁾ Tehnikas nimetatakse aine erikaaluks harilikult ühe kantdetsimeetri (gaasjate ainete puhul ühe kantmeetri) aine raskust kilogrammides.

²⁾ Tehnikas nimetatakse aine erimahuks ruumala, mille võtab enda alla aine hulk, mille raskus on üks kilogramm. Seda ruumala nimetatakse vahel ka kilogramm-mahuks.

³⁾ Ekvaatori ja pooluse vahel on kiirenduse erinevus 0,052 m/sek.², millest 0,018 m/sek.² on tingitud maakera geoidsest kujust.

ja kasvab pidevalt poolustele lähenedes, saavutades maksimaalse väärtuse poolustel.

Aluseks võttes võrrandi (55) ja vabalangemise kiirenduse muutuvuse olenevalt koha geograafilisest laiusest, järeldame, et aine erikaal on kõige väiksem ekvaatoril ja suureneb pidevalt poolustele lähenedes, omades maksimaalset väärtust poolustel. Tähistades aine erikaalu ja vabalangemise kiirenduse mingisugusel vabalt valitaval geograafilisel laiuskraadil tähtedega γ ja g ning mõnel teisel kindlalt valitud geograafilisel laiuskraadil ($\varphi=45^\circ$) tähtedega γ_0 ja g_0 , võime võrrandi (55) põhjal kirjutada avaldised:

$$\gamma = m \cdot g \quad \text{ja} \quad \gamma_0 = m \cdot g_0.$$

Jagades esimese avaldise teisega ja oletades, et aine ei ole oma erimahtu muutnud (sel puhul m koondub), saame võrde:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{g}{g_0},$$

kust leiame:

$$\gamma = \gamma_0 \frac{g}{g_0} \dots \dots \dots (56).$$

Võrrandist (56) nähtub, et kui teame aine erikaalu mõnel geograafilisel laiusel ja vabalangemise kiirenduste suhte muutumist vastavalt geograafilisele laiuskraadile, võime võrrandi (56) järgi leida igal geograafilisel laiuskraadil aine erikaalu.

Kõik säärasead arvutlused toimuvadki võrrandi (56) alusel. Arvutluseks on tarvis teada aine erikaalu, mida aine omab normaalsetes tingimustes, merepinna kõrgusel vastavalt 45° geograafilisele laiusle, ning merepinna kõrgusel toimuva vabalangemise kiirenduste suhte muutumist ühes geograafilise laiuskraadiga, kusjuures aluseks võetakse vabalangemise kiirenduse väärtus 45° geograafilisel laiusel. Helmert'i järgi see kiirenduste suhe avaldub valemiga

$$\frac{g}{g_0} = 1 - 0,00265 \cos 2\varphi \dots \dots \dots (57),$$

kus φ on geograafiline laius, g — laiusle φ vastav vabalangemise kiirendus merepinna kõrgusel, g_0 — vabalangemise kiirendus 45° geograafilisel laiusel ning merepinna kõrgusel.

Vabalangemise kiirendus 45° geograafilisel laiusel ja merepinna kõrgusel võetakse võrdseks $g_0 = 9,80665 \text{ m/sek.}^2$, kuna selle arvuna ta on kindlaks määratud rahvusvaheliselt 1893. aastal. Sama arvuna ta esineb rahvusvahelise standardse õhkkonna arvutlustes.

Aluseks võttes võrrandi (57), võime võrrandile (56) anda kuju:

$$\gamma = \gamma_0 (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) \dots \dots \dots (58).$$

Võrrand (58), nagu eeltoodust järeldame, annab aine erikaalu merepinna kõrguse jaoks, vastavalt sellele temperatuurile ja rõhumisele, mille juures γ_0 on antud. Gaasjate ainete puhul γ_0 on antud harilikult vastavalt 760-mm elavhõbeda-samba rõhumisele 0°C temperatuuril. Vedelate ja tahkete ainete puhul, millede erimaht väga vähe või üldse ei sõltu õhkkonna rõhumise muutumisest, on γ_0 antud vastavalt 0°C või $+15^\circ \text{C}$ temperatuu-

rile, sest vedelate ja tahkete ainete erimaht on sõltuv temperatuurist (soojuspaismine).

Mehaanikast teame, et vabalangemise kiirendus muutub vastavalt kaugusele maakera keskpunktist, kusjuures ta on pöördvõrdeline kauguse ruuduga, arvatult maakera keskpunktist. Tähistades kauguse maakera keskpunktist merepinnani tähega R , kõrguse merepinnast tähega z , vabalangemise kiirenduse merepinnal tähega g ja vabalangemise kiirenduse kõrgusel z tähega g_z , võime eelöeldu põhjal kirjutada avaldise:

$$\frac{g_z}{g} = \frac{R^2}{(R+z)^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{R}\right)^2}.$$

Astendades murru nimetaja ja ära jättes murru $\frac{z}{R}$ teist astet sisaldavad liikmed, saame peale lihtsaid tehteid:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{z}{R}\right)^2} = \frac{1}{1 + 2\frac{z}{R}} = \frac{1 - 2\frac{z}{R}}{\left(1 + 2\frac{z}{R}\right)\left(1 - 2\frac{z}{R}\right)} = \approx 1 - 2\frac{z}{R}.$$

Võttes maakera raadiuse võrdseks $R=6370000$ m, saame lõplikult:

$$\frac{g_z}{g} = 1 - 0,000000314 z \dots \dots \dots (59),$$

kus z on kõrgus meetrites arvatult merepinnalt, g_z — vabalangemise kiirendus kõrgusel z , ja g — vabalangemise kiirendus merepinna kõrgusel.

Kui märgime aine erikaalu merepinna kõrgusel tähega γ ja kõrgusel z tähega γ_z ja oletame, et aine erimaht on jäänud muutumatuks, siis võrrandi (56) põhjal võime γ_z ühe ja sama laiuskraadi jaoks avaldada kujul:

$$\gamma_z = \gamma \frac{g_z}{g}.$$

Asendades vabalangemise kiirenduste suhte tema avaldisega võrrandist (59), saame:

$$\gamma_z = \gamma (1 - 0,000000314 z) \dots \dots \dots (60)^1).$$

Kui veel võrrandis (60) γ asendame tema avaldisega võrrandist (58), saame võrrandi aine erikaalu arvutamiseks vastavalt geograafilisele laiuskraadile ja kõrgusele merepinnalt:

$$\gamma_z = \gamma_0 (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z) \dots \dots \dots (62).$$

Võrrandis (62) esinevatel sümbolitel on samad tähendused nagu võrrandites (58) ja (59).

Näide 8.

Leida elavhõbeda erikaal 0°C juures 59° geograafilisel laiusel ja merepinna kõrgusel, kui elavhõbeda erikaal 45° geograafilisel laiusel 0°C juures merepinna kõrgusel on $\gamma_0=13,5951$.

¹⁾ Kiltmaal, nagu näitavad katsed, tuleb tarvitada valemit:

$$\gamma_z = \gamma (1 - 0,000000196z) \dots \dots \dots (61).$$

Võrrandi (58) järgi saame:

$$\gamma = 13,5951(1 - 0,00265 \cos 118^\circ).$$

Trigoneemetriliste funktsioonide teooria põhjal $\cos 118^\circ = -\cos 62^\circ$. Kuna $-\cos 62^\circ$ vastab arv $-0,46947$, siis otsitav elavhõbeda erikaal on

$$\gamma = 13,5951(1 + 0,00124) = 13,6120 \text{ kg/dm}^3.$$

Järelikult 59° geograafilisel laiusel, 0°C juures ja merepinna kõrgusel on üks kantdetsimeeter elavhõbedat 16,9 grammi raskem kui 45° geograafilisel laiusel.

Näide 9.

Leida elavhõbeda erikaal 59° geograafilisel laiusel 8000 m kõrgusel merepinnast 0°C juures, kui tema erikaal 0°C juures merepinna kõrgusel on 13,6120.

Võrrandi (60) põhjal leiame:

$$\gamma_z = 13,6120(1 - 0,000\,000\,314 \cdot 8000) = 13,5778 \text{ kg/dm}^3.$$

Seega 8000 m kõrgusel on üks kantdetsimeeter elavhõbedat 34,19 grammi kergem kui merepinna kõrgusel.

Näide 10.

Leida vabalangemise kiirendus 59° geograafilisel laiusel ja merepinna kõrgusel, kui 45° geograafilisel laiusel tema väärtus merepinna kõrgusel on $9,80665 \text{ m/sek}^2$.

Võrrandi (57) järgi leiame, kui arvesse võtame, et näite 8 põhjal $(1 - 0,00265 \cos 118^\circ) = 1,00124$:

$$g = 9,80665 \cdot 1,0012 = 9,818\,850 \text{ m/sek}^2.$$

Näide 11.

Regnault' katsete järgi on kuiva õhu erikaal Pariisis 760 mm Hg rõhumise puhul 0°C juures 1,293 187. Leida õhu erikaal 45° geograafilisel laiusel, kui Pariisi geograafilise laiuskraad on $\varphi = 48^\circ 50'$ ja kõrgus merepinnalt $z = 60 \text{ m}$.

Lahendades võrrandi (62) γ_0 suhtes, saame:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{1,293\,187}{(1 - 0,00265 \cos 97^\circ 40')(1 - 0,000\,000\,314 \cdot 60)} = \frac{1,293\,187}{1,000\,353535 \cdot 0,999\,981\,16} \\ &= \frac{1,293\,187}{1,000\,334\,688} = 1,2927554 = 1,29276 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

Mendelejev parandas Regnault' katsete tulemusi ja sai kuiva õhu keskmise erikaalu

$$\gamma = 1,29347.$$

Järelikult Mendelejev'i poolt määratud õhu erikaalu järgi oleks kuiva õhu erikaal 45° geograafilisel laiusel:

$$\gamma_0 = \frac{1,29347}{1,000\,334\,688} = 1,293\,037\,23 \approx 1,29304 \text{ kg/m}^3.$$

1892. a. määrasid õhu erikaalu veel Leduc ja Rayleigh ning said arvud, mis vähe erinesid Regnault omadest. Hiljem Mendelejev tegi üldise kokkuvõtte kõigi teiste teadlaste uurimustest ja andis õhu erikaalu jaoks 0°C ja 760 mm Hg rõhumise juures järgmise lõpliku keskmise avaldise:

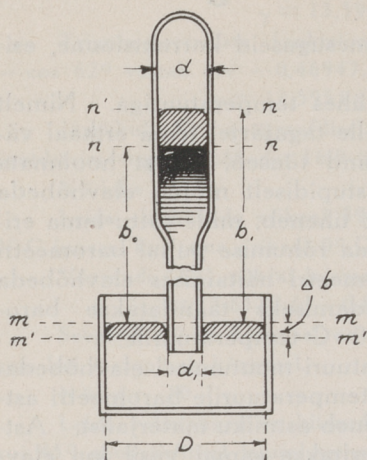
$$\gamma = 0,131\,844 \text{ g,}$$

kus g on geograafilisele laiuale vastav vabalangemise kiirendus m/sek^2 .

Kui vabalangemise kiirenduse 45° geograafilisel laiusel ja merepinna kõrgusel arvame võrdseks $g = 9,80665$, siis saame selle laiuskraadi jaoks õhu erikaalu merepinna kõrgusel, 0°C temperatuuril ja 760 mm Hg rõhumisel:

$$\gamma_0 = 0,131\,844 \cdot 9,806\,65 = 1,292\,947\,96 \approx 1,2930 \text{ kg/m}^3.$$

Kuiva õhu erikaal $\gamma_0 = 1,2930 \text{ kg/m}^3$ on fikseeritud ka rahvusvaheliselt, kusjuures on arvestatud CO_2 normaalset sisalduvust õhus.



Joon. 36.

Korrektsooni Δb leidmine selgub jooniselt 36. Oletame, et baromeetri astmik on seatud anuma A nivoole mm , baromeetri lugemi b_0 juures, ja et sama nivoo järgi on määratud mingisugune teine lugem b_1 . Lugem b_1 on tõenäolisest lugemist väiksem nivoopinna mm langemise võrra nivoo $m'm'$, s. o. differentsi Δb võrra, mille kutsus esile elavhõbeda samba tõus baromeetri torus nivoolt nn nivoo $n'n'$.

Jooniselt 36 jäeldub, et anumas nivoopinna mm langemisega nivoo $m'm'$ toimunud elavhõbeda mahu muutus (joonisel viirutatud koht) on võrdne baromeetri torus toimunud elavhõbeda mahu muutumisega nivoolt nn nivoo $n'n'$. Aluseks võttes need mahumuutused, võime kirjutada vahekorra:

$$\frac{\pi}{4} D^2 \Delta b - \frac{\pi}{4} d_1^2 \Delta b = \frac{\pi}{4} d^2 (b_1 - b_0).$$

Saadud vahekorrast leiamegi Δb suuruse:

$$\Delta b = (b_1 - b_0) \frac{d^2}{D^2 - d_1^2} \quad \dots \quad (66),$$

kus d on baromeetri toru seesmine läbimõõt ülemise nivoopinna juures, D — baromeetri anuma seesmine läbimõõt alumise nivoopinna juures, d_1 — baromeetri toru väline läbimõõt sama alumise nivoopinna juures, b_0 — baromeetri lugem, mille puhul baromeetri astmik on seatud alumisele nivoole, ja b_1 — baromeetri lugem lugemi b_0 nivoo järgi.

Võrrandist (66) nähtub, et Δb tuleb võrrandis (65) lugemiga b_1 liita, kui $b_1 > b_0$, ja sellest lahutada, kui $b_1 < b_0$.

Võrrandiga (66) antud korrektsooni vältimiseks korraldatakse vahel baromeetri astmiku jaotised sääraselt, et nendes on juba arvestatud baromeetri anumas esineva nivoopinna muutumine. Järelikult sel puhul astmiku jaotised ei ole täpsed millimeetrid.

Näide 12.

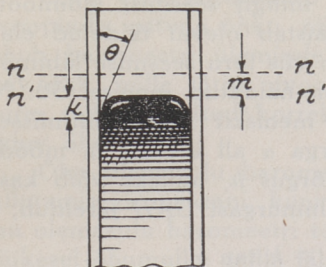
Baromeetri lugem elavhõbeda $+25^\circ \text{C}$ temperatuuril on $b'' = 780 \text{ mm}$. Taandada lugem 0°C temperatuurile.

Valemiga (63) saame:

$$b'' = 780 (1 - 0,000163 \cdot 25) = 776,82 \text{ mm}.$$

Elavhõbeda kapillaarsest depressioonist tingitud korrektsioon.

Elavhõbeda ülemine nivoopind anumbaromeetri torus asetseb kapillaarse depressiooni tõttu madalamal sellest asendist, mida ta omaks siis, kui kapillaarsusnähtus puuduks. Korrektsiooni suurus oleneb baromeetri toru seesmisest läbimõõdust nivoopinna kohal ja meniski kõrgusest. Kapillaarsusnähtust illustreerib joonis 37. Joonisel on tähega m märgitud kapillaarsest depressioonist tingitud nivoopinna nn lan-



Joon. 37.

omavad meniskid ühesugust kuju ning seega langeb kapillaarne korrekt-sioon ära.

Tähistades kapillaarsest depressioonist tingitud korrektsiooni tähega m , võime kirjutada korrektsioonivalemi:

$$b' = b'' + m \dots \dots \dots (67),$$

kus b'' on 0°C temperatuurile taandatud baromeetri lugem (vt. võrrandit 63) ja b' — kapillaarse depressiooniga korrigeeritud baromeetri lugem.

Kapillaarse depressiooni väärtused ¹⁾ vastavalt toru seesmisele läbimõõdule ja meniski kõrgusele on antud raamatu lõpus tabelis 31. Tabeli andmed ei ole vastuvaidlematud, kuna võrreldes mitme autori poolt koostatud tabeleid näeme, et nad täpselt ei ühtu. Tabel on võetud raamatust O. Eggert, „Handbuch der Vermessungskunde“ ning on koostatud Schleiermacher'i ja Delcros' poolt.

Märgime veel, et meniski kõrgus ei ole konstantne suurus, isegi ühel ja samal mõõteriistal võib meniski kõrgus muutuda. Eriti võib meniski kõrgus aja jooksul muutuda sifoonbaromeetri alumises harus, kus elavhõbe puutub

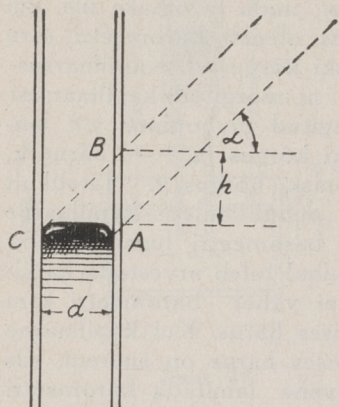
¹⁾ Kapillaarne depressioon oleneb teataval määral ka koha geograafilisest laius-est, kõrgusest merepinnalt ja elavhõbeda temperatuurist, sest kapillaarne depressioon sõltub üldiselt ka antud vedeliku erikaalust ja on viimasega pöördvõrdeline, kuna ta avaldub valemiga:

$$m = \frac{4c}{\gamma d} \cos \theta,$$

kus m on kapillaarne depressioon, c — antud vedeliku kapillaarsuse konstant, γ — vedeliku erikaal, d — toru seesmine läbimõõt ja θ — äärnurk.

Tegelikult on koha geograafilise laiuse, kõrguse ja temperatuuri mõju kapillaarsele depressioonile niivõrd väike, et seda praktikas ei arvestata, kuna nendest teguritest sõltuvad korrektsioonid ei ületa eksperimentaalseid vigu.

kokku õhuga. Õhuga kokku puutudes elavhõbe vähesel määral oksüdeerub, samuti tekib siia mustust ning ühes sellega tuhmub klaasi pind, mille tagajärjel esineb elavhõbeda ebaühtlane kleepumine toru seinte külge, nii et osutub raskeks meniski kõrguse määramine. Säärestel juhtudel on vajalik toru seinte puhastamine.



Joon. 38.

Baromeetri toru seestmist läbimõõtu, kui see ei ole teada, ei saa valmisriistal vahenditult mõõta, sest kiirte murdumise tõttu toru seintes, eriti õhukeste seintega torude puhul, ei ole üldse näha mingit seestmist läbimõõtu, vaid terve toru paistab olevat täidetud elavhõbedaga. Lihtsam viis toru seestmise läbimõõdu määramiseks on näidatud joonisel 38. Nimelt vaadeldakse meniskit mingi sihtimisega teatava nurga α all ülevalt ja mõõdetakse vertikaalil kõrgus h , milleks võib kasutada nooniust. Kolmnurgast CAB jäeldub, et

$$d = h \tan \alpha.$$

Kui valida $\alpha = 45^\circ$, siis $d = h$.

Elavhõbeda-auru ja tühikusse sattunud õhu rõhumisest tingitud korrektsioon.

Baromeetri toru pealpool ülemist nivoopinda on õhutühi (Torricelli tühik), kuid selles toruosas ei ole absoluutne tühjus, vaid see ruumala on täidetud küllastunud elavhõbeda-auruga.

Füüsikast teame, et iga aine küllastunud aarul on teatav kindel rõhk, mille suurus oleneb temperatuurist. Järelikult, tingitult elavhõbeda-auru rõhumisest ülemisele nivoopinnale, asetub ülemine nivoopind oma õigest kõrgusest madalamale, toru ülemises osas teotseva auru rõhumise võrra. Seega tuleb elavhõbeda-auru rõhumisest tingitud korrektsioon liita baromeetri lugemiga.

Tabel 19. Elavhõbeda-auru rõhumine millimeetrites.

t°C	0°	2°	4°	6°	8°
0	0,000207	0,000252	0,000306	0,000370	0,000447
+ 10	0,000537	0,000645	0,000733	0,000922	0,001110
+ 20	0,00131	0,00155	0,00183	0,00216	0,00254
+ 30	0,00299	0,00350	0,00410	0,00478	0,00558
+ 40	0,00648	0,00752	0,00872	0,01008	0,01163

Tabelis 19 on antud elavhõbeda-auru rõhumine elavhõbedasamba millimeetrites vastavalt elavhõbeda temperatuurile. Tabel on arvutatud Smith-Menziesi valemi järgi:

$$\log b = 9,907\,3436 - \frac{3276,628}{T} - 0,651\,99 \log T,$$

kus b on baromeetiline rõhumine mm Hg ja T — absoluutne temperatuur.

Nagu tabeli andmeist nähtub, on elavhõbeda-auru rõhumisest tingitud korrektsioonid niivõrd väikesed, et neid õhkkonnas esinevate temperatuuride puhul ei ole tarvis arvestada.

Peale elavhõbeda-auru võib vahel baromeetri torru pealepoole ülemist nivoopinda sattuda õhku, näiteks riista transporteerimisel jne. Säärasel juhul rõhub baromeetri ülemisele nivoopinnale peale elavhõbeda-auru ka torus asuv õhk, mille tõttu nivoo asetseb oma normaalasendist madalamal, kusjuures sellest tingitud korrektsioon on seda suurem, mida suurem on torus leiduv õhu hulk.

Õhu olemasolu baromeetri tühikus saab kindlaks määrata baromeetri kallutamiseга määrani, kuni elavhõbe täidab kogu tühiku. Sel puhul ilmneb õhu olemasolu baromeetri toru ülemises otsas teatava suurusega õhumullina. Väikesel õhumullil, mille läbimõõt on 1—2 mm, on praktiliselt enamvähem konstantne korrektsioon. Suurema õhumulli puhul peab arvestama baromeetri torus leiduva õhu paisumist vastavalt temperatuurile. Sel juhul määratakse õhumullist tingitud korrektsioonid kindlaks antud baromeetri võrdlemise teel normaalbaromeetriga mitmesuguste temperatuuride juures¹⁾.

Tõstetava elavhõbedasambaga riistadel, näiteks Fuess'i anumsifoonbaromeetril, võib vaakuumi kontrollida ühe ja sama õhurõhumise määramisega elavhõbedasamba mitmesuguse asendi juures. See omadus on anumsifoonbaromeetri tähtis eelis.

Raskustungi muutusest tingitud korrektsioon.

Elavhõbeda erikaal, nagu järeldub võrrandist (62), muutub olenevalt nii koha geograafilisest laiuselt kui ka kõrgusest merepinnalt.

Kui kahes vaatluskohas, millede kõrgused ja geograafilised laiused on teineteisest erinevad, on õhkkonna rõhumised võrdsed, siis tingitult elavhõbeda erikaalude erinevusest on nendes vaatluskohtades, elavhõbeda võrdse temperatuuri puhul, baromeetri nivoopindade vaheline kõrgus isesugune. See kõrgus on nimelt väiksemal laiuskraadil suurem ja suuremal laiuskraadil väiksem. Kui tähistame esimese vaatluskoha elavhõbeda erikaalu tähega γ ja õhkkonna baromeetrilise rõhumise tähega b , ning teise vaatluskoha samad suurused tähtedega γ' ja b' , võime neid suurusid siduda alljärgneva matemaatilise vahekorraga

$$\gamma b = \gamma' b' \quad \dots \dots \dots (68),$$

sest korrutis γb on õhkkonna rõhumisega tasakaalustatud ühe-ruutmõõduühikulise ristlõikega elavhõbedasamba raskus esimeses vaatluskohas ja korrutis

¹⁾ Õhumulli mõju saab kindlaks määrata ka teoreetiliselt, mille kohta võib andmeid leida „Poggendorffs Annalen“, köide 88. lk. 273—278.

$\gamma'b'$ — samasuguse samba raskus teises vaatluskohas. Kuna me aga oletasime, et mõlemas vaatluskohas õhkkonna rõhumised on võrdsed, siis peavad ka võrdsed olema korrutised γb ja $\gamma'b'$.

Baromeetri lugemi sõltumine vaatluskoha geograafilisest laiusel raskendab täpseid õhkkonna rõhumisega seoses olevaid arvutlusi. Sellepärast taandatakse baromeetri lugemid 45° geograafilisele laiusel, s. o. antud vaatluskoha õhkkonna baromeetiline rõhumine asendatakse rõhumisega, mida baromeeter näitaks 45° geograafilisel laiusel, kui seal õhkkonna rõhumine oleks sama suur kui antud vaatluskohas.

Selle korrektsiooni jaoks vastava võrrandi annavad võrrandid (62) ja (68). Selleks oletame, et võrrandis (68) suurused γ ja b vastavad 45° geograafilisele laiusel ja suurused γ' ja b' — antud vaatluskohale; siis, lahendades võrrandi (68) b suhtes, leiame:

$$b = b' \frac{\gamma'}{\gamma}.$$

Asendades erikaalude suhte tema väärtusega võrrandist (62), saame korrektsioonivõrrandi kujul:

$$b = b' (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000\,000\,314\,z) \dots (69)^1),$$

kus b' on õhkkonna baromeetiline rõhumine vaatluskohal, mille geograafiline laiuskraad on φ ja kõrgus merepinnalt z meetrit, ja b — 45° geograafilisele laiusel taandatud õhkkonna baromeetiline rõhumine, mis vastab vaatluskoha õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele b' .

Edaspidi tähistame 45° geograafilisele laiusel taandatud baromeetrisel rõhumise mm Hg alati sümboliga b ja nimetame teda õhkkonna korreeritud baromeetriliseks rõhumiseks ehk lihtsalt õhkkonna rõhumiseks.

Eesti jaoks on geograafilisele laiusel vastavast raskustungi muutumisest tingitud korrektsiooni keskmine väärtus $+0,9$ mm elavhõbedasammast. Näiteks kui Eestis baromeetiline rõhumine on 760,2 mm, siis vastaks see 45° geograafilisel laiusel 761,1-mm rõhumisele.

Eeltoodu põhjal avaldub baromeetri lugemi üldine korrektsioonivõrrand kujul:

$$b = [b'''(1 - \alpha t) + m] (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000\,000\,314\,z) \dots (70).$$

Näide 13.

$59^\circ 30'$ geograafilisel laiusel (Tallinn) merepinna kõrgusel on baromeetiline rõhumine $b' = 752$ mm. Taandada see rõhumine 45° geograafilisele laiusel.

Võrrandi (69) järgi saame:

$$b = 752 (1 - 0,00265 \cos 119^\circ) = 752 (1 + 0,00265 \cos 61^\circ) = 752 \cdot 1,001\,285 = 752,97.$$

Järelikult on korrektsioon $+0,97$ mm.

Näide 14.

$57^\circ 30'$ geograafilisel laiusel ja 150 m kõrgusel merepinnalt (Eesti lõunapiir) on õhkkonna baromeetiline rõhumine 768 mm. Taandada see rõhumine 45° geograafilisele laiusel.

Võrrandi (69) järgi saame:

¹⁾ Võrrandis (69) võetakse koefitsient 0,00265 mõne autori poolt võrdseks 0,00259.

$$b = 768 (1 - 0,00265 \cos 115^\circ) (1 - 0,000\,000\,314 \cdot 150) = 768 \cdot 1,0011199 \cdot 0,9999529 = 768,82 \text{ mm.}$$

Seega korrektsioon on $+0,82$ mm.

Näidetest 13 ja 14 võime järeldada, et Eesti jaoks on raskustungi muutusest tingitud korrektsioon keskmiselt:

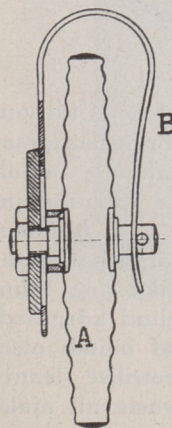
$$(0,97 + 0,82) : 2 = +0,9 \text{ mm.}$$

Tähendame siin, et 45° geograafilisel laiusel loetakse merepinna kõrgusel normaalseks rõhumiseks 760 mm elavhõbedasammast, mis vastab 1033,2276-grammilisele rõhumisele ühe-ruutsentimeetrilisele pindalale. Rõhumine 760 mm Hg on õhkkonna keskmiseks rõhumiseks ka Eestis.

Koha kõrgusest merepinnalt tingitud korrektsioon.

Õhkkonna rõhumine, nagu teame, muutub vastavalt koha kõrgusele merepinnalt (vt. tabelit 24). Selleks et võrrelda omavahel mitmes üksteisest eemalseisvas kohas teotsevad õhkkonna baromeetrilisi rõhumi b , nagu see toimub paljudes meteoroloogilistes ja aeronavigatsioonilistes arvutlustes, taandatakse baromeetrilised rõhumised merepinna kõrgusele. Kõrguskorrektsioon tehakse hüpsomeetriliste võrrandite abil, mis on antud isotermilise õhkkonna peatükis.

Aneroidbaromeeter.

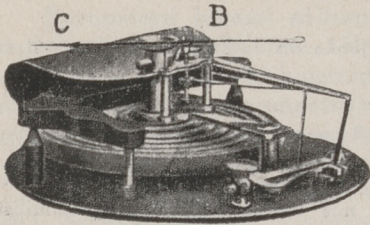


Joon. 39.

Tehnikas tarvitatakse elavhõbebaromeetri asemel nn. aneroidbaromeetrit. Selles baromeetris on õhkkonna rõhumise vastuvõtjaks õhukesest plekist metallkarp A (joon. 39 ja 40), milles õhk on hõrendatud, nii et see karp vastavalt õhkkonna rõhumise muutumisele deformeerub, s. o. õhurõhumise suurenemisel karp tõmbub koomale, kuna aga õhurõhumise vähenemisel karp paisub. Selleks et karp õhurõhumise suhtes omaks pidevat elastsust, on ta, nagu näha joonistel 39 ja 40, ühendatud vedruga B , mis karbi seintele mõjuva õhkkonna rõhumise tasakaalustab. Karbi seinte ning ühtlasi vedru B deformeerumiste registreerimiseks on karbi keskoht liigendite kaudu ühendatud osutiga C , mis sellekohasel astmikul näitab, olenevalt karbi A ja vedru B deformatsioonist, vastavat õhkkonna rõhumist millimeetrites. Karpi A ühes vedruga B nimetatakse *aneroidkarbiks* ehk surveelemendiks.

Aneroidbaromeetri üldvaade on toodud joonisel 41.

Barograaf.



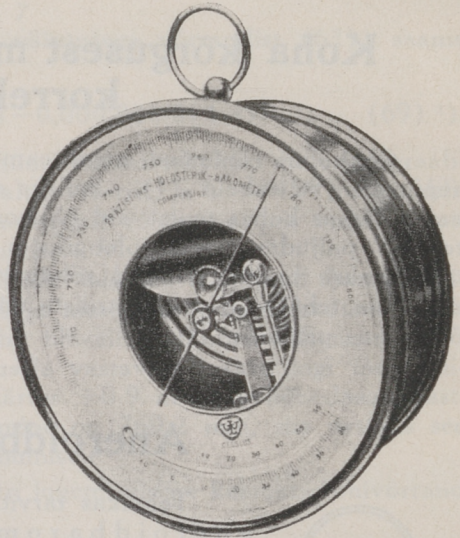
Joon. 40.

tub aneroidkarpidest moodustatud samba pikkus ning ühes sellega ka hoova *c* asend. Õhurõhu muutumisel kirjutab hoova *c* otsa külge kinnitatud sulg õhurõhu käigu kellamehhanismi abil pöörlevale trumlile *d* mähitud paberlindile. Paberlindile on trükitud õhkkonna rõhumise ja kellaegade võrk nõnda, et hoova *c* poolt lindile kirjutatud joone järgi on võimalik kindlaks määrata õhkkonna rõhumise muutumist vastavalt ajale.

Näide barograafilindist on antud joonisel 43.

Lindile trükitud horisontaalsed jooned määravad õhkkonna rõhumise ja vertikaalsed kaarjooned kellaaja ning päeva. Kõverjoon tähistab õhkkonna rõhumise käiku vastavalt ajale.

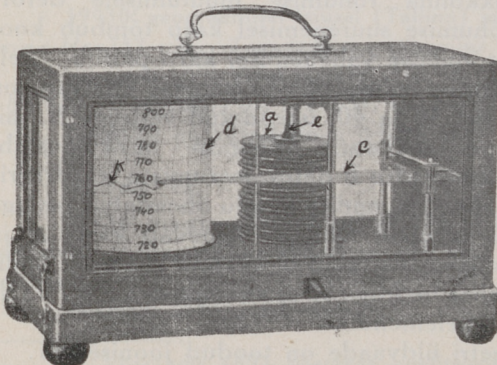
Õhkkonna rõhumise käigu registreerimiseks lennul tarvitatakse nn. kõr-



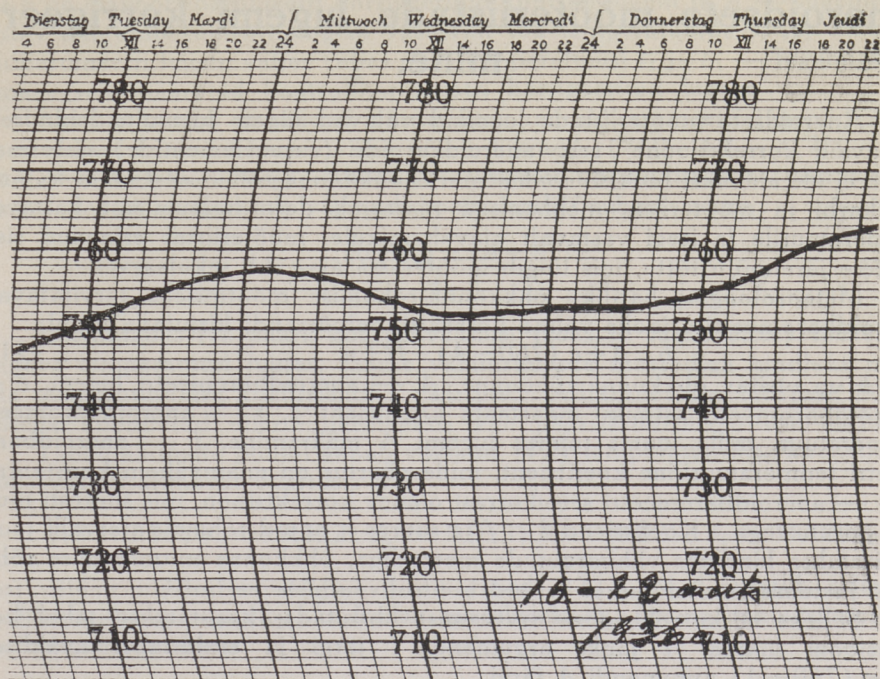
Joon. 41.

gusbarograafe. Üldjoontes sarnaneb kõrgusbarograaf ilmajaama-barograafiga, ainult õhkkonna rõhumise muutuse intervall on suurem, s. o. trummel on mahukam. Kõrgusbarograafide lintidel on õhkkonna rõhumiste asemel märgitud kõrgused. Niisugune barograaf näitab otsekohe nn. hüpsomeetrilise lennukõrguse ¹⁾ käiku vastavalt ajale.

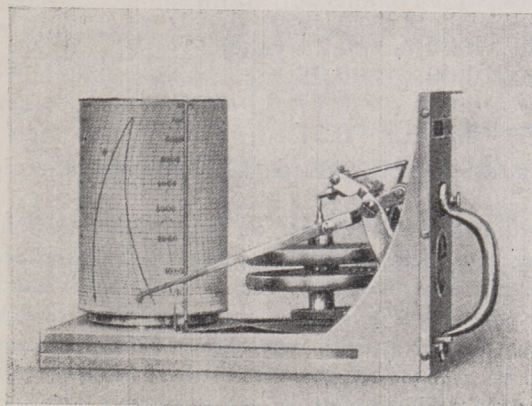
¹⁾ Kõrgusbarograafi poolt näidatud kõrgus ei ühtu tõelise kõrgusega. Viimase leidmiseks vajavad barograafi lindi ordinaadid korrektsioone, milledest räägime kõrgusemõõteriistade puhul.



Joon. 42.



Joon. 43.



Joon. 44.

Ühe säärase barograafi üld-
vaade on näidatud joonisel
44. Barograafi lindi valikul
peab silmas pidama, et lindi
kõrgus- kui ka ajatelje jao-
tised vastaksid antud baro-
graafile.

Aneroidsete mõõteriistade lugemi korrigeerimine.

Aneroidsete mõõteriistade lugemid vajavad õigete lugemite leidmiseks vastavaid korrektsioone, sest aneroidkarpide (surveelementide) deformatsioon ei ole ainuüksi funktsionaalne suurus õhkkonna rõhumisest, vaid ka aneroidkarbi ja mõõteriista mehhanismi materjali deformeerumisest vastavalt temperatuurile ja isegi vastavalt ajavahemikule, mõõteriistas esinenud sisepingete järelmõju tõttu, mis tingib mõõteriista aja- ehk sekulaarvea.

Meteoroloogias hariliku õhkkonna-rõhumise mõõtmiseks tarvitatavate aneroidbaromeetrite jaoks võime korrektsioonivõrrandi kirjutada kujul:

$$b = A + c(760 - A) + ft + n \dots \dots \dots (71),$$

kus b on otsitav õhkkonna rõhuline, A — aneroidbaromeetri lugem, c — aneroidbaromeetri astmiku maastaabi koefitsient¹⁾, t — aneroidbaromeetri temperatuur, mille juures toimus lugemi A määramine, f — aneroidbaromeetri temperatuuriline koefitsient, mille väärtus on enamvähem konstantne, ja n — aneroidbaromeetri seisukorrast olenev korrektsioon, mis suuresti muutub pörutustega. Koefitsiendid c , f ja suurus n antud rõhumisintervalli jaoks määratakse kindlaks vähimruutude meetodiga, õhkkonna mitmesuguse rõhumise ja temperatuuri juures tehtud kontrollvaatluste andmeil.

Selleks et korrektsiooni arvutamist lihtsutada, koostatakse tabel korrektsiooni liikme ft jaoks argumendi t järgi ja eralditabel avaldisel $A + c(760 - A)$ argumendi A järgi.

Aneroidbaromeetri temperatuurilise koefitsiendi f absoluutne väärtus kõigub piirides 0,00 kuni 0,4, olenevalt sellest kui hästi mõõteriist on temperatuuri suhtes kompenseeritud. Näiteks Austria Meteoroloogia Keskasutise poolt kontrollitud 180 aneroidbaromeetril leiti temperatuurilise koefitsiendi jaoks järgnevad väärtused:

9	riistal f oli	0,00 ja +0,23 vahel
9	„ „ „	0,00 „ -0,07 „
82	„ „ „	-0,07 „ -0,17 „
8	„ „ „	-0,17 „ -0,37 „

Positiivseid koefitsiente omasid üldiselt väikese läbimõõduga aneroidbaromeetrid ($d = 7$ sm).

Aneroidbaromeetri temperatuurilist koefitsienti on kõige lihtsam määrata talvel, kuna siis on saavutatav suur temperatuuri-intervall. Selleks kontrollitakse aneroidbaromeetrit elavhõbebaromeetriga toas. Selle järel asetatakse kontrollitav riist välja vabasse õhku ja umbes ühe tunni järel määratakse tema lugem üheaegselt elavhõbebaromeetri lugemiga. Mõlemal kontrollvaatlusel määratakse kindlaks ka aneroidbaromeetri sisemine temperatuur.

Korraldades terve rea sääraseid kontrollvaatlusi mitmesuguste temperatuuri-intervallide juures, võime temperatuurilise koefitsiendi arvutada võrrandiga (71). Nimelt kahe eelkirjeldatud kontrollvaatluse jaoks võime kirjutada võrrandi (71) põhjal tingimusvõrrandid:

$$\begin{aligned} b &= A + c(760 - A) + ft + n, \\ b_1 &= A_1 + c(760 - A_1) + ft_1 + n, \end{aligned}$$

¹⁾ Kangi õlapikkuste muutmise teel on võimalik c teha nulliks.

kus b on elavhõbebaromeetri korrigeeritud kontroll-lugem ja A — lugemile b vastav aneroidbaromeetri lugem vastavalt toa temperatuurile t , A_1 — aneroidbaromeetri lugem väljas vabas õhus temperatuuril t_1 ja b_1 — lugemiga A_1 samaaegselt määratud kontrollbaromeetri korrigeeritud lugem.

Arvesse võttes, et saadud võrrandites aneroidbaromeetri lugemid A ja A_1 üksteisest erinevad kaunis vähe, võime liikmed $c(760-A)$ ja $c(760-A_1)$ arvata võrdseteks. Seega, lahutades esimesest võrrandist teise võrrandi ja lahendades nii saadud uue võrrandi koefitsiendi f suhtes, saame:

$$f = \frac{(b-b_1)-(A-A_1)}{t-t_1} \dots \dots \dots (72).$$

Korraldades rea paaris-kontrollvaatlusi (toas ja vabas õhus) tõusva ja langeva temperatuuri juures, saame vähimruutude meetodiga kindlaks määrata temperatuurilise koefitsiendi f väärtuse. Alljärgnevasse tabelisse 20 on näitena koondatud aneroidbaromeetri viie paariskontrollvaatluse andmed.

Tabeli andmete põhjal annab võrrand (72) temperatuurilise koefitsiendi jaoks viis alljärgnevat väärtust:

$$f_1 = -0,06; f_2 = -0,022; f_3 = -0,059; f_4 = -0,029; f_5 = -0,10,$$

kust vähimruutude meetodiga, mis võrrandi (72) puhul muutub eelleitud koefitsientide aritmeetilise keskmise arvutluseks ¹⁾, leiame temperatuurilise koefitsiendi suuruse:

$$f = - \frac{0,06 + 0,022 + 0,059 + 0,029 + 0,10}{5} = -0,054.$$

Võrrandid (71) ja (72) on koostatud oletusel, et temperatuuriline korrigeerimine on lineaarne funktsioon temperatuurist, s. o. ft . Kuid see oletus on õige ainult teatava lähendusena, sest temperatuuriline korrigeerimine sõltub

¹⁾ Kuna oletame, et temperatuuriline koefitsient ei olene rõhumisest ega temperatuurist, võime kirjutada:

$$f = k \text{ (konstant).}$$

Vähimruutude tingimus sel puhul avaldub kujul:

$$\sum_{i=1}^n (f_i - k)^2 = \min. \dots \dots \dots (a).$$

Miinimumi puhul peab tuletis avaldisest (a) f suhtes olema null, s. o.

$$2 \sum_{i=1}^n (f_i - k) = 0$$

või

$$\sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n k = nk.$$

Lahendades saadud võrrandi k suhtes leiame, et

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i,$$

s. o. arvutus taandub aritmeetilise keskmise leidmisele, kus n on paarisvaatluste arv, antud juhul $n = 5$.

Tabel 20.

Katse jrk.- nr-d	Vaatlused toas			Vaatlused vabas õhus		
	Kontr.- barom. <i>b</i>	Aneroid- barom. <i>A</i>	Aneroid- barom. temperatuur toas <i>t</i> °C	Kontr.- barom. <i>b</i> ₁	Aneroid- barom. <i>A</i> ₁	Aneroid- barom. temperatuur vabas õhus <i>t</i> ₁ °C
I	765,8	764,1	16°	765,5	762,0	—14°
II	764,2	762,0	15°	764,3	761,5	—12°
III	762,0	760,2	12°	762,0	758,9	—10°
IV	759,7	757,1	10°	759,6	756,5	— 7°
V	748,9	747,0	7°	748,0	745,0	— 4°

veel aneroidkarbi ja tema vedru deformatsioonist, s. o. sõltub õhkkonna rõhumisest. Järelikult peab korrektsioonivõrrand (71) sisaldama liikme $f't$ ($760-A$). Peale selle, eriti suuremate temperatuuri- kui ka rõhumiste-intervallide puhul, avaldub üldiselt aneroidbaromeetri korrektsioon täpsemalt teise astme funktsioonina, millest tingitult korrektsioonivõrrand peab temperatuuri suhtes sisaldama liikme $f''t^2$ ja astmiku jaotiste suhtes liikme $c'(760-A)^2$. Eeltoodu põhjal väljendub aneroidbaromeetri lugemi korrektsioonivõrrand täpsemalt kujul:

$$b = A + c(760 - A) + ft + n + f't(760 - A) + c'(760 - A)^2 + f''t^2 \dots (73),$$

kus f , f' ja f'' on temperatuurilised koefitsiendid ja c ning c' — astmiku jaotuse koefitsiendid. Muudel suurustel on samad tähendused nagu võrrandis (71). Võrrandi (73) koefitsientide arvsuurused antud aneroidbaromeetri jaoks leitakse samuti vähimruutude meetodiga, kuid sel puhul peab kontrollvaatlusi olema üle kuue. Praktilisteks otstarveteks, eriti mõõdukate temperatuuri- ja rõhumis-intervallide puhul, annab küllaldase täpsuse võrrand (71).

Aneroidbaromeetreid peab teatava aja möödumisel uuesti kontrollima, kuna aja jooksul võib muutuda surveelemendi deformeerumise iseloom. Samuti võib aneroidbaromeeter saada jäävaid deformatsioone; eriline kalduvus selleks on uutel riistadel.

Nagu aneroidbaromeetri lugemid nii ka barograafi lindilt loetavad ordinaadid vajavad korrigeerimist. Selleks otstarbeks võib kasutada üldjuhul võrrandit:

$$b = cy + ft + n \dots (74),$$

kus y on barograafi lindilt mõõdetud ordinaat, t — ordinaadile y vastav barograafi temperatuur, mille saame meteorograafi¹⁾ puhul arvutada termograafi lindi ordinaadi järgi, b — korrigeeritud lugem ja c , f ning n — koefitsiendid, mis määratakse kontrollvaatluste andmeil vähimruutude meetodiga.

¹⁾ Meteorograafiks nimetatakse mõõteriista, milles on ühendatud ühiseks agregaadiks barograaf, termograaf ja hüdrograaf. (Vt. joonist 53.)

Aerotehnikas tarvitatavate aneroidsete mõõteriistade lugemite korrigeerimine toimub võrrandiga:

[illegible]

kus A on aneroidse mõõteriista lugem, b — lugemile A vastav õige lugem ja ΔA — korrigeering, mille väärtus oleneb antud aneroidse mõõteriista deformatsiooni iseloomust vastavalt temperatuurile ja eriti vastavalt õhkkonna rõhumiisele. Peale selle sisaldab ΔA parandusi, mis tingitud astmiku jaotiste ebatäpsusest.

Korrektsoon ΔA ei ole konstantne suurus, vaid muutub aja jooksul aneroidses mõõteriistas esinenud sisepingete järelmõju tõttu.

Võrrandis (75) esineva korrektsiooniliikme ΔA väärtused antakse eraldi iga mõõteriista jaoks sellekohases tabelis või diagrammis. Ka on võimalik ΔA anda eriti antud mõõteriista jaoks koostatud arvutuslükatiga.

Korrektsoonidiagrammi või -tabeli koostamiseks tarvitatakse erilist seadist, mis koosneb õhukindlast ruumist, milles on võimalik vastavate seadmete abil soovikohaselt muuta temperatuuri ja õhurõhumist. Muutes kontrollruumis õhurõhumist ja temperatuuri vastavalt kontrollitava aneroidse mõõteriista töötamise tingimuste olukordadele ²⁾ ja võrreldes selles kontrollruumis asuva kontrollitava riista lugemeid sama ruumiga ühenduses seisva elavhõbebaromeetri lugemitega, saame põhiaanded, millede järgi on võimalik koostada antud mõõteriista jaoks korrektsoonidiagrammi või -tabelit.

Korrektsooni diagrammi või -tabeli koostamisel tuleb kontroll-elavhõbebaromeetri lugemid korrigeerida võrrandi (70) järgi; seega annab kõrgusaneroidbaromeetri või kõrgusbarograafi korrigeeritud lugem õhkkonna rõhumise taandatud 45° geograafilisele laiusle. Korrektsoonitabelite ja -diagrammide koostamise kohta on lähemad seletused antud kõrgusmõõteriistade kirjelduses.

Joonisel 45 on näidatud lihtne aneroidsete mõõteriistade kontrollseadis, mis koosneb elavhõbebaromeetrist B , mille kauss on toru e kaudu ühendatud

¹⁾ Kui võrrand (71) $b = A + c(760 - A) + ft + n$ ümber kirjutada: $b = A + 760c - cA + ft + n = A(1 - c) + ft + (760c + n)$ ja võtta $(1 - c) = C$ ning $(760c + n) = N$, siis saame võrrandi (71) kujul:

$$b = CA + ft + N,$$

nagu see barograafi puhul antud võrrandina (74). Sel puhul $A = y$ ja $N = n$.

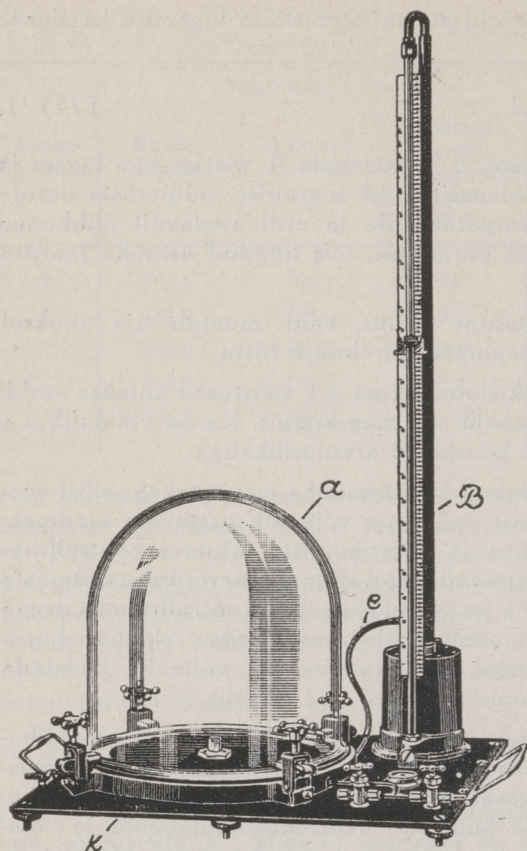
Osuti mehhanismi õlgade pikkuste reguleerimisega on võimalik saavutada $C = 1$. Seega võrrand omandab kuju:

$$b \equiv A + ft + N.$$

Tähistades selles vörrandis $ft+N=\Delta A$, saame vörrandi (75), s. o.

$$b = A + \Delta A.$$

2) Näiteks kõrgusbarograafi kontrollimisel peab muutma õhu temperatuuri ja rõhumist sääraselt, nagu see esineb normaalseil lennutingimustel.



Joon. 45.

Teades antud mõõteriista temperatuurilist koefitsienti saame korrektsioonivõrrandit (75) täiendada temperatuurilise korrektsiooni liikmega, s. o. saame võrrandile anda kuju:

$$b = A + \Delta A + f(t_0 - t) \quad (76),$$

kus f on antud aneroïdse mõõteriista temperatuuriline koefitsient, t_0 — mõõteriista temperatuur kontrollaparaadi kupli all korrektsioonidiagrammi või -tabeli koostamiseks teostatud kontrollvaatluste ajal ja t — mõõteriista temperatuur lugemi A määramisel.

Arvutluste lihtsustamiseks võib antud aneroïdse mõõteriista korrektsioonidiagrammi parandada temperatuuriliste korrektsioonidega, silmas pidades temperatuurilist olukorda, milles mõõteriist peab töötama, või koostada temperatuuriliste korrektsioonide jaoks omaette korrektsioonitabeli või -diagrammi. Kuna korrektsiooniliige $f(t_0 - t)$ on lineaarne funktsioon, kujutab diagramm sirget, mis lõikub temperatuuriteljega punktis, mille abstsiss on t_0 , ja korrektsiooniteljega punktis, mille ordinaat on ft_0 .

Eelmainitud omaduse tõttu on diagrammi lihtne ehitada. Selleks määrame vastavas mõõtkavas temperatuuriteljel punkti, mille abstsiss on t_0 , ja

õhukindlalt alusel k asetseva, mõõteriistade kontrollruumi moodustava klaasist kupliga a . Kupel a on omakorda ühendatud õhupumbaga, mille abil saab muuta kupli a all õhurõhumist.

Joonisel 45 näidatud kontrollseadises ei ole võimalik muuta õhu temperatuuri, välja arvatud teatav temperatuurimuutus, mis tingitud õhu hõrendamisest kupli all, kuid mis teataval määral kompenseerub soojuse juurdekandumisega hõrendatud õhule väljastpoolt aparadi seinte kaudu.

Mõõteriista kontrollimine säärase seadisega toimub järelkult enamvähem konstantse temperatuuri juures ning seega puudub kontrollitava mõõteriista kontrolli tulemustes temperatuuriline korrektsioon. Sellest tingitud viga on võimalik teatava täpsusega parandada sel teel, et antud mõõteriista jaoks määratakse kontrollvaatluste andmetel kindlaks temperatuuriline koefitsient õhkkonna hariliku rõhumise juures ning selle järgi vastavad temperatuurilised korrektsioonid.

korrektsiooniteljel määrame valitud mõõtkavas punkti, mille ordinaat on ft_0 . Läbi nende punktide tõmmatud sirge annabki diagrammijoone. Ordinaatide teljel punkti määramisel tuleb silmas pidada temperatuurilise koefitsiendi f märki.

Kirjeldatud korrigeerimisviis temperatuuri suhtes ei ole küll täpne, kuid, nagu näitavad uurimused, annab praktilisteks otstarveteks rahuldavaid tagajärgi.

Aneroidse mõõteriista temperatuurilist koefitsienti, nagu varemalt juba öeldud, on kõige sobivam määrata talvel, teostades paaris-kontrollvaatlusi toas ning väljas vabas õhus. Selle koefitsiendi määramiseks tuleb kasutada võrrandit (76). Oletame, et toas temperatuuri t_1 puhul antud aneroidne mõõteriist näitas lugemit A_1 , millele korrektsoonidiagrammil vastab parandus ΔA_1 , ja väljas vabas õhus temperatuuril t_2 sama mõõteriist annab lugemi A_2 , millele vastab parandus ΔA_2 . Tähistades lugemitele A_1 ja A_2 vastavad tõelised suurused tähtedega b_1 ja b_2 , võime võrrandi (76) põhjal kirjutada tingimusvõrrandid:

$$\begin{aligned} b_1 &= (A_1 + \Delta A_1) + f(t_0 - t_1); \\ b_2 &= (A_2 + \Delta A_2) + f(t_0 - t_2). \end{aligned}$$

Lahutades esimesest võrrandist teise võrrandi ja lahendades sel teel saadud uue võrrandi koefitsiendi f suhtes, saamegi temperatuurilise koefitsiendi arvutusvõrrandi:

$$f = \frac{(A_1 + \Delta A_1) - (A_2 + \Delta A_2) - (b_1 - b_2)}{t_1 - t_2} \dots \dots \dots (77).$$

Korraldades rea paaris-kontrollvaatlusi mitmesugustes temperatuuriintervallides, saame kindlaks määrata koefitsiendi f keskmise väärtuse, mille leiame aritmeetilise keskmise kaudu (vt. lk. 77).

Võrrandi (77) lugemitele A_1 ja A_2 vastavad tõelised suurused b_1 ja b_2 arvutatakse lugemitega A_1 ja A_2 samaaegselt määratud kontrollbaromeetri lugemite järgi. Juhul, kui barograafi andmed on kõrgus-ühikutes, arvutatakse ka kontrollbaromeetri andmed samadesse ühikutesse, jne. Need arvutused toimuvad võrranditega, mis on antud korrapäraste õhkkondade kirjelduses.

Üldiselt on temperatuurilise korrektsooni järele vajadust ainult täpsete vaatluste puhul tundlikkude mõõteriistadega. Harilikku mõõteriistade tarvitamisel ei ole tarvis seda korrektsooni arvestada, sest see ei ole mõõteriistade mõõtetäpsusega võrreldes kuigi tähelepanitava suurusega.

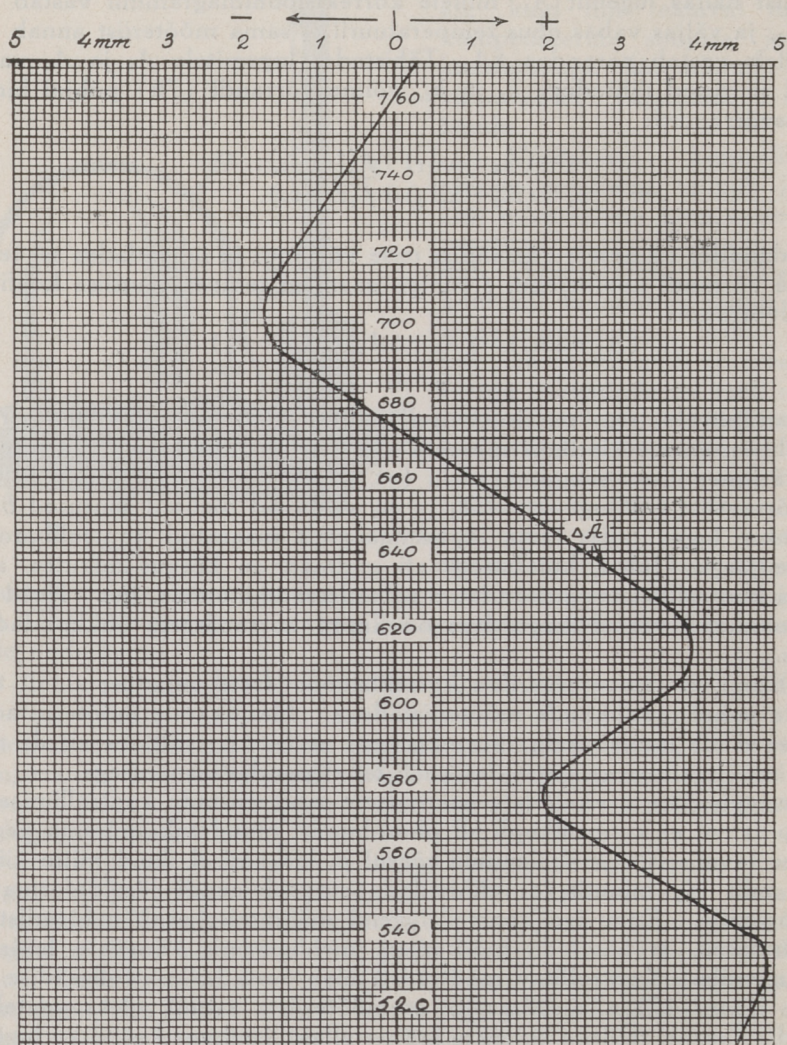
Aerotehnikas tarvitatavate aneroidsete mõõteriistade kontrollimisel peab silmas pidama, et kontrollkupi all õhurõhumist muudetak스 niisama aeglaselt, nagu see tavaliselt toimub lennuki tõusul ja laskumisel, kuid mitte kiiremini kui 20 mm Hg minutis, et vähendada surveelemendi järeldedeformatsiooni mõju lugemile. Enne iga kontroll-lugemi määramist peab mõõteriista kergelt pöörutama, et hävitada mõõteriista mehhanismis esinevate hõõrumiste mõju lugemile. Kontrollitav mõõteriist tuleb asetada kontrollseadise klaaskupi a (joon. 45) alla sääraselt, et mõõteriista astmik oleks vaatekiirega perpendikulaarne, millega hoitakse ära parallaktilised vead astmiku lugemisel.

Kui kontrollimisel selgub, et mõõteriista lugemid on tõelistest suurustest kaunis lahkuminevad ja aneroidkarbid on korras, siis tuleb mõõteriista korri-

geerida sellekohastest reguleerimiskruvidest, milledega iga mõõteriist on varustatud.

Joonisel 46 on näitena toodud kõrgusbarograafi korrigeerimisdiagramm. Diagrammi keskjoonele on märgitud antud aneroidse mõõteriista lugemid millimeetrites ja ülemisel horisontaaljoonel korrektsiooni väärtused millimeetrites. Mõõteriista igale lugemile vastava korrektsiooni määrab korrektsioonikõver ΔA , s. o. antud lugemi kohalt ülemisele horisontaaljoonele paralleelselt tõmmatud joonlõik, arvatult keskjoonest kuni korrektsioonikõverani ΔA .

Korrektsioonidel, mida määrab vasakul pool keskjoont ehk nn. nulljoont asetsev kontrollkõvera ΔA osa, on miinusmärk, kuna paremal pool nulljoont asetsev korrektsioonikõvera osa annab korrektsioonid plussmär-



Joon. 46.

giga. Näiteks kui barograaf näitab rõhumist 630 mm, siis sellele lugemile vastav korrektsioon on +3,25 mm ja õhkkonna tõeline rõhumine võrdub $630+3,25=633,25$ mm.

Nagu varemalt öeldud, muutub aja jooksul aneroidkarpide deformeermise iseloom ja selle tõttu peab teatava aja möödumisel aneroidseid mõõteriistu uuesti kontrollima. Üldiselt võib aneroidseid mõõteriistu kontrollida lennul täpselt kontrollitud samanimelise mõõteriista järgi ja kontrollimise saaduste põhjal koostada mõõteriista jaoks korrigeerimisdiagrammi.

Igale korrektsioonidiagrammile peab alati märkima mõõteriista numbri ja kontrollimise aja ¹⁾.

Kõigil aneroidsetel mõõteriistadel on veel nn. elastsuse hüsterees, s. o. kui näiteks koordinaatide süsteemis joonestada aneroidse mõõteriista paranduskõverik funktsionaalse suurusena õhkkonna rõhumise käigust, siis paranduskõver ΔA ei lange kokku rõhumise suurenemisel ja vähenemisel. Nii sugune olukord leiab aset lennuki tõusul ja laskumisel, mille tõttu esimest kõverikku nimetame tõusukõverikuks ja teist laskumiskõverikuks. Headel mõõteriistadel need mõlemad kõverikud võivad langeda ka ühte. Praegusaegsete aerotehnikas tarvitavate mõõteriistade elastsuse hüsterees tõusude puhul 8000 kuni 10000 meetrini ei ületa 0,1% mõõteriista lugemist.

Ühenduses elastsuse hüstereesiga kui ka aneroidse mõõteriista mehhanismi osade nihkumisest tingitult esineb nn. nihkeviga. Näiteks kõrgusenäitajad (altimeetrid) näitavad peale lennuki maandumist veel teatavat kõrgust, kuigi õhurõhumine on sama kui tõusu ajal. Selle põhjuseks on, et mõõteriistas esinenud sisepingete tõttu toimuvad tema mehhanismis teatavad ajutised deformatsioonid, mis kutsuvad mehhanismi üksikosades esile teatavaid nihkeid. Harilikult on nihkeviga seda suurem, mida suurem on õhurõhumise muutuse intervall ja mida kauem on mõõteriist suurel kõrgusel viibinud. Suurel tõusudel võivad mõõteriistad saada ka jäävaid deformatsioone. Säärastel juhtudel tuleb mõõteriist uuesti kontrollida. Eriti kergesti võivad saada jäävaid deformatsioone täiesti uued riistad, mis ei ole veel tarvitusel olnud või ei ole kunstlikult tekitatud õhurõhumise muutumisega tarvilikul määral ette valmistatud.

Näide 15.

Arvutada võrrandi (71) koefitsiendid aneroidbaromeetri jaoks, mille kontrollandmed on antud tabelis 20.

Võrrandi (71) puhul on normaalvõrrandite kuju koefitsientide c , f ja n arvutamiseks võrrandite (29) põhjal:

$$c \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i) + f \sum_{i=1}^{10} t_i + 10n = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i);$$

$$c \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i) t_i + f \sum_{i=1}^{10} t_i^2 + n \sum_{i=1}^{10} t_i = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i) t_i;$$

$$c \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i)^2 + f \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i) t_i + n \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i) = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i) (760 - A_i).$$

Arvutlust on lihtne toimetada alljärgnevas tabelisüsteemis.

¹⁾ Kontrollvaatluste andmed korraldatakse kujul, nagu see näidatud tabelis 29.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A_i	764,1	762,0	760,2	757,1	747,0	762,0	761,5	758,9	756,5	745,0	
b_i	765,8	264,2	762,0	759,7	748,9	765,5	764,3	762,0	759,6	748,0	
$t_i^{\circ C}$	16	15	12	10	7	-14	-12	-10	-7	-4	$13 = \sum_{i=1}^{10} t_i$
$760 - A_i$	-4,1	-2	-0,2	2,9	13	-2	-1,5	1,1	3,5	15	$25,7 = \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i)$
$(760 - A_i)t_i$	-65,6	-30,0	-2,4	29,0	91,0	28,0	18,0	-11,0	-25,5	-60,0	$-27,5 = \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i)t_i$
$(760 - A_i)^2$	16,81	4,00	0,04	8,41	169,00	4,00	2,25	1,21	12,25	225,00	$442,97 = \sum_{i=1}^{10} (760 - A_i)^2$
t_i^2	256	225	144	100	49	196	144	100	49	16	$1279 = \sum_{i=1}^{10} t_i^2$
$b_i - A_i$	1,7	2,2	1,8	2,6	1,9	3,5	2,8	3,1	3,1	3,0	$25,7 = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i)$
$(b_i - A_i)t_i$	27,2	33,0	21,6	26,0	13,3	-49,0	-33,6	-31,0	-21,7	-12,0	$-26,2 = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i)t_i$
$(b_i - A_i)(760 - A_i)$	-6,97	-4,40	-0,36	7,54	24,70	-7,00	-4,20	3,41	10,35	45,00	$68,57 = \sum_{i=1}^{10} (b_i - A_i)(760 - A_i)$

Tabeli arvutluste põhjal võime kirjutada normaalvõrrandid:

$$\begin{aligned}25,7 c + 13 f + 10 n &= 25,7; \\ -27,5 c + 1279 f + 13 n &= -26,2; \\ 442,97 c - 27,5 f + 25,7 n &= 68,57.\end{aligned}$$

Lahendades normaalvõrrandite süsteemi, leiame otsitavatele järgnevad väärtused:

$$c = -0,0014; f = -0,0473; n = 2,64.$$

Seega on võrrandi (71) kuju antud juhul:

$$b = A - 0,0014 (760 - A) - 0,0473 t + 2,64.$$

Võrreldes temperatuurilise koefitsiendi f väärtust, mille leidsime lk. 77 antud meetodiga, selle väärtusega, mille andsid käesolevas ülesandes koostatud normaalvõrrandid, leiame, et vahe on $-0,054 + 0,0473 = -0,0067$, mis on tingitud sellest, et käesoleval juhul f on määratud $n=10$ vaatluse põhjal, eelmisel juhul aga $n=5$ vaatlusega. Praktiliselt on saadud vahe tähtsusetu.

Õhkkonna rõhumise mõõtmine millibaarides.

Õhkkonna rõhumise mõõtmine millibaarides on võetud tarvitusele norra teadlase V. Bjerknes'e ettepanekul. Selle süsteemi aluseks on absoluutse mõõdetudesüsteemi jõumõõduühik $d \ddot{u} \ddot{u} n$.

Üks düün, nagu teada, on jõud, mis ühele gramm-massile annab sekundis kiirenduse üks sentimeeter.

Rõhumist 1000000 düüni ühe-ruutsentimeetrilisele pindalale nimetatakse üheks *b a a r i k s*. Baari alamõõtühik on millibaar.

1 baar = 1000 millibaari.

Millibaari tähistame sümboolselt mb.

Arvesse võttes, et jõud üks gramm annab gramm-massile kiirenduse $980,665 \text{ sm/sek.}^2$ (vabalangemise kiirendus 45° geograafilisel laiusel, vt. lk. 64), järeldame, et $1 \text{ g} = 980,665$ düüni, sest jõud üks düün, nagu tähendatud, annab gramm-massile kiirenduse 1 sm/sek.^2 .

$$\begin{aligned}\text{Järelikult } 1 \text{ baar} &= 1000 \text{ mb} = 1000000 \text{ düüni/sm}^2 = \\ &= \frac{1000000}{980,665} \text{ g/sm}^2, \text{ kust leiame, et}\end{aligned}$$

$$1 \text{ g/sm}^2 = 0,980665 \text{ mb.}$$

Teades, et 45° geograafilisel laiusel õhkkonna rõhumine $b=760 \text{ mm Hg}$ vastab rõhumisele $1033,2276 \text{ g/sm}^2$ (vt. lk. 73), leiame:

$$760 \text{ mm Hg} = 0,980665 \cdot 1033,2276 = 1013,250 \text{ mb.}$$

Järelikult:

$$\left. \begin{aligned}1 \text{ mm Hg} &= 1,333224 \text{ mb} \\ 1 \text{ mb} &= 0,750062 \text{ mm Hg}\end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (78).$$

Tähistades rõhumise millibaarides tähega b_{mb} ja rõhumise millimeetrites vastavalt 45° geograafilisele laiusle — tähega b , võime eeltoodu põhjal kirjutada vahekorrad:

$$\left. \begin{aligned}b_{mb} &= 1,333224 b \\ b &= 0,750062 b_{mb}\end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (79).$$

Vahekordade (79) abil on võimalik baromeetrist rõhumist, mis antud mm Hg, arvutada millibaaridesse ja vastupidi, kuid sellejuures tuleb silmas pidada, et baromeetri lugemi peab enne korrigeerima ja taandama 45° geograafilise laiusele. Tabelis 21 on toodud võrrandi (79) põhjal tehtud õhkkonna rõhumise ümberarvutlused millimeetritest millibaarideks.

T a b e l 21. mm Hg — millibaarideks.

mm Hg	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
700	933,2	934,6	935,9	937,2	938,6	939,9	941,2	942,6	943,9	945,2
710	946,6	947,9	949,2	950,6	951,9	953,2	954,6	955,9	957,2	958,6
720	959,9	961,2	962,6	963,9	965,2	966,6	967,9	969,2	970,6	971,9
730	973,2	974,6	975,9	977,2	978,6	979,9	981,2	982,6	983,9	985,2
740	986,6	987,9	989,2	990,6	991,9	993,2	994,6	995,9	997,2	998,6
750	999,9	1001,2	1002,6	1003,9	1005,2	1006,6	1007,9	1009,2	1010,6	1011,9
760	1013,2	1014,6	1015,9	1017,2	1018,6	1019,9	1021,2	1022,6	1023,9	1025,2
770	1026,6	1027,9	1029,2	1030,6	1031,9	1033,2	1034,6	1035,9	1037,2	1038,6
780	1039,9	1041,2	1042,6	1043,9	1045,2	1046,6	1047,9	1049,2	1050,6	1051,9
790	1053,2	1054,6	1055,9	1057,2	1058,6	1059,9	1061,2	1062,6	1063,9	1065,2
800	1066,6	1067,9	1069,2	1070,6	1071,9	1073,2	1074,6	1075,9	1077,2	1078,6
810	1079,9	1081,2	1082,6	1083,9	1085,2	1086,6	1087,9	1089,2	1090,6	1091,9

Baromeetrilise rõhumise ümberarvutus rõhumisele kilogrammides ühe-ruutmeetrilisele pindalale.

Aeromehaanika matemaatilistes rakendustes mõõdetakse õhkkonna rõhumist enamasti kilogrammides ühe-ruutmeetrilisele pindalale, mille tõttu sagedasti on vajalik õhu baromeetrist rõhumist ümber arvutada rõhumiseks ühe-ruutmeetrilisele pindalale. Selle arvutluse aluseks on tõsiolu, et üks millimeeter baromeetrist korrigeeritud rõhumist 45° geograafilisel laiusel vastab 13,5951-kilogrammilisele rõhumisele ühe-ruutmeetrilisele pindalale. Järelikult, kui õhkkonna baromeetriline rõhumine, mis taandatud 45° geograafilise laiusele, on b millimeetrit, siis rõhumine kilogrammides ühele ruutmeetri-le on 13,5951 korrutatud b -ga ¹⁾). Eeltoodu põhjal on arvutusvõrrandi kuju:

$$p = 13,5951b \dots \dots \dots (80),$$

¹⁾ Sest rõhumine on võrdeline samba kõrgusega.

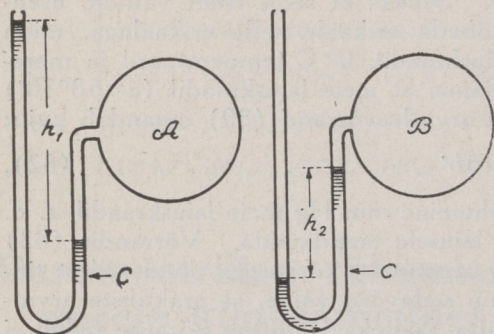
Võrranditest (80) ja (83) järeldame, et kui on antud kaks isesugust baromeetrilist rõhumist b_1 ja b_2 , siis nad suhtuvad üksteisesse nagu nende baromeetrilistele rõhumistele vastavad ruutmeetrilisele pindalale arvatud rõhumised p_1 ja p_2 , s. o.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{b_1}{b_2} \quad \dots \dots \dots (85).$$

Kõiki neid õhu või üldse gaaside rõhumisi, mida mõõdetakse absoluutsest tühjusest, s. o. millede nullrõhumiseks võetakse absoluutne tühjus, nimetatakse absoluutseteks rõhumisteks. Kui aga nullrõhumiseks on võetud õhkkonna rõhumine, siis sääraselt mõõdetud rõhumisi võime õhkkonna rõhumise suhtes jaotada kahte liiki: ülerõhkudeks ja alarõhkudeks. Ülerõhuks nimetame nähtust, kui õhk või üldse gaas asub suurema rõhu all, kui seda on õhkkonna rõhumine. Kui aga gaas on õhkkonna rõhumisest väiksema rõhu all, siis nimetame seda nähtust alarõhuks, hõrenduseks, vaakuumiks või depressiooniks.

Väikesi üle- ja alarõhke mõõdetakse vedelikkude varal töötavate manomeetritega, millede vedelikusamba nivooindade vaheline kõrgus mõõdab teotseva üle- või alarõhu suurust. Näiteks veega töötava manomeetri puhul vastab 1 mm veesammast rõhumisele 1 kg/m² (vt. võrrandit 81).

Vedelikuga töötavate manomeetrite skeemid on näidatud joonisel 47, kus anumad A ja B on ühendatud loogasarnase klaastoruga c (manomeetriga), milles asetseb vesi või mõni muu vedelik.



Joon. 47.

Manomeetri välisele nivooopinale mõjub õhkkonna rõhumine ja anumapoolsele nivooopinale anumas oleva õhu või gaasi rõhumine. Need mõõteriistad annavad anumas asetseva gaasi rõhumise diferentsi õhkkonna rõhumise suhtes, s. o. annavad otsekohe ala- ja ülerõhu suurused. Nagu jooniselt 47 selgub, asub anumas A olev gaas ülerõhu all, kuna õhkkonna ja anumas asetseva gaasi rõhumisi tasa-kaalustav vedelikusammas asub ma-

nomeetri välisharus (ülerõhk võrdub h_1 mm). Anumas B asuv gaas on alarõhu-seisukorras, sest õhk on vedelikusamba rõhunud manomeetri anumapoolsele harru. Alarõhk sel puhul on h_2 mm. Eeltoodud manomeetrite ehitus on väga mitmekesine ja nad on tarvitusel paljudes tehnilistes seadistes. Aerotehnilistes laboratooriumides tarvitatakse neid õhuvoolus esineva staatilise rõhumise mõõtmiseks jne.

Õhu erimaht ja erikaal.

Õhukogu kantmeetrites, mis kaalub ühe kilogrammi, nimetatakse õhu erimahtuks. Seega õhu erimahu mõõde on m^3/kg ehk $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Arvesse võttes, et erimahu määrajaks on õhu ühekilogrammiline raskus, nimetatakse erimahtu ka kilogramm-mahuks.

Edaspidises tähistame erimahtu tähega v . Näiteks kui on kirjutatud $v=0,815 \text{ m}^3/\text{kg}$, siis tuleb seda mõista nii, et 0,815 kantmeetrit õhku kaalub üks kilogramm, või teisiti — üks kilogramm õhku võtab enda alla ruumala 0,815 kantmeetrit.

Õhu erimaht ei ole konstantne suurus, vaid muutub ühes õhu rõhumisega ja temperatuuriga. Nimelt kui õhu temperatuur tõuseb, siis õhk paisub, millega ühtlasi suureneb ka tema erimaht, s. o. ühe kilogrammi raskune õhukogu võtab enda alla suurema ruumala, jne. Õhu erimahu ja temperatuuri matemaatilise vahekorra konstantse õhurõhumise juures annab Gay-Lussac'i seadus, mille põhjal võime ütelda, et kui gaasi konstantse rõhumise puhul tõstame gaasi temperatuuri 1°C võrra, siis tema erimaht suureneb võrreldes selle erimahuga, mida gaas omab 0°C temperatuuril, $1/273$ võrra. Matemaatiliselt see seadus avaldub järgmiselt:

$$v=v_0 \left(1+\frac{t}{273}\right) \dots \dots \dots (86),$$

kus v_0 on meile teada olev erimaht 0°C temperatuuril ja v — otsitav erimaht temperatuuri t puhul.

Õhu rõhumise muutumisel jääva temperatuuri puhul muutub õhu erimaht pöördvõrdeliselt rõhumisega, s. o. rõhumise suurenemisel erimaht samas vahekorras väheneb, ja vastupidi. Rõhumise ja erimahu matemaatilise vahekorra jääva temperatuuri puhul annab tuntud Boyle-Mariotte'i seadus, mille põhjal võime ütelda, et jääva temperatuuri puhul gaasi erimahu korutus tema rõhumisega on jääv suurus, s. o.

$$pv=p_1v_1 \dots \dots \dots (87),$$

kus p on gaasi rõhumine kg/m^2 erimahu v puhul ja p_1 — sama gaasi rõhumine kg/m^2 erimahu v_1 puhul.

Rõhumisest ja temperatuurist sõltuvuse iseloomu poolest on õhu erimahule vastandiks õhu erikaal. Õhu erikaaluks nimetatakse ühe kantmeetri õhu raskust kilogrammides. Õhu erikaalu mõõde on seega kg/m^3 ehk $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Edaspidises tähistame õhu erikaalu tähega γ . Järelikult kui on kirjutatud $\gamma=1,227 \text{ kg}/\text{m}^3$, siis tuleb seda mõista nii, et üks kantmeeter õhku kaalub 1,227 kg. Õhu erikaal ei ole jääv suurus, vaid oleneb õhu temperatuurist ja rõhumisest, nagu õhu erimahtki, kuid on viimasega pöördvõrdeline, s. o. õhu erikaal ja erimaht on matemaatiliselt seotud vahekorraga:

$$\gamma=\frac{1}{v} \dots \dots \dots (88).$$

Selle vahekorra maksvus järeldub sellest, et kui ühe kilogrammi õhu maht on v kantmeetrit, siis ühe kantmeetri õhu raskus on v korda väiksem, s. o. $\frac{1}{v}$, mis ongi õhu erikaal. Katsetega on kindlaks tehtud (vt. näidet 11,

Gaaside karakterlik ehk Clapeyron'i võrrand¹⁾).

Nagu eelmisest selgus, on õhu erimaht, rõhumine ja temperatuur seotud omavahel eri matemaatiliste vahekordadega (vt. võrrandeid 86 ja 87). Neid matemaatilisi vahekordi on võimalik siduda üheks võrrandiks, mis annab vahekorra kolme muutujaga — erimahuga, rõhumisega ja temperatuuriga. Selle võrrandi moodustamine toimub järgmiselt:

Võtame gaasi kolm eri seisukorda:

$$\begin{array}{ll} v_0, p_0, t_0 \dots \dots \dots & \text{I,} \\ v_1, p_0, t_1 \dots \dots \dots & \text{II,} \\ v, p, t_1 \dots \dots \dots & \text{III.} \end{array}$$

Esimene seisukord olgu vastav algseisukorrale gaasi absoluutsel temperatuuril $T_0 = 273^\circ \text{C}$; seega $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

Teises seisukorras on jäetud rõhumine endiseks, kuid on muudetud temperatuur; seega seos I ja II seisukorra vahel allub Gay-Lussac'i seadusele ja valem (86) annab v_1 jaoks avaldise:

$$v_1 = v_0 \left(1 + \frac{t_1 - t_0}{273} \right).$$

Kolmandas seisukorras on muudetud rõhumine, kuid on alale jäetud II seisukorra temperatuur; seega seos II ja III seisukorra vahel allub Boyle-Mariotte'i seadusele ja valem (87) annab:

$$pv = p_0 v_1.$$

Asendades saadud vahekorras v_1 tema avaldisega, mille saime seosest I ja II seisukorra vahel, leiame:

$$pv = p_0 v_0 \left(1 + \frac{t_1 - t_0}{273} \right) = \frac{p_0 v_0}{273} (273 + t_1 - t_0).$$

Kuna $t_0 = 0^\circ \text{C}$, moodustab avaldis $273 + t_1 - t_0$ gaasi III seisukorra absoluutse temperatuuri. Tähistades selle avaldise tähega T , saame:

$$pv = \frac{p_0 v_0}{273} T \dots \dots \dots (90).$$

Võrrandis (90) esinev suurus $\frac{p_0 v_0}{273}$ on iga gaasi või gaaside segu jaoks konstantne suurus. Seda suurust nimetatakse gaaside konstandiks ning tähistatakse tähega R . Asendades võrrandis (90) gaaside konstandi avaldise tema sümboliga, saame võrrandi lõplikult kujul:

¹⁾ Teoreetiliselt on Clapeyron'i võrrand maksev vaid ideaalsete gaaside kohta, reaalsete gaaside puhul aga ainult teatava täpsusega, kuid on siiski viimaselgi juhul täiesti rakendatav.

$$pv=RT \dots\dots\dots (91)^1).$$

Võrrandit (91) nimetatakse gaaside karakterlikuks ehk Clapeyron'i võrrandiks. Võrrandis tähistab p , nagu varemgi, õhu rõhumist kg/m^2 ja v — rõhumisele p ning absoluutsele temperatuurile T vastavat gaasi erimahtu.

Võrrandi (91) tõelisust reaalgaside suhtes on uurinud paljud tuntud teadlased. Nendest uurimustest võib teha järelduse, et õhkkonnas esinevate rõhumiste ja temperatuuride intervallis alluvad reaalgasid võrrandile (91) küllaldase täpsusega. Suurte rõhumiste puhul (80—2800 atm.) harilikul temperatuuril mitteveelduvate gaaside (N, O, H jne.) kokkusurutavus on väiksem, kui see peaks olema Boyle-Mariotte'i seaduse järgi.

Gaaside konstandi arvutusvõrrandi annab võrrand (91), kui teda lahendame R suhtes. Selle konstandi võime avaldada ka seoses gaasi erikaaluga, asendades võrrandis (91) gaasi erimahu v võrrandi (88) põhjal gaasi erikaaluga, s. o.

$$R = \frac{p v}{T} = \frac{p}{T \gamma} \dots\dots\dots (93).$$

Gaaside konstandi R arvsuurus oleneb gaasi iseloomust, kuid võrrandist (93) järeldame, et tema arvsuurus oleneb veel mõõtühikutest, milledes on arvatud p , T ja γ või v , ja seega ta muutub ka teataval määral vastavalt koha geograafilisele laiusle ning kõrgusele merepinnalt, kuna ta on olenev gaasi erikaalust, mis aga sõltub vabalangemise kiirendusest (vt. lk. 63).

Arvestades vabalangemise kiirenduse mõju gaasi erikaalule, erimahule ja gaaside konstandile, võtame edaspidistes arvutlustes gaasi erikaalu, erimahu ja gaaside konstandi põhisuurusteks need suurused, mida antud gaas omab 45° geograafilisel laiusel, merepinna kõrgusel, temperatuuril 0°C ja rõhumisel 760 mmHg. Need põhisuurused tähistame edaspidi alati järgmiselt:

erikaal $\dots\dots\dots \gamma_0$,
 erimaht $\dots\dots\dots v_0$,
 gaaside konstant $\dots\dots\dots R_0$.

Õhu jaoks on teada (vt. näidet 11 ja võrdust 89), et 45° geograafilisel laiusel, merepinna kõrgusel, 0°C temperatuuril ja õhurõhumisel 760 mm Hg, s. o. $p=10332,276 \text{ kg/m}^2$, on kuiva õhu erikaal $1,2930 \text{ kg/m}^3$. Seega konstandi R arvsuurus kuiva õhu jaoks võrrandi (93) järgi on:

$$R_0 = \frac{10332,276}{273 \cdot 1,293} = 29,2708 \dots\dots\dots (94).$$

¹⁾ Võrrand (91) on kehtiv ühekilogrammiline gaasikogu jaoks, kuid seda võrrandit on võimalik kohastada igasugusele gaasikogule. Selleks oletame, et absoluutse temperatuuri T puhul antud gaasikogu, mille raskus on $G \text{ kg}$, omab mahtu $V \text{ m}^3$, siis avaldub gaasi erimaht v , s. o. ühekilogrammiline gaasikogu, vahekorraga $v = \frac{V}{G}$. Asendades saadud avaldise võrrandisse (91) saame:

$$p \frac{V}{G} = RT, \text{ ja siit:}$$

$$pV = RTG \dots\dots\dots (92).$$

Võrrand (92) on Clapeyron'i võrrand igasuguse gaasikogu jaoks.

Õhu erikaalu ja erimahu arvutluse võrrandid.

Gaasi erikaalu arvutluse võrrandi annab võrrand (93), kui teda lahendada γ suhtes. Seega vastavalt eelantud sümbolitele (vt. lk. 92) on gaasi erikaalu avaldis 45° geograafilise laiusel jaoks merepinna kõrgusel:

$$\gamma_0 = \frac{p}{R_0 T} \quad \dots \quad (95).$$

Asendades võrrandis (95) $R_0 = 29,2708$ ja õhu rõhumise p tema avaldisega võrrandist (80), saame peale tehteid arvustustega kuiva õhu erikaalu arvutluseks võrrandi 45° geograafilise laiusel jaoks kujul:

$$\gamma_0 = 0,4644 \frac{b}{T} \quad \dots \quad (96).$$

Aluseks võttes võrrandi (96) leiame, et võrrandi (88) põhjal kuiva õhu erimahu arvutluse võrrand 45° geograafilise laiusel jaoks avaldub kujul:

$$v_0 = 2,1533 \frac{T}{b} \quad \dots \quad (97).$$

Võrrandites (96) ja (97) on b õhu baromeetiline korrigeeritud rõhumine mm Hg ja T — õhu absoluutne temperatuur.

Asendades võrrandites (96) ja (97) baromeetrilise rõhumise b tema avaldisega võrrandist (79), saame õhu erikaalu ja erimahu arvutluse võrrandid seoses õhu rõhumisega millibaarides:

$$\gamma_0 = 0,34833 \frac{b_{mb}}{T} \quad \dots \quad (98);$$

$$v_0 = 2,87086 \frac{T}{b_{mb}} \quad \dots \quad (99).$$

Selleks aga, et saada gaaside erikaalu arvutluse võrrandit iga geograafilise laiuskraadi ja iga kõrguse jaoks, asendame võrrandis (62) γ_0 tema avaldisega võrrandist (95). Tehes selle asenduse, saame:

$$\gamma = \frac{p}{R_0 T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314z) \quad \dots \quad (100),$$

kus R_0 on antud gaasi konstant vastavalt 45° geograafilisele laiusel, p — gaasi rõhumine kg/m², T — gaasi absoluutne temperatuur, φ — koha geograafiline laius ja z — koha kõrgus merepinnalt meetrites.

Asendame võrrandis (100) rõhumise p võrrandi (80) põhjal õhu baromeetrilise rõhumisega b , gaasi konstandi R tema arvustusega vastavalt õhule (29,2708) ning jätame arvesse võtmata aine raskuse muutumise ühes kõrgusega, s. o. arvame kõrgusbinoomi võrdseks ühega, ja võtame Eesti keskmiseks laiuskraadiks $\varphi = 58^\circ 30'$ [sel puhul binoom $(1 - 0,00265 \cos 2\varphi) = 1,00120334$], siis peale tehteid arvustustega saame kuiva õhu erikaalu arvutluse võrrandi vastavalt meie geograafilisele laiusel:

$$\gamma = 0,4650 \frac{b}{T} \quad \dots \quad (101),$$

ja õhu erimahu arvutluse võrrandi:

$$v = 2,150 \frac{T}{b} \dots \dots \dots (102).$$

Võrrandites (101) ja (102) on b õhu baromeetiline korrigeeritud rõhumine ja T — absoluutne temperatuur.

Asendades võrrandites (101) ja (102) b tema avaldisega võrrandist (79), saame õhu erikaalu ja erimahu arvutluse võrrandid seoses õhu rõhumisega millibaarides:

$$\gamma = 0,34878 \frac{b_{mb}}{T} \dots \dots \dots (101a);$$

$$v = 2,8671 \frac{T}{b_{mb}} \dots \dots \dots (102a).$$

Näide 18.

Arvutada võrrandite (100), (96) ja (101) järgi kuiva õhu erikaal 59° geograafilisel laiusel ja 2450 m kõrgusel merepinnalt, kui õhkkonna rõhumine on $b = 567$ mm ja temperatuur 8°C .

Arvutamise teostame võrrandiga (100). Kõige esiteks arvutame geograafilise laiuse ja kõrguse binoomide arvsuurused:

$$(1 - 0,00265 \cos 118^\circ) = (1 + 0,00265 \cos 62^\circ) = \\ = (1 + 0,00265 \cdot 0,469) = 1,00124.$$

$$(1 - 0,000000314 \cdot 2450) = 0,999231.$$

Õhkkonna rõhumise kg/m^2 leiame võrrandiga (80):

$$p = 13,5951 \cdot 567 = 7708,422 \text{ kg/m}^2.$$

Järelikult õhu erikaal võrrandi (100) järgi on:

$$\gamma = \frac{7708,422}{29,2708 \cdot 281} \cdot 1,00124 \cdot 0,999231 = 0,9376 \text{ kg/m}^3.$$

Võrrandi (96) järgi oleks õhu erikaal:

$$\gamma = 0,4644 \cdot \frac{567}{281} = 0,9371 \text{ kg/m}^3,$$

ja võrrandi (101) järgi:

$$\gamma = 0,4650 \cdot \frac{567}{281} = 0,9383 \text{ kg/m}^3.$$

Nagu käesolevast näitest näha, annavad võrrandid (101) ja (96) võrrandi (100) suhtes vea, mis praktiliste arvutluste puhul ei ole mainimisväärne. Seega annavad võrrand (96) ja (101) meie geograafilisel laiusel praktilisteks arvutlusteks küllaldase täpsuse.

Õhu niiskus.

Õhu niiskust iseloomustatakse absoluutse ja relatiivse niiskusega.

Absoluutseks niiskuseks nimetatakse ühes kantmeetris õhus sisalduva veeauru hulka grammides. Uuemat ajal nimetatakse otstarbekohasuse pärast ka õhus sisalduva veeauru rõhumist mm Hg või mb absoluutseks niiskuseks, kuna see võimaldab kergemini käsitleda seoseid õhu rõhumisega. Lahkumine õhus leiduva veeauru hulga g/m^3 ja veeauru rõhumise vahel mm Hg on arvuliselt väike; $15,9^\circ C$ temperatuuril on need arvud võrdsed (vt. võrrandit 114). Madalamatel temperatuuridel on auru hulk g/m^3 arvuliselt veidi suurem kui sama veeauru rõhumine mm Hg, kuna temperatuuridel üle $15,9^\circ C$ on veeauru hulk g/m^3 arvuliselt natuke väiksem sama auru rõhumisest mm Hg, nagu seda võib jälgida raamatu lõpus antud tabelist 35.

Õhus oleva veeauru rõhumist mm Hg või mb nimetatakse uuemat ajal veeauru pingeks.

Relatiivseks niiskuseks nimetatakse ühes kantmeetris õhus sisalduva veeauru raskuse suhet samal temperatuuril kantmeetrilisse ruumalasse mahtuva küllastatud veeauru raskusega, või õhus oleva veeauru rõhumise (pinge) mm Hg või mb suhet küllastusrõhumisega (küllastuspingega). (Vt. võrrandit 115.)

Tähistades ühes kantmeetris õhus sisalduva veeauru kaalu tähega q , samal temperatuuril ühte kantmeetrisse mahtuva küllastatud veeauru raskuse tähega q_0 ja õhu relatiivse niiskuse tähega r , võime eelöeldu põhjal õhu relatiivse niiskuse avaldada võrrandiga:

$$r = \frac{q}{q_0} \dots \dots \dots (103),$$

ehk protsentides:

$$r' = 100 \frac{q}{q_0} \dots \dots \dots (104).$$

Näiteks $+10^\circ C$ temperatuuril mahub ühekantmeetrilisse ruumalasse 9,4 grammi küllastatud veeauru. Kui sellel temperatuuril kantmeeter õhu sisaldab tegelikult 7,5 grammi veeauru, siis õhu relatiivne niiskus on $7,5 : 9,4 = 0,798$ ehk protsentides 79,8%.

Füüsikast teame, et küllastatud veeaurul on kindel rõhumine, mis oleneb ainuüksi temperatuurist, kusjuures temperatuuri tõusmisel küllastatud auru rõhumine suureneb, kuna aga temperatuuri langemisel see väheneb. Sama seadus on kehtiv ka ühte kantmeetrisse mahtuva küllastatud veeauru raskuse q_0 kohta, mida võib jälgida raamatu lõpus antud tabelist 35.

Daltoni partsiaalsete rõhumiste seadusest järeldame, et kuiva õhu ja veeauru segu summaarne rõhumine võrdub kuiva õhu ja veeauru rõhkude summaga. Järelikult niiske õhu puhul koosneb õhkkonna baromeetiline rõhumine veeauru ja kuiva õhu rõhumiste summast. Tähistades baromeetrilise rõhumise vaatluskohas tähega b , kuiva õhu rõhumise tähega b_1 ja veeauru rõhumise tähega e , võime eelöeldu põhjal kirjutada vahekorra:

$$b = b_1 + e \dots \dots \dots (105).$$

Näiteks kui $+20^{\circ}\text{C}$ temperatuuril veeauru rõhumine on 12 mm Hg ja õhkkonna baromeetriline rõhumine 765 mm Hg, siis kuiva õhu rõhumine on

$$b_1 = b - e = 765 - 12 = 753 \text{ mm Hg.}$$

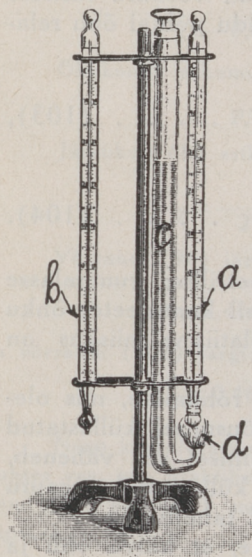
Õhus leiduva veeauru rõhumine e oleneb õhu veeaurusisaldusest, kusjuures veeauru rõhk antud temperatuuril omab maksimaalset väärtust küllastuse piiril (udu tekkimine). Vahet, mille saame, kui õhu temperatuurile vastavast küllastatud veeauru rõhumisest lahutame õhus leiduva veeauru rõhumise, nimetatakse niiskuse vajakuks ehk niiskuse defitsiidiks.

Tähistades niiskuse vajaku tähega d , õhu temperatuurile vastava veeauru rõhumise, küllastuse piiril, tähega e_0 ja õhus leiduva veeauru rõhumise, nagu varemaltki, tähega e , võime niiskuse vajaku avaldada vahekorraga:

$$d = e_0 - e \quad \dots \dots \dots (106).$$

Niiskuse vajakust sõltub kehade pindadel vee aurustumise kiirus. Mida suurem on niiskuse vajak, seda kiiremini toimub vee aurustumine, s. o. vee aurustumine kehade pindadel on võrdeline niiskuse vajakuga. Seejuures tuleb niiskuse vajakuks arvata veeaurude rõhumise vahe keha pinna temperatuurile vastava küllastatud veeauru rõhumise ja õhus tegelikult sisalduva veeauru rõhumise vahel. Peale selle on vee aurustumine veel pöördvõrdeline õhkkonna rõhumisega.

Praktiliselt määratakse õhus leiduva veeauru rõhumist e psühromeetriga või hügromeetriga. Psühromeeter (joon. 48) koosneb vastavasse seadmesse monteeritud kahest termomeetrist (a ja b). Ühe termomeetri tundmik (termomeeter a) on varustatud vesiniisutusseadmega (veeanum c ja taht d , mis ulatub batistriidesse mähitud termomeetri a tundmikuni), kuna teise termomeetri tundmik on õhuga vabas kokkupuutes ning seega teine termomeeter näitab õhu temperatuuri. Peale selle on paljud psühromeetrid varustatud veel vedrujõul töötava tuulikuga, mis tekitab termomeetrite tundmikkuude juures õhuvoolu, tavaliselt kiirusega üle 2 m/sek., et termomeetrid kiiremini saavutaksid õhu suhtes soojuslikult statsionaarse seisukorra, s. o. seisukorra, mil termomeetri lugemid muutuvad konstantseteks, ja et hoida õhu liikumise kiirust konstantseks, sest termomeetri soojusekaotus antud ajahükkus (eriti märg termomeeter) oleneb õhu liikumise kiirusest, mis eriti tundub on kiiruste juures alla 2 m/sek. Kiiruste puhul üle 2 m/sek. muutub termomeetri soojusekaotus enamvähem konstantseks ning ühes sellega täpsemaks ka õhu niiskuse määramise võimalus psühromeetriga. Termomeetrite lugemite määramine peab toimuma termomeetrite soojuslikult statsionaarses seisukorras.



Joon. 48.

Psühromeetril on õhu niiskust iseloomustavaks teguriks õhu temperatuur ja kuiva ning märja termomeetri lugemite vahe. Märja termomeetri lugemine on alati väiksem kuiva termomeetri lugemist, s. o. märg termomeeter näitab õhu temperatuurist madalamat temperatuuri, sest vee aurustumise tagajärjel

annab märg termomeeter vee aurumissoojuseks ära teatava soojushulga, mis põhjustabki temperatuuri langemise.

Kuiva ja märja termomeetri lugemite vahe suurus termomeetrite soojuslikult statsionaarses seisukorras oleneb märjalt termomeetrilt ajaühikus äravõetavast soojuse hulgast ehk, mis sama, tundmiku pinnalt sama ajaühiku vältel aurustunud vee hulgast. Termomeetri tundmikult aurustuva vee hulk on seda suurem, mida suurem on tundmiku pindala ja mida suurem on niiskuse vajak, s. o. ta on võrdeline tundmiku pindalaga ja niiskuse vajakuga ning, nagu varemalt mainitud, pöördvõrdeline õhkkonna rõhumisega.

Tähistades tundmiku pindala tähega S , õhkkonna rõhumise tähega b ja tundmikult ajaühiku vältel aurustuva vee hulga tähega q' , võime vee hulga q' avaldada vahekorraga:

$$q' = k \frac{e'_0 - e}{b} S,$$

kus k on konstant, mis oleneb termomeetri tüübist ja õhu kiirusest tundmiku juures, e'_0 — küllastatud veeauru rõhumine vastavalt märja tundmiku temperatuurile, s. o. vastavalt temperatuurile, mida näitab märg termomeeter, ja e — õhus leiduva veeauru rõhumine.

Teades ajaühikus termomeetri tundmikult aurustuva vee hulka, saame arvutada ka termomeetri tundmikult ajaühikus äravõetava soojuse hulka, mis, nagu teada, võrdub q' ja vee aurumissoojuse¹⁾ korrutisega. Tähistades tundmikult ajaühikus äravõetava soojuse hulga tähega Q_1 ja vee aurumissoojuse tähega r' , võime kirjutada vahekorra:

$$q' r' = Q_1 = k \frac{e'_0 - e}{b} S r'.$$

Kuna aga märja termomeetri tundmiku temperatuur on madalam õhu temperatuurist, siis samaaegselt, kui tundmik annab ajaühikus ära soojushulga Q_1 vee aurustumiseks, saab ta samas ajaühikus õhust tagasi teatava soojushulga Q_2 . See soojushulk Q_2 on võrdeline tundmiku pindalaga S ja kuiva ning märja termomeetri poolt näidatud temperatuuride vahega, s. o.

$$Q_2 = a (t_k - t_n) S,$$

kus t_k on kuiva termomeetri poolt näidatud temperatuur, t_n — märja termomeetri poolt näidatud temperatuur ja a — koefitsient, mille väärtus oleneb termomeetri tüübist.

Arvesse võttes, et termomeetrite lugemid määratakse alles siis, kui termomeetrid on soojuslikult statsionaarses seisukorras, s. o. kui lugemid on muutunud konstantseteks, siis märja termomeetri tundmikult ajaühikus ärantav soojushulk võrdub õhust tundmikule juurdevoolava soojushulgaga, s. o. $Q_1 = Q_2$. Järelikult võime kirjutada vahekorra:

$$k \frac{e'_0 - e}{b} S r' = a (t_k - t_n) S.$$

Lahendades selle võrrandi e suhtes, saame võrrandi õhus sisalduva veeauru rõhumise arvutamiseks:

$$e = e'_0 - \frac{a}{k r'} (t_k - t_n) b.$$

¹⁾ Aurumissoojuseks nimetatakse soojuse hulka, mis vajalik normaalse rõhu all (760 mm Hg) ühe grammi keeva vee auruks muutmiseks. Vee aurumissoojus on 537 g-kal.

Tähistades konstantse suuruse $\frac{a}{k\gamma'}$ tähega C , saame võrrandi lõplikul kujul:

$$e = e'_0 - C (t_k - t_n) b \quad (107),$$

kus b on õhkkonna baromeetiline rõhumine mm Hg, t_k — kuiva termomeetri poolt näidatud temperatuur, t_n — märja termomeetri poolt näidatud temperatuur, e'_0 — temperatuurile t_n vastav küllastatud veeauru rõhumine, mille leiame raamatu lõpus antud tabelist 34 või 35, ja C — koefitsient, mis teatud määral oleneb psühromeetri tundmikkude juures teotseva õhuvoolu kiirusest (sest koefitsient k oleneb õhu kiirusest tundmiku juures) ja ka psühromeetri tüübist. C määratakse kindlaks psühromeetri samaaegse kontrollimisega kondensatsioonhügromeetriga. Regnault' katsete andmeil on C keskmine väärtus paigalseisva toaõhu jaoks $C=0,00128$, ja vaba välisõhu jaoks, mis teatava kiirusega möödub termomeetri tundmikust, $C=0,0008$.

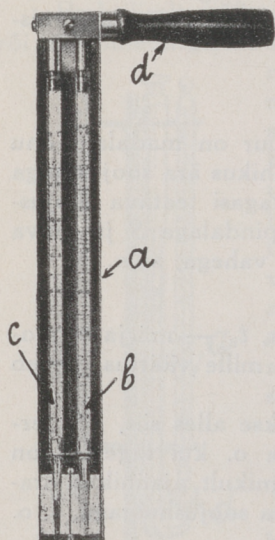
Praktiliselt toimub õhu niiskuse arvutamine psühromeetri abil sellekohaste tabelitega või diagrammidega, mis on koostatud võrrandi (107) alusel ja antakse igale psühromeetrile kaasa valmistaja poolt. Temperatuuride puhul alla 0°C on psühromeetriga õhu niiskuse määramine ebatäpne, sest termomeetri tundmikul vesi külmub ja sel puhul on niiskuse määrajaks aurustumise intensiivsus jäält, mis on vee omast ebatäpsem.

Õhus leiduva veeauru rõhumist e , s. o. absoluutset niiskust, võib ligikaudselt arvutada järgmise Regnault' poolt antud valemi järgi:

$$e = e'_0 - \frac{0,48(t_k - t_n)b}{610 - t_n} \quad (108)^1).$$

Võrrandis (108) esinevatel tähtsustel on samad tähendused nagu võrrandis (107).

Lihtsa psühromeetri üldvaade on antud joonisel 49. Psühromeeter koosneb kestast a , millesse on monteeritud kaks termomeetrit b ja c . Termomeetri b tundmik on mähitud batistriidesse, mis enne mõõtmisele asumist niisutatakse veega. Termomeeter c määrab õhu temperatuuri. Kest a on varustatud käepidemega d , mille abil on võimalik kesta ühes termomeetritega ümber käepideme telje ringi keerutada, termomeetrite tundmikkude juures õhuvoolu tekitamiseks. Psühromeetrit peab keerutama seni, kuni mõlema termomeetri lugemid muutuvad konstantseteks.



Joon. 49.

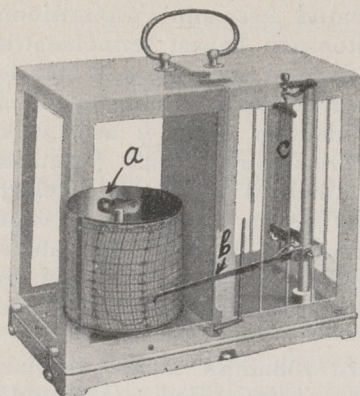
¹⁾ Kui võrrandis (108) võtame $b=760$ ja murru nimetajas $t_n=15^\circ$, siis saame absoluutse niiskuse ligikaudse arvutlemise võrrandi kujul:

$$e = e'_0 - 0,6(t_k - t_n) \quad (108a).$$

Võrrandit (108a) kasutatakse enamasti psühromeetri tabelite koostamisel.

Aspiratsioonpsühromeetri jaoks, kus $(t_k - t_n)$ on suurem, tarvitatakse võrrandit kujul:

$$e = e'_0 - 0,5(t_k - t_n) \quad (108b).$$



Joon. 51.

Hügrograafi üldvaade on antud joonisel 51. Tähtedega on märgitud: *a* — keerlev trummel, millele kinnitatakse lint, *b* — lindile niiskuse käiku märkiv sulega varustatud hoob ja *c* — juuksekarvade kimp, mis vastavalt õhu niiskusele oma pikkuse muutumisega paneb tegevusse hoova *b* mehhanismi.

Nii hügromeeter kui ka hügrograaf vajavad kontrollimist täpsete mõõteriistadega.

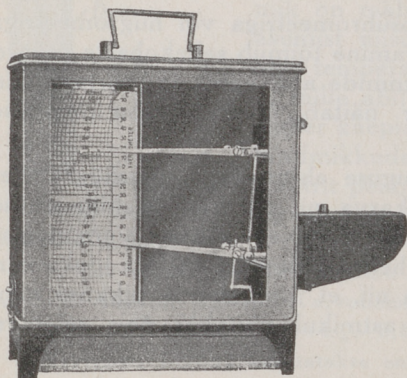
Hügrogrammilt loetavad ordinaadid vajavad korregerimist, mis toimub samuti nagu barogrammi ordinaatide ümbertöötaminegi võrrandiga:

$$r = cr' + ft + n \quad . \quad . \quad . \quad (110),$$

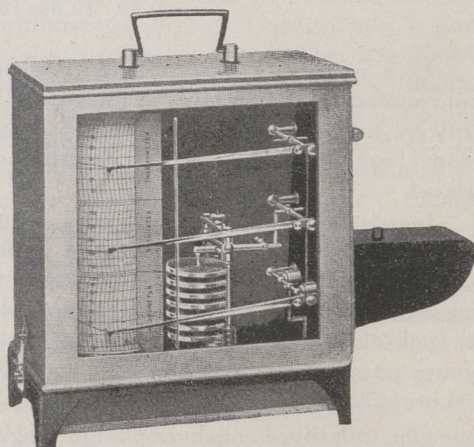
kus *r* on tõeline relatiivne niiskus, *r'* — hügrograafilt loetud niiskus ja *t* — hügrograafi temperatuur *r'* määramisel. Maastaabikoefitsiendi *c*, temperatuurilise koefitsiendi *f* ja vabaliikme *n* määramine toimub kontrollvaatluste andmeil vähimruutude meetodiga. Kontrollmõõteriistaks võib tarvitada normaalpsühromeetrit.

Kuna õhu niiskus ja temperatuur paljudes arvutlustes esinevad koos, siis tarvitatakse sagedasti aparate, mis samaaegselt registreerivad lindile nii õhu relatiivse niiskuse kui ka õhu temperatuuri. Neid aparate nimetatakse termohügrograafideks. Ühe säärase aparadi üldvaade on antud joonisel 52 (firma R. Fuess).

Peale termohügrograafi tarvitatakse veel nn. meteorograafe (joon. 53). Sellesse mõõteriista on koondatud baro-, termo- ja hügrograaf. Seega märgib meteorograaf oma keerlevale trumlile kinnitatud lindile üheaegselt kõik kolm meteoroloogilist elementi: õhkkonna rõhumise, õhu temperatuuri ja õhu relatiivse niiskuse.



Joon. 52.



Joon. 53.

Õhu niiskuse jaotus õhkkonnas ja selle niiskuse mõju õhu erikaalule.

Veeauru hulk õhus kui ka auru rõhumine vabas õhkkonnas muutub vastavalt temperatuurile, kusjuures ta kohastub järgmiselt: suurte veekogude kohal õhu absoluutne niiskus kasvab õhu temperatuuri tõusuga ja vastupidi. Kontinentide kohal on olukord sama talvel. Suvel soojal ajal on absoluutsel niiskusel kontinentidel kaks maksimumi: üks kella 8—9 vahel ja teine kella 20—22 vahel. Miinimumid on harilikult varahommikul ja kella 15—16 vahel.

Üldiselt kanduvad veeaurud mööda õhkkonda laiali difusiooni ja õhuvoolude mõjul, kusjuures õhu absoluutne niiskus väheneb vastavalt sellele, kuidas suureneb kaugus ekvaatorilt, kaugus suurtest veekogudest ja kõrgus merepinnalt.

Õhus leiduva veeauru hulk ja rõhumine väheneb kõrguse tõusul kiiremini, kui see toimuks sel puhul, kui veeauru vaatleksime nagu õhu koosseisu kuuluvat gaasi. See nähtus on peamiselt tingitud kõrguse tõusul esinevast temperatuuri langusest. Vabas õhkkonnas väheneb veeauru rõhumine kõrguse tõusul kiiremini kui mägismaal, sest mäed rikastavad õhkkonda veeaurudega. Näiteks vabas õhkkonnas 1500 m kõrgusel on veeauru rõhumine keskmiselt 2 korda väiksem kui maapinnalähedases õhukihis ja 3000 m kõrgusel 4 korda väiksem. Mägismaal on aga veeauru rõhumine 2 korda väiksem 2000 m kõrgusel ja 4 korda väiksem 4000 m kõrgusel.

Mägismaa jaoks annab Hann kõrguse muutumisel esineva veeaurude rõhumise käigu alljärgneva empiirilise valemiga:

$$e_z = e_0 10^{-\frac{z}{6300}} \quad (111).$$

Vabas õhkkonnas avaldub kõrguse muutumisel veeaurude rõhumise muutus Hergesell'i uuemate uurimuste järgi valemiga:

$$e_z = e_0 10^{-\frac{z}{8}\left(1 + \frac{z}{6}\right)} \quad (112).$$

Valemites (111) ja (112) on e veeaurude rõhumine mm Hg merepinna kõrgusel, z — kõrgus merepinnalt, mis valemis (111) tuleb võtta meetrites ja valemis (112) kilomeetrites, ja e_z — veeaurude rõhumine kõrgusel z .

Arvutluste lihtsustamiseks on tabelis 22 antud arvu 10 astmed võrrandite (111) ja (112) jaoks 0 kuni 10000 meetrini. Tabelis mittedisalduvate kõrguste jaoks võib 10 astmed leida lineaarse interpoleerimisega.

Tabel 22.

z m	$10^{-\frac{z}{6300}}$	$10^{-\frac{z}{8}\left(1 + \frac{z}{6}\right)}$	z m	$10^{-\frac{z}{6300}}$	$10^{-\frac{z}{8}\left(1 + \frac{z}{6}\right)}$
500	0,8330	0,8556	5500	0,1340	0,0481
1000	0,6955	0,7148	6000	0,1116	0,0316
1500	0,5780	0,5829	6500	0,0930	0,0203
2000	0,4814	0,4642	7000	0,0774	0,0127
2500	0,4010	0,3608	7500	0,0645	0,0078
3000	0,3340	0,2738	8000	0,0537	0,0046
3500	0,2783	0,2029	8500	0,0447	0,0027
4000	0,2318	0,1468	9000	0,0373	0,0015
4500	0,1931	0,1037	9500	0,0310	0,0009
5000	0,1608	0,0715	10000	0,0259	0,0005

Leida võrrandi (111) ja (112) järgi tabeli 22 alusel veeaurude rõhumine 4000 m kõrgusel, kui nullkõrgusel veeaurude rõhumine on 10,5 mm Hg.

Tabelist 22 leiame, et 4000 m puhul vastav arvu 10 aste võrrandi (111) jaoks on 0,2318 ja võrrandi (112) jaoks 0,1468, seega veeaurude rõhumine 4000 m kõrgusel võrrandi (111) järgi on:

$$e_z = 10,5 \cdot 0,2318 = 2,4 \text{ mm Hg,}$$

ja võrrandi (112) järgi:

$$e_z = 10,5 \cdot 0,1468 = 1,5 \text{ mm Hg.}$$

Võrrandid (111) ja (112) ei anna küll igasuguse olukorra jaoks täpseid resultaate, kuid võimaldavad siiski küllaldast hinnangut õhkkonna hügro-meetrilisest seisukorrast.

Alljärgnevas tabelis 23 on antud õhus leiduva veeauru rõhumise muutuvus olenevalt kõrgusest vastavalt Euroopa meteoroloogiliste jaamade andmeile.

T a b e l 23.

Kõrgus merepin- nalt m	S u v e l				T a l v e l			
	Temper. $t^{\circ} \text{C}$	Barom. rõhum. b	Veeauru- de rõhum. e mm Hg	Suhe $\frac{e}{b}$	Temper. $t^{\circ} \text{C}$	Barom. rõhumine b	Veeauru- de rõhum. e mm Hg	Suhe $\frac{e}{b}$
0	+14,7	762,6	10,46	0,0137	+1,7	763,4	4,69	0,00614
1000	+11,8	677,2	7,81	0,0115	+0,6	674,1	3,56	0,00528
2000	+6,2	600,3	4,97	0,0083	-4,1	594,4	2,27	0,00382
3000	+1,0	530,8	3,12	0,0059	-9,1	523,0	1,30	0,00249
4000	-4,2	468,2	1,87	0,0040	-15,3	458,9	0,72	0,00157
5000	-9,9	411,9	1,06	0,0026	-22,2	401,3		
6000	-16,2	361,3	0,57	0,0016	-27,3	349,6		
7000	-24,2	315,8			-36,6	303,3		

Õhkkonnas esinevate rõhumiste puhul võime oletada, et küllastamata veeaur teatava täpsusega allub samuti nagu õhkki Clapeyron'i võrrandile (91), kusjuures see alluvus on seda täpsem, mida kaugemal auru seisukord on oma küllastuspiirist. Seega on küllastamata veeauru erikaalu arvutluse võrrandi kuju samane õhu erikaalu arvutluse võrrandiga, kuid võrrandis esinev arvkoefitsient on erinev, sest küllastamata veeauru gaasikonstant on $R_a = 47,058$, kuna kuiva õhu konstant on $R_0 = 29,2708$.

Tähistades küllastamata veeauru erikaalu, rõhumisel p' kg/m², temperatuuril T ja 45° geograafilisel laiusel, tähega γ_a ja kuiva õhu erikaalu samadel tingimustel tähega γ_0 , võime võrrandi (91) põhjal kirjutada avaldised erikaalude γ_a ja γ_0 jaoks kujul:

$$\gamma_a = \frac{p'}{R_a \cdot T^1}); \quad \gamma_0 = \frac{p'}{R_0 \cdot T}.$$

Loomulik, et sel puhul rõhumine p' kg/m² võib muutuda ainult allpool temperatuurile T vastavat küllastatud veeaurude rõhumist.

Jagades esimese avaldise teisega ja oletades, et rõhumised ning temperatuurid on võrdsed, saame:

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_0} = \frac{R_0 T p'}{R_a T p'} = \frac{R_0}{R_a}.$$

Asendame R_0 ja R_a nende arvsuurustega, siis saame:

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_0} = \frac{R_0}{R_a} = \frac{29,2708}{47,058} = 0,622 \dots \dots \dots (116),$$

millest järeldame, et võrdse temperatuuri ja rõhumise puhul küllastamata veeaur on 0,622 korda õhust raskem või $\frac{1}{0,622} = 1,6$ korda kergem. Leiame nüüd

eeltoodu põhjal niiske õhu erikaalu matemaatilise avaldise. Kui oletame, et absoluutse temperatuuri T puhul õhkkonna rõhumine on p kg/m², kusjuures õhus sisalduva veeauru rõhumine on p' kg/m², siis üks kantmeeter säärast niisket õhku koosneb ühest kantmeetrist kuivast õhust, mille absoluutne temperatuur on T ja rõhumine $p - p'$ kg/m², ning ühest kantmeetrist küllastamata veeaurust, mil on sama absoluutne temperatuur T , kuid mille rõhumine on p' kg/m². Ühe kantmeetri kuiva õhu raskus eelantud tingimustel on võrrandi (100) järgi:

$$\gamma_0 = \frac{p - p'}{R_0 T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z).$$

1) Kui võrrandis $\gamma_a = \frac{p'}{R_a T}$ rõhumise p' asendame võrrandi (80) põhjal küllastamatu veeauru rõhumisega mm Hg, s. o. $p' = 13,5951e$, ja võtame $R_a = 47,058$, saame, peale tehteid arvsuurustega, arvutusvõrrandi küllastamata veeauru erikaalu jaoks:

$$\gamma_a = 0,2889 \frac{e}{T} \dots \dots \dots (113),$$

kus e on küllastamata veeauru rõhumine mm Hg ja T — absoluutne temperatuur. Korrutades võrrandi (113) parempoolt 1000-ga, saame arvutusvõrrandi absoluutse niiskuse q arvutamiseks:

$$q = 288,9 \frac{e}{T} \dots \dots \dots (114),$$

kus q on ühes kantmeetris absoluutse temperatuuri T puhul leiduva küllastamata veeauru raskus grammides ja e — selle auru rõhumine mm Hg.

Võrrandist (114) järeldub, et ühe ja sama temperatuuri puhul absoluutsed niiskused q_1 ja q_2 suhtuvad üksteisesse nagu nende absoluutsetele niiskustele vastavad rõhumised e_1 ja e_2 , s. o.

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{e_1}{e_2} \dots \dots \dots (115).$$

Näide 21.

Leida absoluutne niiskus q , kui temperatuur on $+25^\circ \text{C}$ ja $e = 23,8$ mm Hg.

Võrrandiga (114) leiame:

$$q = 288,9 \frac{23,8}{273 + 25} = 23,1 \text{ grammi.}$$

Rõhumisele p' ja temperatuurile T vastava küllastamata auru ühe kantmeetri raskuse leidmiseks võime tarvitada sama võrrandit (100), kuid peame võrrandis esineva õhu konstandi R_0 asendama veeauru konstandiga R_a :

$$\gamma_a = \frac{p'}{R_a T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z).$$

Järelikult ühe kantmeetri niiske õhu raskus, s. o. niiske õhu erikaal, on:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_a = \frac{p - p'}{R_0 T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z) + \frac{p'}{R_a T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z).$$

Võttes avaldise $\frac{p}{R_0 T} (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z)$ sulgude ette, saame:

$$\gamma = \frac{p}{R_0 T} \left(1 - \frac{p'}{p} + \frac{R_0 p'}{R_a p} \right) (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z).$$

Asendame õhu ja auru konstantide suhte $\frac{R_0}{R_a}$ tema arväärtusega 0,622 (vt. võrrandit 116) ja samuti asendame rõhumised p' ja p , mis on antud kg/m^2 , võrrandi (85) põhjal nendele vastavate rõhumistega e mm Hg ja b mm Hg, siis saame niiske õhu erikaalu arvutluse võrrandi lõplikul kujul:

$$\gamma = \frac{p}{R_0 T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z) \quad . \quad . \quad (117),$$

kus e on õhus leiduvate veeaurude rõhumine mm Hg ja b — antud niiske õhu baromeetiline rõhumine mm Hg. Muudel tähtedel on samad tähendused nagu võrrandis (100). Avaldist $\frac{e}{b}$ nimetame edaspidi õhu niiskuse ja rõhumise suhteks.

Kui arvame kõrgusbinoomi võrdseks ühega, siis võrrand (117) meie geograafilise laiuse jaoks (vt. võrrandit 101) omab kuju:

$$\gamma = 0,4650 \frac{b}{T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (118).$$

Näide 22.

Leida veeauru rõhumine 2500 m kõrgusel merepinnalt, kui merepinna kõrgusel temperatuur on $+25^\circ \text{C}$ ja hügromeeter näitab 78% niiskust.

Tabelist 35 leiame, et $+25^\circ \text{C}$ temperatuuril täisniiskuse puhul veeaurude rõhumine on $e_0 = 23,8$ mm Hg. Järelikult on õhus leiduvate veeaurude rõhumine (vt. võrrandit 109) $e = r \cdot e_0 = 0,78 \cdot 23,8 = 18,56$ mm Hg. Aurude rõhumise arvutlemiseks kõrgusel 2500 m tarvitame võrrandit (112), s. o.

$$e_z = 18,56 \cdot 10^{-\frac{2,5}{8} \left(1 + \frac{2,5}{6} \right)} = 18,56 \cdot 10^{-0,4427}.$$

Leiame nüüd e_z logaritmi:

$$\log e_z = \log 18,56 - 0,4427 \log 10.$$

Logaritmide tabelist leiame, et $\log 18,56 = 1,2687$. Arvesse võttes, et $\log 10 = 1$, saame:

$$\log e_z = 1,2687 - 0,4427 = 0,8260.$$

Logaritmide tabelist leiame, et logaritmile 0,826 vastab arv 6,698. Seega kõrgusel 2500 m on veeauru rõhumine $e_z \approx 6,70$ mm Hg.

Sama tulemuse võime saada tabeli 22 kasutamise teel. Arvu 10 aste tabeli (22) järgi on 0,3608, seega $e_z = 18,56 \cdot 0,3608 = 6,7$ mm Hg.

Näide 23.

Leida meie geograafilisel laiusel niiske õhu erikaal, kui õhu baromeetiline rõhuline on $b = 760$ mm, temperatuur $+15^\circ \text{C}$ ja aurude rõhumine $e = 8$ mm Hg.

Arvutlemiseks tuleb tarvitada võrrandit (118), mille järgi leiame:

$$\gamma = 0,465 \frac{760}{288} \left(1 - 0,378 \cdot \frac{8}{760} \right) = 1,222 \text{ kg/m}^3.$$

Kui õhk on kuiv, siis võrrandi (101) järgi leiame, et õhu erikaal on:

$$\gamma = 0,465 \frac{760}{288} = 1,227 \text{ kg/m}^3,$$

s. o. üks kantmeeter kuiva õhku oleks eelantud tingimustel ($1,227 - 1,222 = 0,005$) 5 grammi raskem.

Õhu tihedus.

Õhu tiheduseks nimetatakse ühe kantmeetri õhu massi, mis võrdub õhu erikaaluga, jagatud vabalangemise kiirendusega, vastavalt koha geograafilise laiusle ja kõrgusele. Antud definitsioonist järeldame, et õhu tiheduse mõõtühikuks on $\text{kg} \cdot \text{sek}^2/\text{m}^4$ ehk $\text{kg} \cdot \text{sek}^2 \cdot \text{m}^{-4}$, sest õhu erikaalu mõõtühikuks on, nagu teame, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ja kiirenduse mõõtühikuks on $\text{m} \cdot \text{sek}^{-2}$, seega $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} : \text{m} \cdot \text{sek}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{sek}^2 \cdot \text{m}^{-4}$.

Õhu tiheduse tähistame edaspidi tähega ρ ja vabalangemise kiirenduse tähega g . Seega on õhu tiheduse matemaatiline avaldis:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \dots \dots \dots (119).$$

Matemaatilise vahekorra õhu tiheduse, temperatuuri, rõhumise ja niiskuse vahel annab võrrand (100), kui tema jagame antud kohas teotseva vabalangemise kiirenduse avaldisega, mis on antud võrrandiga (57). Selle võrrandi põhjal avaldub vabalangemise kiirendus antud kohas kujul:

$$g = g_0 (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z) \dots \dots (120).$$

Jagades võrrandi (117) võrrandiga (120), saame:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{R_0 T \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z)}{g_0 (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314 z)}$$

Koondades võrrandi ühistegurid, saame õhu tiheduse arvutluse võrrandi lõplikul kujul:

$$\rho = \frac{P}{R_0 g_0 T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) \dots \dots \dots (121).$$

Avaldades võrrandis (121) õhu rõhumise p kg/m^2 võrrandi (80) kaudu õhu baromeetrilise rõhumisega b ja asendades õhukonstandi ja vabalangemise kiirenduse nende arvsuurustega vastavalt 45° geograafilisele laiusle,

Tabel 24.

Kõrg. km	Baromeetr. rõhu- mine <i>b</i> mm Hg	Õhu erikaal $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Õhu tihedus $\frac{\text{kg} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}^4}$
0	760,000	1,30	0,13184
1	675	1,15	0,11725
2	598	1,00	0,10438
3	528	0,90	0,09173
4	466	0,80	0,08164
5	410	0,70	0,07147
6	360	0,62	0,06332
8	277	0,48	0,04905
10	210	0,375	0,03836
15	89,66	0,215	0,02202
20	40,99	0,105	0,01077
25		0,055	0,005645
30	8,63	0,0283	0,002912
35		0,01464	0,001509
40	1,84	0,00740	0,0007638
45		0,00376	0,0003887
50	0,40	0,00187	0,0001936
55		0,000915	0,00009489
60	0,0940	0,000448	0,00004653
65		0,000217	0,00002257
70	0,0274	0,0001025	0,00001068
75		0,0000497	0,000005222
80	0,0123	0,0000230	0,000002404
85		0,0000106	0,000001110
90	0,0081	0,0000049	$0,5137 \times 10^{-6}$
95		0,0000022	$0,2310 \times 10^{-6}$
100	0,0067	$0,98 \times 10^{-6}$	$0,1031 \times 10^{-6}$
105		$0,423 \times 10^{-6}$	$0,04455 \times 10^{-6}$
110	0,0059	$0,185 \times 10^{-6}$	$0,01951 \times 10^{-6}$
150		$0,00013 \times 10^{-6}$	$0,0000139 \times 10^{-6}$
200	0,0001	$0,00023 \times 10^{-12}$	$0,0000249 \times 10^{-12}$
400	0,0000	0,00000 . . .	0,00000 . . .

s. o. $R_0 = 29,2708$ ja $g_0 = 9,80665$ (vt. lk. 64 ja 92), saame võrrandi (121) peale tehteid arvsuurustega kujul:

$$\rho = 0,04736 \frac{b}{T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) \dots \dots \dots (122),$$

kus b on õhu korrigeeritud baromeetriline rõhumine, T — õhu absoluutne temperatuur ja e — õhus leiduva veeauru rõhumine mm Hg.

Kuiva õhu tiheduse arvutamiseks tuleb võrrandis (122) veeauru rõhumine arvata võrdseks nulliga, s. o. $e = 0$. Sellega võrrand saab kuju:

$$\rho = 0,04736 \frac{b}{T} \dots \dots \dots (123).$$

Eeltoodud õhu tiheduse arvutluse võrranditest järeldub, et õhu tihedus oleneb õhu temperatuurist, niiskusest ja rõhumisest, kuid ei olene raskustungi muutusest vastavalt koha geograafilisele laiuslele ja kõrgusele merepinnalt, nagu see esineb õhu erikaalu juures jne.

Õhu tiheduse olenevus õhu temperatuurist ja rõhumisest on, nagu järeldame eeltoodud võrranditest, sarnane õhu erikaalu olenevusega — kõrguse suurenemisel õhu tihedus väheneb vastavalt õhkkonna rõhumise ja temperatuuri muutusele. Ülevaate võimaldamiseks on tabelis 24 antud kõrguse muutumisel esinev õhu rõhumise, erikaalu ja tiheduse muutus. Tabeli koostamisel on temperatuur merepinna kõrgusel võetud võrdseks 0°C .

Näide 24.

Leida õhu tihedus, kui baromeetriline rõhumine on $b = 760$ mm, temperatuur $t = +25^\circ \text{C}$ ja veeauru rõhumine õhus $e = 21$ mm Hg.

Võrrandi (122) järgi leiame:

$$\rho = 0,04736 \frac{760}{298} \left(1 - 0,378 \frac{21}{760} \right) = 0,1195.$$

Kui arvame õhu niiskuse võrdseks nulliga, siis sama rõhumise ja temperatuuri puhul õhu tihedus oleks:

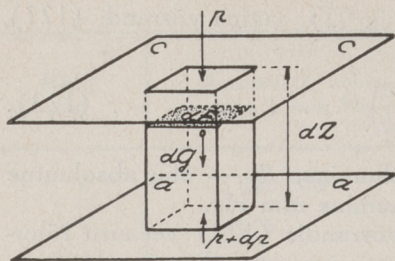
$$\rho = 0,04736 \frac{760}{298} = 0,1208.$$

Toodud näitest selgub, et antud juhul õhu niiskuse mõjutab õhu tihedust $\approx 1,1\%$ võrra. Seepärast praktilistel arvutlustel sagedasti ei arvestata õhu tiheduse määramisel õhu niiskust, sest tavaliselt on e väiksem kui 21 mm Hg.

Korrapäraseid õhkkonnad.

Korrapäraseks nimetatakse õhkkonda, kus õhu tihedus, rõhumine ja temperatuur muutuvad vastavalt kõrgusele teatava kindla matemaatilise korrapärasusega.

Vahekorra tuletamiseks, mis seob korrapärase õhkkonnas kõrgust, rõhumist, õhu tihedust, erimahtu jne., vaatleme kaht üksteisele lõpmata lähedal asuvat horisontaalset tasapinda aa ja cc (vt. joonist 54), millede kau-



Joon. 54.

dub risttahuka mahu $dF \cdot dz$ ja sellel kõrgusel oleva õhu erikaalu γ korrutisega, s. o. $dG = dF \cdot dz \cdot \gamma$.

Vaatleme selle elementaar-risttahuka tasakaalutingimusi. Risttahuka külgtahkudele mõjuvad õhkkonna rõhumised on iga kahe vastastahu suhtes võrdsed ja tasakaalustuvad selle tõttu vastastikku, kuna risttahuka ülemisele ja alumisele tahupinnale mõjuvad rõhumised omavahel ei tasakaalustu. Eelkirjeldatud risttahuka tasakaal püsib, kui tahuka aluste pindadele mõjuvate õhkkonna rõhumiste ja tahuka oma raskuse algebraline summa võrdub nulliga, sest peale mainitud jõudude mingisuguseid muid jõude risttahukale ei mõju. Tahuka ülemisele pinnale mõjub ülevalt allapoole tasapinna cc kõrgusel teotsev õhkkonna rõhumine, mille suurus on $p dF$, kuna risttahuka alumisele pinnale mõjub alt ülespoole õhkkonna rõhumine, mille suurus on $(p + dp) dF$. Seega on risttahukale vertikaalsuunas mõjuva õhkkonna rõhumise resultantrõhk $(p + dp) dF - p \cdot dF = dp \cdot dF$. Järelikult avaldub risttahuka tasakaalutingimus vahekorras

$$dF dp + dG = 0.$$

Asendame saadud võrrandis risttahuka raskuse dG tema väärtusega $dG = dF dz \gamma$ ja koondame selle võrrandi ühisteguriga dF , siis saame:

$$dp = -\gamma dz \quad \dots \dots \dots (124).$$

Jagame võrrandi mõlemad liikmed õhu erikaaluga γ ja silmas pidades, et $\frac{1}{\gamma} = v$ (võrrand 88), saame diferentsiaalvõrrandi, mis seob õhu erimahtu, õhkkonna rõhumist ja kõrgust:

$$dz = -v dp \quad \dots \dots \dots (125),$$

kusjuures kõrguse positiivseks suunaks arvame alati suunda merepinnalt ülespoole. Märk miinus võrrandi parempoole ees näitab, et dp on negatiivne, sest, nagu teame, kõrguse suurenemisel õhkkonna rõhumine väheneb.

Urimused näitavad, et tegelikult õhkkonnas õhu rõhumine ja temperatuur ei muutu alati teatava kindla korrapärasusega, vaid esineb kõrvalekaldu-misi. Aerotehnikas lähtutakse igasuguste õhkkonnasse puutuvate küsimuste lahendamiseks korrapärastest õhkkondadest, mis nõutavas ulatuses võimalikult täpselt asendavad antud küsimuste lahendamisel tõelist õhkkonda ja mis tegelikus elus võetakse teatavate küsimuste ja nähtuste omavaheliseks võrdlevaks aluseks. Neid korrapäraseid õhkkondi tunneme järgmiste nimetuste

all: homogeenne õhkkond, isothermiline õhkkond ja polütroopne õhkkond. Nende õhkkondade kõiki muutujaid p , v , T ja z seob gaaside karakterlik võrrand (91) $pv=RT$ ja diferentsiaalvõrrand (124) $dp+\gamma dz=0$ või võrrand (125) $dz+vd p=0$, kusjuures ette on antud seos, mille järgi antud õhkkonna puhul ühes kõrgusega muutub temperatuur, õhu erimaht või õhu erikaal.

Homogeenne (ühtlane) õhkkond.

Homogeenseks nimetatakse õhkkonda, kus õhu erimaht ning seega ka õhu erikaal on kogu õhkkonna kõrguse ulatusel muutumatu. See olukord esineb siis, kui temperatuur muutub kõrgusega säärast, et sellest tingitult õhk tiheneb samavõrd, nagu ta hõleneb (paisub) kõrguse tõusul esineva rõhu vähenemise tagajärjel.

Gaaside karakterliku võrrandiga (91) avaldub see tingimus, kui lahendada võrrand v suhtes, järgmisel kujul:

$$v = \frac{RT}{p} = \text{konst.} \quad (126).$$

Homogeenses õhkkonnas esineva seose õhu rõhumise ja kõrguse vahel annab võrrand (125) $dz = -v dp$, kui võtame $v = \text{konst.} = v_0$ ning integreerime võrrandi vasakpoole nullkõrgusest kuni muutuva kõrguseni z ja võrrandi parempoole — õhkkonna rõhumisest nullkõrgusel p_0 kuni kõrgusel z oleva rõhumiseni p , s. o.

$$\int_0^z dz = -v_0 \int_{p_0}^p dp; \quad z = -v_0(p - p_0).$$

Arvesse võttes, et $p_0 > p$, muudame sulgude ees märgi, millega saame kõrguse ja õhkkonna rõhumise vahelise vahekorra kujul:

$$z = v_0(p_0 - p) \quad (127).$$

Lahendades võrrandi (127) p suhtes ja arvesse võttes, et $\gamma_0 = \frac{1}{v_0}$ (vt. võrrandit 88), saame võrrandi õhkkonna rõhumise arvutamiseks:

$$p = p_0 - \gamma_0 z \quad (127a).$$

Võrrandites (127) ja (127a) on z kõrgus meetrites, arvates nullkõrgusest, v_0 — õhu erimaht ja γ_0 — õhu erikaal nullkõrgusel, mis on konstant — kogu õhkkonna ulatusel, p_0 — õhkkonna rõhumine kg/m^2 kõrgusel $z=0$ ja p — õhkkonna rõhumine kg/m^2 kõrgusel z .

Määrame homogeense õhkkonna temperatuuri vertikaalse gradiendi:

$$\delta = \frac{dT}{dz}.$$

Diferentsides võrrandi (91) $pv_0 = RT$, saame

$$v_0 dp = R dz \quad (a).$$

Isotermiline õhkkond.

Isotermiliseks nimetatakse õhkkonda, mille temperatuur on kogu õhkkonna kõrguse ulatusel muutumatu, s. o. $T = \text{konst}$. Säärase õhkkonna puhul avaldub gaaside karakterlik võrrand (91) kujul:

$$pv = RT = \text{konst.} \quad (130).$$

See tähendab, et õhu erimaht ja õhkkonna rõhumine muutuvad vastavalt kõrgusele sääraselt, et nende korrutis on igasugusel kõrgusel konstantne suurus. Näiteks, kui võtame isotermilise õhkkonna, mille temperatuur on 0°C , s. o. $T = 273$, ja õhukonstant $R = 29,2708$, siis selle isotermilise õhkkonna konstandiks on arv $RT = 29,2708 \cdot 273 = 7991$ (homogeense õhkkonna kõrgus).

Aluseks võttes võrrandeid (128) ja (129) järeldame, et isotermilise õhkkonna konstandiks on säärase homogeense õhkkonna kõrgus, mille temperatuur merepinna kõrgusel (T_0) ja õhukonstant (R) ühtivad antud isotermilise õhkkonna omadega.

Tõelises õhkkonnas moodustab isotermilist õhkkonda stratosfäär, kus, nagu varemalt mainitud, temperatuur kõrgusega peagu ei muutu. See õhkkond algab keskmiselt 11000-meetrilisel kõrgusel.

Isotermilises õhkkonnas esineva vahekorra rõhumise ja kõrguse vahel leiame võrrandiga (124), lahendades võrrandi dz suhtes:

$$dz = -\frac{dp}{\gamma} \quad (131).$$

Võrrandi (117) järgi on õhu erikaalu avaldis:

$$\gamma = \frac{p}{R_0 T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) (1 - 0,00265 \cos 2\varphi) (1 - 0,000000314z).$$

Asendades diferentsiaalvõrrandis (131) γ tema avaldisega võrrandist (117) ja eraldades muutujad, saame:

$$(1 - 0,000000314z) dz = -R_0 T \frac{1}{\left(1 - 0,378 \frac{e}{b} \right) (1 - 0,00265 \cos 2\varphi)} \cdot \frac{dp}{p}.$$

Integreerime võrrandi vasakpoolt kõrguselt z_0 (vaatluskoha algkõrgus) kuni z_1 , kusjuures z_0 ja z_1 on arvatud merepinnalt, ja võrrandi parempoolt kõrgusele z_0 vastavast õhkkonna rõhumisest p_0 kuni kõrgusel z_1 oleva rõhumiseni p_1 .

Integraal võrrandi vasakpoolelt on:

$$\begin{aligned} \int_{z_0}^{z_1} (1 - 0,000000314z) dz &= \int_{z_0}^{z_1} dz - 0,000000314 \int_{z_0}^{z_1} z dz = \\ &= (z_1 - z_0) - 0,000000314 \left(\frac{z_1^2 - z_0^2}{2} \right) = \\ &= (z_1 - z_0) \left(1 - 0,000000314 \frac{z_1 + z_0}{2} \right) \end{aligned}$$

Arvesse võttes, et z_0 on algkõrgus (tavaliselt maapind) ja z_1 — otsitav kõrgus arvates merepinnalt, siis nende vahe ($z_1 - z_0$) on vaatluskõrgus arvates maapinnalt. Märkides selle kõrguse tähega z ja avaldise $\frac{z_1 + z_0}{2}$, mis on maa-

pinna ja vaatluskõrguse poolkõrguste summa, tähega z_k , võime diferentsiaalvõrrandi vasakpoole integraali avaldada kujul:

$$\int_{z_0}^{z_1} (1 - 0,000000314z) dz = z(1 - 0,000000314z_k).$$

Asendades niiskuse ja õhkkonna rõhumise suhte $\frac{e}{b}$ kõrgusvahes ($z_1 - z_0$)

tema keskmise väärtusega E ja oletades, et koha geograafiline laiuskraad jääb muutumatuks, võime diferentsiaalvõrrandi parempoole integraali avaldada kujul:

$$\begin{aligned} & -R_0T \frac{1}{(1-0,378E)(1-0,00265 \cos 2\varphi)} \int_{p_0}^{p_1} \frac{dp}{p} = \\ & = R_0T \frac{1}{(1-0,378E)(1-0,00265 \cos 2\varphi)} \ln \frac{p_0}{p_1}. \end{aligned}$$

Järelikult võime kirjutada vahekorra:

$$z(1 - 0,000\,000\,314\,z_k) = R_0T \frac{1}{(1-0,378E)(1-0,00265 \cos 2\varphi)} \ln \frac{p_0}{p_1}$$

Lahendades saadud võrrandi z suhtes ja korrutades ning jagades võrrandi parempoolt avaldisega

$(1+0,378E)(1+0,00265 \cos 2\varphi)(1+0,000\,000\,314\,z_k)$,
saame võrrandi kujul:

$$z = R_0T \frac{(1+0,378E)(1+0,00265 \cos 2\varphi)(1+0,000000314z_k)}{[1-(0,378E)^2][1-(0,00265 \cos 2\varphi)^2][1-(0,000000314z_k)^2]} \ln \frac{p_0}{p_1}.$$

Võrrandi murru nimetaja on väga lähedal ühele, kuna väikesed arvud igas sulgavaldises on võetud veel teise astmesse, ja selle tõttu arvamegi teda võrdseks ühega. Asendades veel võrrandis esineva õhkkonna rõhumiste suhte, mis on antud kg/m^2 , temale vastava baromeetriliste rõhumiste suhtega $\frac{B}{b}$ (vt. võrrandit 85), saame kõrguse arvutluse võrrandi kujul:

$$z = R_0T(1+0,378E)(1+0,00265 \cos 2\varphi)(1+0,000000314z_k) \ln \frac{B}{b}. \dots (132)$$

Kui võrrandis (132) arvame raskustungi muutuse ja õhu niiskuse mõju võrdseks nulliga, siis mitte väga suurte kõrguste puhul ($z_k=0$) on võrrandi kolm binoomi võrdsed ühega ja võrrand omandab alljärgneva lihtsa kuju:

$$z = R_0T \ln \frac{B}{b} \dots \dots \dots (133).$$

Lahendades võrrandi (133) baromeetriliste rõhumiste logaritmi suhtes, saame:

$$\ln \frac{B}{b} = \frac{z}{R_0T},$$

kust potentseerimisega leiame, et

$$\frac{B}{b} = e^{\frac{z}{R_0 T}} \text{ või } \frac{b}{B} = e^{-\frac{z}{R_0 T}} \dots \dots \dots (134).$$

Võrrandis (134) on z kõrgus meetrites maapinnalt kuni vaatluskohani, R_0 — õhukonstant vastavalt 45° geograafilisele laiuslele, T — isotermilise õhkkonna temperatuur, e — naturaallogaritmide alus ($e=2,7182818285$), B — õhkkonna baromeetiline korrigeeritud rõhumine maapinnal ja b — õhkkonna baromeetiline korrigeeritud rõhumine kõrgusel z arvates maapinnalt.

Tõelises õhkkonnas tarvitatakse kõrguste arvutlemiseks, olenevalt nõutavast täpsusest, kas võrrandit (132) või (133). Selleks tõelist õhkkonda kuni arvutluskõrguseni z vaadeldakse isotermilise õhkkonnana, mille temperatuur T on võrdne kõrguseni z ulatava õhusamba keskmise temperatuuriga T_k ja suhe $E = \frac{e}{b}$ võrdne sama õhusamba suuruste e ja b keskmise suhtega.

Nimetatud võrrandeid arvutlusteks sel kujul, nagu nad on antud, ei tarvitata, vaid selleks asendame õhukonstandi tema väärtusega $R_0=29,2708$ ja õhusamba keskmise absoluutse temperatuuri — avaldisega

$$T_k = 273 + t_k = 273 \left(1 + \frac{t_k}{273} \right) = 273 (1 + 0,003663 t_k),^1)$$

ning selleks, et võimaldada logaritmimist kümnendlogaritmidega, korrutame võrrandi (132) parempoolt $\ln 10 = 2,3025851$. Tehes võrrandis need asendused, saame peale tehteid arvsuurustega kõrguste arvutluse võrrandi lõplikul kujul:

$$z = 18400 (1 + 0,003663 t_k) (1 + 0,378 E) (1 + 0,00265 \cos 2\varphi) (1 + 0,000000314 z_k) \log \frac{B}{b} \dots \dots \dots (135),$$

kus z on otsitav kõrgus meetrites arvates maapinnalt, t_k — maapinnalt kuni kõrguseni z ulatava õhusamba keskmine temperatuur, mille leiame, olenevalt nõutavast täpsusest, võrrandite (44), (46), (48), (51), (53) või (54) alusel. E on kõrguseni z ulatava õhusamba keskmine niiskuse ja õhurõhumise suhe, mille leiame võrrandiga:

$$E = \left(\frac{e_1}{B} + \frac{e_2}{b} \right) : 2 \dots \dots \dots (136),$$

kus e_1 on veeaurude rõhumine mm Hg maapinna kõrgusel ja e_2 — vaatluskõrgusel, ning B — õhkkonna korrigeeritud baromeetiline rõhumine mm Hg maapinna kõrgusel ja b — vaatluskõrgusel z . φ on vaatluskoha geograafiline laiuskraad. Juhul, kui võrrandiga (135) määratakse kahe üksteisest erinevatel geograafilistel laiuskraadidel asuvate punktide vahelist kõrgust, nagu see aset leiab baromeetrilise nivelleerimise puhul, siis tuleb võtta nende laiuskraadide keskmine laiuskraad, s. o.

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \dots \dots \dots (137).$$

¹⁾ Tihti binoom $(1 + 0,003663 t_k)$ võetakse võrdseks $(1 + 0,003665 t_k)$ (vt. võrrandit 5) ja niiskuse binoom $(1 + 0,378 E)$ asendatakse binoomiga $(1 + 0,377 E)$.

z_k on maapinna- ja vaatluskõrguse poolkõrguste summa arvates merepinnalt, mis avaldub võrrandiga

$$z_k = \frac{z_0 + z_1}{2} \quad (\text{vt. lk. 111}),$$

kus z_0 on maapinna- ja z_1 vaatluskõrgus meetrites arvates merepinnalt. Arvesse võttes, et $z_1 = z_0 + z$, võime z_k avaldada ka kujul:

$$z_k = z_0 + \frac{z}{2} \quad \dots \quad (138),$$

kus z on vaatluskõrgus arvates maapinnalt, mille esimesel lähenemisel leiame võrrandiga (135), jättes arvestamata kõrgusbinoomi mõju kõrgusele.

Võrrandit (135) nimetatakse hüpsomeetriliseks võrrandiks ja ta leiab kasutamist ka baromeetrilisel nivelleerimisel.

Jättes võrrandis (135) arvestamata kõrgus- ja niiskusbinoomi mõju ning võttes geograafilise laiuskraadi binoomi vastavalt meie laiuskraadile ($\varphi = 58^\circ 30'$) võrdseks 0,998797 (vt. näidet 25), saame kõrguse arvutluse võrrandi kujul:

$$z = 18378 (1 + 0,003\,663\,t_k) \log \frac{B}{b} \quad \dots \quad (139).$$

Kui jätame arvestamata niiskuse, geograafilise laiuskraadi ja kõrguse mõju, siis avaldub võrrand (135) kujul:

$$z = 18400 (1 + 0,003\,663\,t_k) \log \frac{B}{b} \quad \dots \quad (140).$$

Õhkkonna baromeetrilise rõhumise arvutlemiseks vastavalt antud kõrgusele võime tarvitada võrrandit (134), asendades T õhusamba keskmise temperatuuriga T_k , ja täpsete arvutluste puhul võrrandit (132), lahendades viimase samuti, nagu seda tegime võrrandiga (133), õhkkonna rõhumise suhtes ja asendades T õhusamba keskmise temperatuuriga, s. o.

$$\frac{b}{B} = e^{-\frac{z}{R_0 T_k (1 + 0,378E) (1 + 0,00265 \cos 2\varphi) (1 + 0,000000314 z_k)}} \quad \dots \quad (141),$$

kus $e = 2,71828$ (vt. lk. 113) ja R_0 — õhukonstant, mille võtsime võrdseks $R_0 = 29,2708$, T_k — maapinnalt kõrguseni z ulatava õhusamba keskmine absoluutne temperatuur. Teistel sümbolitel on samad tähendused nagu võrrandis (135). Võttes võrrandis (141) vastavalt meie geograafilisele laiusle geograafilise laiuskraadi binoomi võrdseks 0,998797, $T_k = 273 (1 + 0,003\,663\,t_k)$, $R_0 = 29,2708$ ja arvates kõrgusbinoomi võrdseks ühega, saame peale tehteid arvsuurustega:

$$\frac{B}{b} = e^{-\frac{z}{7981 (1 + 0,003\,663\,t_k) (1 + 0,378E)}} \quad \dots \quad (142).$$

Kõrguse arvutluse võrranditest nähtub, et isothermiline õhkkond ulatub matemaatiliselt lõpmata kõrgele, kusjuures ühel ja samal kõrgusel õhkkonna rõhumine on oleb õhkkonna temperatuurist, õhu niiskusest, õhkkonna rõhumisest maapinnal, raskustungi muutusest vastavalt koha geograafilisele laiuskraadile ja õhu koosseisust (muutub õhukonstant R). Õhu koosseisu muutumine algab arvatavasti 20 000 m kõrguselt.

Aerotehniliste arvutluste puhul, nagu kõrgusemõõtjate (altimeetrite) kontrollimisel jne., jäetakse kõrguste arvutlustes sageli arvestamata kõrguse tõusul esineva raskustungi muutuse ja õhu niiskuse mõju, kuna nende tegurite ärajätmisest tingitud veal altimeetri näitamistäpsuse suhtes praktilisest ei ole kuigi suurt tähtsust.

Õhu niiskuse ja kõrguse tõusul esineva raskustungi muutuse mõjust kõrguste arvutlustele hüpsomeetriliste võrrandite järgi annab kujutluse tabel 25, kus on antud õhu niiskuse binoomist $(1+0,378 E)$ ja kõrguse tõusul esineva raskustungi muutuse binoomist $(1+0,000\,000\,314 z_k)$ tingitud kõrguste muutumised õhkkonnas, mille temperatuur merepinnal on $+15^{\circ}\text{C}$, baromeetiline rõhumine 760 mm Hg, õhu absoluutne niiskus 10,42 mm Hg ja kõrguse tõusul esinev temperatuuri gradient $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Tabel 25.

Kõrgus z m	$\alpha =$ $(1+0,378 E)$	$\beta =$ $(1+0,000\,000\,314 z_k)$	$z' =$ $\alpha \cdot \beta \cdot z$	Binoomidest (α ja β) tingitud kõrguse muutuvus Δz		Baro- meetri- line rõhu- mine b mm Hg	Veeauru rõhu- mine e_z mm Hg
				m	%		
500	1,004 857 3	1,000 078 5	502,5	+ 2,5	+ 0,50	716,0	8,76
1 000	1,004 598 4	1,000 157 0	1 004,8	+ 4,8	+ 0,48	674,1	7,32
2 000	1,004 052 2	1,000 314 0	2 008,7	+ 8,7	+ 0,43	596,2	4,75
3 000	1,003 553 2	1,000 471 0	3 012,1	+ 12,1	+ 0,40	525,8	2,80
4 000	1,003 158 2	1,000 628 0	4 015,2	+ 15,2	+ 0,38	462,3	1,50
5 000	1,002 886 0	1,000 785 0	5 018,4	+ 18,4	+ 0,37	405,1	0,73
6 000	1,002 715 9	1,000 942 0	6 022,0	+ 22,0	+ 0,37	353,8	0,32
7 000	1,002 625 2	1,001 099 0	7 026,1	+ 26,1	+ 0,37	307,9	0,13
8 000	1,002 581 7	1,001 256 0	8 030,7	+ 30,7	+ 0,38	266,9	0,05
9 000	1,002 562 8	1,001 413 0	9 035,8	+ 35,8	+ 0,40	230,5	0,02
10 000	1,002 547 7	1,001 570 0	10 041,2	+ 41,2	+ 0,41	198,2	0,00

Tabelist nähtub, et binoomide $(1+0,378 E)$ ja $(1+0,000\,000\,314 z_k)$ summaarne mõju kõrguste arvutlustele eelantud juhul on maksimaalselt $+0,5\%$.

Näide 25.

Koha kõrgus merepinnalt on $z_0=44\text{ m}$, temperatuur maapinnal $t=+25^{\circ}\text{C}$, baromeetiline rõhumine $B=762\text{ mm}$ ja õhus leiduva veeauru rõhumine $e_1=22\text{ mm Hg}$. Otsitaval kõrgusel on baromeetiline rõhumine $b=232\text{ mm}$, temperatuur -31°C ja õhu niiskus võrdne nulliga ($e=0$).

Arvutada kõrgus z võrrandite (135), (139) ja (140) järgi, kui laiuskraad on $\varphi=58^{\circ}30'$.

Käesoleval juhul on tõelist õhkkonda asendava isothermilise õhkkonna temperatuur võrrandi (44) järgi:

$$t_k = \frac{25 + (-31)}{2} = -3^{\circ}\text{C}.$$

Seega temperatuuribinoomi väärtus on:

$$1 + 0,003663 \cdot (-3) = 0,989011.$$

Võrrandi (136) järgi on niiskuse keskmine suhe:

$$E = \left(\frac{e_1}{B} + \frac{e_2}{b} \right) : 2 = \frac{22}{762} : 2 = 0,0144$$

ja niiskusbinoomi arvuline suurus:

$$1 + 0,378 \cdot 0,0144 = 1,00544.$$

Laiuskraadi-binoomi arvutlemiseks leiame nurga $2\varphi = 117^\circ$ koosinuse väärtuse, s. o. $\cos 117^\circ = -\cos 63^\circ$. Logaritmid tabelist leiame, et $\log \cos 63^\circ = \bar{1},65705$, millele vastab arv 0,4540. Seega laiuskraadi-binoomi arvvaartus on:

$$(1 + 0,00265 \cos 2\varphi) = (1 - 0,00265 \cos 63^\circ) = (1 - 0,00265 \cdot 0,4540) = 1 - 0,001203 = 0,998797.$$

Arvutame nüüd baromeetriliste rõhumiste suhte logaritmi:

$$\log \frac{B}{b} = \log 762 - \log 232 = 0,5165.$$

Võrrandi (140) järgi leiame, et otsitav kõrgus on:

$$z = 18400 \cdot 0,989011 \cdot 0,5165 = 9399 \text{ m.}$$

Kõrgus 9399 m vastab 45° geograafilisele laiusele, kusjuures on jäetud arvesse võtmata kõrgus- ja niiskusbinoomide mõju.

Meie geograafilisel laiusel oleks samadel tingimustel kõrgus võrrandi (139) järgi:

$$z = 18378 \cdot 0,989011 \cdot 0,5165 = 9388 \text{ m.}$$

Seega antud juhul on geograafilise laiuse mõjust tingitud vahe 11 meetrit ($\approx 0,1\%$).

Kui arvesse võtame õhu niiskuse mõju ja jätame kõrgusbinoomi arvestamata, siis võrrandi (135) järgi saame meie laiuskraadil kõrguse:

$$z = 18400 \cdot 0,989011 \cdot 1,00544 \cdot 0,998797 \cdot 0,5165 = 9439 \text{ m.}$$

Järelikult niiskusbinoomi mõju antud juhul kõrguse arvutlemisel on:

$$9439 - 9388 = +51 \text{ m } (\approx 0,5\%).$$

Leiame nüüd kõrgusbinoomi mõju. Võrrandi (138) järgi:

$$z_k = z_0 + \frac{z}{2} = 44 + \frac{9439}{2} = 4763,5 \text{ m.}$$

Seega kõrgusbinoomi arvvaartus on:

$$1 + 0,000000314 \cdot 4763,5 = 1,0014957$$

ja kõrgus võrrandi (135) järgi:

$$z = 18400 \cdot 0,989011 \cdot 1,00544 \cdot 0,998797 \cdot 1,0014957 \cdot 0,5165 = 9453 \text{ m.}$$

Seega kõrgusbinoomist tingitud vahe on:

$$9453 - 9439 = +14 \text{ m } (\approx 0,1\%).$$

Geograafilise laiuse, kõrguse ja niiskuse binoomide mõju kokku on:

$$9453 - 9399 = 54 \text{ m } (\approx 0,5\%).$$

Kui õhusamba keskmise temperatuuri arvutus teha võrrandiga (51), siis saame:

$$T_k = 0,43429 \frac{298 - 242}{\log \frac{298}{242}} = 269^\circ,$$

või, arvates 0° C juurest, $t_k = -4^\circ \text{ C}$.

Vastavalt sellele temperatuurile on temperatuuribinoomi väärtus:

$$1 - 0,003663 \cdot 4 = 0,98535$$

ning seega on kõrgus võrrandi (135) järgi:

$$z = 18400 \cdot 0,98535 \cdot 1,00544 \cdot 0,998797 \cdot 1,0014957 \cdot 0,5165 = 9418 \text{ m.}$$

Järelikult keskmise temperatuuri muutus -1°C võrra mõjutab antud juhul kõrgust $9453 - 9418 = 35$ meetri võrra ($\approx 0,4\%$).

Näide 26.

Maakoha kõrgus merepinnalt on $z_0 = 44$ m, temperatuur maapinnal $+30^\circ\text{C}$, baromeetiline rõhumine $B = 760$ mm ja õhus leiduva veeauru rõhumine $e_1 = 25$ mm Hg. Otsitaval kõrgusel on temperatuur $+4^\circ\text{C}$, baromeetiline rõhumine $b = 470$ mm ja veeaurude rõhumine $e = 4$ mm Hg. Arvutada kõrgus z kõrgusvõrrandite järgi, kusjuures võrrandis (135) võtame laiuskraadi-binoomi väärtuse võrdseks 0,998797.

Antud juhul on tõelist õhkkonda asendava isotermilise õhkkonna temperatuur (võrrand 44):

$$t_k = \frac{30+4}{2} = +17^\circ\text{C}$$

ja temperatuuribinoomi arväärtus:

$$1 + 0,003663 \cdot 17 = 1,0623.$$

Niiskuse ja õhurõhumise keskmine suhe võrrandi (136) järgi on:

$$E = \left(\frac{25}{760} + \frac{4}{470} \right) : 2 = 0,0206$$

ja niiskusbinoomi arvsuurus:

$$1 + 0,378 \cdot 0,0206 = 1,0078.$$

Arvutame nüüd baromeetriliste rõhumiste suhte logaritmi:

$$\log \frac{B}{b} = \log 760 - \log 470 = 0,2087.$$

Võrrandi (140) järgi leiame, et otsitav kõrgus on:

$$z = 18400 \cdot 1,0623 \cdot 0,2087 = 4079 \text{ m.}$$

Kõrgus 4079 m vastab 45° geograafilisele laiuusele, kui kõrgus- ja niiskusbinoom on arvatud võrdseks ühega. Meie geograafilisel laiuskraadil samadel tingimustel oleks kõrgus võrrandi (139) järgi:

$$z = 18378 \cdot 1,0623 \cdot 0,2087 = 4074 \text{ m.}$$

Seega geograafilisest laiuusest tingitud vahe kõrgustes oleks $4079 - 4074 = 5$ m ($\approx 0,1\%$).

Arvesse võttes niiskuse mõju, kuid jättes välja kõrgusbinoomi, saame kõrguse võrrandi (135) järgi:

$$z = 18400 \cdot 1,0623 \cdot 1,0078 \cdot 0,998797 \cdot 0,2087 = 4106 \text{ m.}$$

Järelikult niiskusest tingitud kõrguse muutus on $4106 - 4074 = 32$ m ($\approx 0,8\%$).

Leiame nüüd kõrgusbinoomi mõju. Võrrandi (138) järgi:

$$z_k = z_0 + \frac{z}{2} = 44 + \frac{4106}{2} = 2097 \text{ m.}$$

Seega on kõrgusbinoomi arväärtus:

$$1 + 0,000000314 \cdot 2097 = 1,0006585,$$

ja kõrgus:

$$z = 4106 \cdot 1,0006585 = 4109 \text{ m.}$$

Järelikult on kõrgusbinoomist sõltuv kõrguse erinevus $4109 - 4106 = 3$ m ja kõrgusvahe, mis on tingitud kõrguse, niiskuse ja geograafilise laiuse binoomidest, $4109 - 4079 = 30$ m ($\approx 0,7\%$).

Näide 27.

Leida baromeetiline rõhumine kõrgusel 4106 m maapinnalt võrrandite (142) ja (134) järgi, kui baromeetiline rõhumine maapinnal on $B = 760$ mm, õhkkonna keskmine temperatuur kuni antud kõrguseni võrdub $t_k = +17^\circ \text{C}$ ja keskmine niiskuse suhe on $E = 0,0206$.

Arvutleme esiteks võrrandi (142) astmenäitaja:

$$\frac{4106}{7981(1+0,003663 \cdot 17)(1+0,378 \cdot 0,0206)} = \frac{4106}{8544} = 0,4806,$$

ja siis baromeetrilise rõhumise antud kõrgusel võrrandi (142) järgi:

$$b = B e^{-0,4806} = 760 e^{-0,4806}.$$

Logaritmides mõlemaid pooli saame:

$$\log b = \log 760 - 0,4806 \log e = 2,8808 - 0,4806 \cdot 0,43429 = 2,6721.$$

Logaritmile 2,6721 vastab arv 470,0. Seega õhkkonna baromeetiline rõhumine kõrgusel 4106 m on 470 mm, järelikult sama suurus nagu näites 26.

Arvutleme nüüd võrrandi (134) astmenäitaja:

$$\frac{4106}{29,27 \cdot 290} = 0,4837,$$

ja baromeetrilise rõhumise antud kõrgusel võrrandi (134) järgi:

$$b = B e^{-0,4837} = 760 e^{-0,4837}.$$

Logaritmide võrrandi mõlemaid pooli:

$$\log b = \log 760 - 0,4837 \log e = 2,8808 - 0,4837 \cdot 0,43429 = 2,6707.$$

Logaritmile 2,6707 vastab arv 468,5. Seega võrrandi (134) järgi saame kõrgusel 4106 m baromeetrilise rõhumise 468,5 mm, s. o. 1,5 mm võrra väiksema rõhumise kui täpse võrrandiga.

Toodud näiteist selgub, et kui arvutame kõrgust ja baromeetrist rõhumist meie geograafilisel laiusel võrrandite (140) ja (134) järgi, s. o. jätame arvesse võtmata õhu niiskuse ja raskustungi muutuse mõju, siis teeme sellega vea, mis praktilisest seisukohast on täiesti lubatav. Näidetest võime veel järeldada, et kõige rohkem mõjutab kõrguse määramise täpsust õhu niiskus ja eriti õhusamba keskmise temperatuuri määramisel tehtav viga.

Baromeetiline kõrgusaste.

Baromeetriliseks kõrgusastmeks nimetatakse kõrgusvahet, mille ulatusel õhkkonna rõhumine muutub elavhõbedasamba ühe millimeetri võrra. Baromeetiline kõrgusaste oleneb baromeetrisest rõhumisest ja õhu temperatuurist. Avaldise baromeetrilise kõrgusastme jaoks leiame võrrandist (133):

$$z = R_0 T \cdot \ln \frac{B}{b},$$

kui seda võrrandit diferentsime baromeetrilise rõhumise b suhtes, vaadeldes temperatuuri T ja baromeetrilist rõhumist B konstantsete suurustena. Diferentsides saame:

$$dz = R_0 T \frac{b}{B} \left(-\frac{B}{b^2} \right) db = -R_0 \frac{T}{b} db.$$

Võttes baromeetrilise rõhumise diferentsiaali $db = -1$ mm Hg, s. o. oletades, et õhkkonna baromeetriline rõhumine tõusust tingitult väheneb ühe millimeetri võrra, muutub kõrguse diferentsiaal dz baromeetriliseks kõrgusastmeks. Tähistades baromeetrilise kõrgusastme tähega a ja asendades õhukonstandi $R = 29,27$, saamegi avaldise baromeetrilise kõrgusastme jaoks kujul:

$$a = 29,27 \frac{T}{b} \dots \dots \dots (143).$$

Näiteks kui antud kõrgusel, temperatuuril $T = 288^\circ$, õhkkonna baromeetriline rõhumine on $b = 760$ mm, siis sellele temperatuurile ja rõhumisele vastab baromeetriline kõrgusaste:

$$a = 29,27 \frac{288}{760} = 11,09 \approx 11,1 \text{ m.}$$

Baromeetrilise kõrgusastme kaudu on võimalik arvutada teatava täpsusega väikesi kõrgusvahesid, kui on teada baromeetriline rõhumine B kõrguse mõõtmise algpunktis ja baromeetriline rõhumine b kõrguse mõõtmise lõpppunktis. Sel puhul kõrguse arvutluse võrrand avaldub kujul:

$$z = a(B - b) \dots \dots \dots (144)^1).$$

Võrrandis (144) tuleb a arvutada vastavalt õhusamba keskmisele temperatuurile ja baromeetriliste rõhumiste B ja b aritmeetilisele keskmisele.

Arvutluse lihtsustamiseks on raamatu lõpus tabelis 36 antud baromeetrilised kõrgusastmed vastavalt baromeetrilisele rõhumisele ja õhu temperatuurile.

1) Võrrand (144) on tuletatav võrrandist (133). Kirjutades võrrandi (133) kujul:

$$z = R_0 T \ln \left(1 + \frac{B - b}{b} \right)$$

ja arendades logaritmi $\ln \left(1 + \frac{B - b}{b} \right)$ ritta saame:

$$z = R_0 T \left[\frac{B - b}{b} - \frac{(B - b)^2}{2b^2} + \frac{(B - b)^3}{3b^3} - \dots \right].$$

Kui võtta arvesse ainult rittaarenduse esimene liige, mis väikeste kõrgusvahede puhul praktiliselt lubatav, leiame, et

$$z = \frac{R_0 T}{b} (B - b).$$

Avaldis $\frac{R_0 T}{b}$ on eelmise põhjal baromeetriline kõrgusaste a , seega

$$z = a(B - b).$$

Näide 28.

Arvutada võrrandi (144) järgi kõrgus, kui õhkkonna baromeetriline rõhumine algkõrgusel on 760 mm ja otsitaval kõrgusel 730 mm, kusjuures õhusamba keskmine temperatuur on $+10^{\circ}\text{C}$.

Antud juhul on baromeetriliste rõhumiste aritmeetiline keskmine rõhumine 745 mm ja sellele rõhumisele ning temperatuurile $+10^{\circ}\text{C}$ vastav baromeetriline kõrgusaste tabeli 36 järgi 11,1 m. Järelikult võrrandi (144) järgi on kõrgus:

$$z = 11,1(760 - 730) = 333 \text{ m.}$$

Võrrandi (140) järgi oleks kõrgus antud juhul:

$$z = 18400(1 + 0,003663 \cdot 10) \log \frac{760}{730} = 333,6 \text{ m.}$$

Näitest järeldame, et väikeste kõrguste arvutlemiseks annab võrrand (144) praktiliste aeronavigatsiooniliste arvutluste jaoks küllaldase täpsuse.

Baromeetrilise rõhumise taandamine merepinna kõrgusele.

Aeronavigatsioonilisteks otstarveteks mõnesajameetrilistelt kõrgustelt õhkkonna baromeetrilise rõhumise merepinna kõrgusele taandamise võrrandi saame võrrandist (144), lahendades viimase baromeetrilise rõhumise B suhtes:

$$B = b + \frac{z}{a} \dots \dots \dots (145),$$

kus z on vaatluskoha kõrgus merepinnalt, b — kõrgusel z teotsev õhkkonna baromeetriline rõhumine ja a — baromeetriline kõrgusaste. Esimesel lähenemisel tuleb a valida vastavalt kõrguseni z ulatava õhusamba keskmisele temperatuurile ja baromeetrilisele rõhumisele b . Teiskordsel lähenemisel tuleb a valida vastavalt samale temperatuurile ja esimesel lähenemisel saadud baromeetrilise rõhumise B ja baromeetrilise rõhumise b aritmeetilisele keskmisele. Juhul, kui õhusamba keskmise temperatuuri arvutamiseks õhu temperatuur merepinna kõrgusel ei ole teada ja kui andmed temperatuuri gradiendi kohta puuduvad, siis võib temperatuuri gradiendiks võtta $0,65^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$.

Täpsemate arvutluste puhul võib õhkkonna rõhumise taandamine merepinna kõrgusele toimuda võrrandiga, mille saame, kui lahendame võrrandi (141) B suhtes, s. o.

$$B = be^{\frac{z}{R_0 T_k (1+0,378E) (1+0,00265 \cos 2\varphi) (1+0,000\,000\,314 z_k)}} \dots \dots \dots (146).$$

Meie geograafilise laiuse jaoks õhkkonna baromeetrilise rõhumise merepinna taandamise võrrandi saame võrrandist (142), lahendades viimase B suhtes:

$$B = be^{\frac{z}{7981 (1+0,003\,663\,t_k) (1+0,378E)}} \dots \dots \dots (147).$$

Kui aga jätame arvestamata niiskuse mõju, siis saame võrrandi (147) kujul:

$$B = be^{\frac{z}{7981(1+0,003663 t_k)}} \quad (148).$$

Näide 29.

Õhkkonna rõhumine 800 m kõrgusel merepinnalt on 690 mm, õhu temperatuur $+10^\circ \text{C}$ ja veeauru rõhumine $e = 6 \text{ mm Hg}$. Taandada võrranditega (145), (147) ja (148) eelantud baromeetriline rõhumine merepinna, kui temperatuuri gradient on $0,6^\circ \text{C}/100 \text{ m}$ ja veeauru rõhumine merepinnal 10 mm Hg.

Õhusamba keskmine temperatuur on $+12,4^\circ \text{C}$.

Tabelist 36 leiame, et temperatuurile $+12,4^\circ \text{C}$ ja rõhumisele 690 mm vastab kõrgusaste $a \approx 12,1$. Seega võrrand (145) annab esimesel lähenemisel rõhumise merepinna kõrgusel:

$$B = 690 + \frac{800}{12,1} = 756 \text{ mm}.$$

Baromeetriline kõrgusaste tuleb järelkult valida vastavalt rõhumisele $(690 + 756) : 2 = 723 \text{ mm}$. Tabelist 36 leiame interpoleerimise teel, et temperatuurile $12,4^\circ \text{C}$ ja rõhumisele 723 mm vastab kõrgusaste $a = 11,55$, seega baromeetriline rõhumine merepinna kõrgusel on:

$$B = 690 + \frac{800}{11,55} = 759,2 \text{ mm}.$$

Võrrandi (147) järgi arvutlemiseks leiame esiteks arvu e astmenäitaja:

$$E = \left(\frac{10}{759,2} + \frac{6}{690} \right) : 2 = 0,0109; (1 + 0,378E) = 1,00413; (1 + 0,003663 t_k) = 1,0454;$$

$$\frac{800}{7981 \cdot 1,0454 \cdot 1,00413} = 0,09549.$$

Järelkult omab arvutlusvõrrand (147) kuju:

$$B = be^{0,09549}.$$

Logaritmidest võrrandit leiame:

$$\log B = \log b + 0,09549 \log e^* = 2,83885 + 0,04147 = 2,8803.$$

Logaritmile 2,8803 vastab arv 759,1, mis ongi õhkkonna rõhumine merepinna kõrgusel.

Eelmiste arvutluste põhjal on võrrandi (148) astmenäitaja:

$$\frac{800}{7981 \cdot 1,0454} = 0,09588$$

ning seega võrrand (148) avaldub kujul:

$$B = be^{0,09588}.$$

Logaritmidest seda võrrandit leiame:

$$\log B = \log b + 0,09588 \log e = 2,8388 + 0,04164 = 2,8804.$$

Logaritmile 2,8804 vastab arv 759, mis ongi võrrandi (148) järgi arvutatud õhkkonna rõhumine merepinna kõrgusel.

Näitest järeldub, et võrrand (145) annab praktilisteks otstarveteks küllaldase täpsuse.

*) $\log e = 0,4342945$.

Polütroopne õhkkond.

Polütroopseks nimetatakse õhkkonda, kus õhkkonna temperatuur muutub kõrgusega konstantse gradiendi järgi ehk, mis sama, kus õhu erimaht ja õhkkonna rõhumine muutuvad kõrgusega säärastelt, et õhu erimahu „ n “-astme korrutis samal kõrgusel oleva õhkkonna rõhumisega jääb igal kõrgusel üheks ja samaks konstantseks suuruseks. Niisuguse õhkkonna seisukord avaldub järeltoodud võrrandiga:

$$p_0 v_0^n = p v^n = \text{konst.} \quad (149)^1,$$

kus p_0 ja v_0 on õhkkonna rõhumine kg/m^2 ja õhu erimaht merepinna kõrgusel ja p ning v — samad mõjurid mingisugusel vabalt valitud kõrgusel z .

Silmas pidades, et $v = \frac{1}{\gamma}$ ja $\gamma = \rho g$ (vt. võrrandeid 88 ja 119), saame võrrandile (149) anda lihtsate algebraliste tehetege kuju:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ ehk } \frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (150).$$

Astmenäitajat „ n “ nimetatakse polütroopse astmeks.

Peale astmenäitaja „ n “ iseloomustab polütroopset õhkkonda veel õhu temperatuur ja õhkkonna rõhumine merepinna kõrgusel, kusjuures igal kõrgusel õhu seisukord allub gaaside karakterlikule võrrandile (91). Õhu niiskuse ja raskustungi muutuse mõju jätame polütroopse õhkkonna arvutlustes arvesse võtmata, kusjuures merepinna kõrgusel õhkkonna seisukorda määravad suurused võtame vastavalt 45° geograafilisele laiusele.

Eeltoodust selgub, et kui näiteks võtame polütroopse õhkkonna, mille temperatuur merepinna kõrgusel on $+15^\circ \text{C}$, baromeetriline rõhumine $b = 760 \text{ mm}$ ja polütroopse aste $n = 1,235$ (standardne õhkkond), siis selles õhkkonnas on $p v^{1,235}$ igal kõrgusel konstantne suurus. Selle konstandi arvutamiseks leiame võrrandi (80) järgi rõhumise p_0 :

$$p_0 = 13,5951 \quad b = 13,5951 \cdot 760 = 10\,332,3 \text{ kg/m}^2$$

ja võrrandi (97) järgi erimahu v_0 :

$$v_0 = 2,153 \frac{288}{760} = 0,816 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Järelikult on võrrandiga (149) määratav konstantne suurus

$$p_0 v_0^{1,235} = 10\,332,3 \cdot (0,816)^{1,235} = 8038.$$

See tähendab, et antud polütroopse õhkkonna puhul õhurõhumise korrutis õhu erimahu astmega 1,235 annab igal kõrgusel arvsuuruse 8038.

¹⁾ Eelõeldu selgituseks olgu tähendatud, et võrrandis (91) $p v = RT$ kahaneb kõrguse tõusul suurus T (T langeb konstantse gradiendi järgi), seega võrrandis kahaneb nii liige RT kui ka liige $p v$. On teada, et kõrgusega v kasvab. Siis, et liige $p v$ kõrgusega kahaneks, peab p kahanema kiiremal, kui v kasvab. Et aga korrutis $p v$ kõrguse muutusest hoolimata jääks konstantseks, peame v kasvamist soodustama, mida saab teha v astendamise. Valides vastavalt temperatuuri gradiendile sobiva astmenäitaja n , saamegi, et $p v^n = \text{konst.}$

Polütroopses õhkkonnas esineva vahekorra kõrguse ja õhkkonna rõhumise vahel saame tuletada võrrandist (125):

$$dz = -v dp,$$

kui asendame õhu erimahu tema avaldisega polütroopsuse võrrandist (149), kust leiame, et

$$v^n = \frac{p_0 v_0}{p} \quad \text{või} \quad v = v_0 p_0^{\frac{1}{n}} p^{-\frac{1}{n}}.$$

Seega võrrand (125) avaldub kujul:

$$dz = -v_0 p_0^{\frac{1}{n}} p^{-\frac{1}{n}} dp; \quad z = - \int_{p_0}^p v_0 p_0^{\frac{1}{n}} p^{-\frac{1}{n}} dp.$$

Võttes konstantse suuruse $v_0 p_0^{\frac{1}{n}}$ integraalimärgi ette, saame lihtsa astmeintegraali, mida integreerides merepinna kõrgusel olevast õhkkonna rõhumisest p_0 kuni rõhumiseni p kõrgusel z , leiame:

$$\begin{aligned} z &= -v_0 p_0^{\frac{1}{n}} \int_{p_0}^p p^{-\frac{1}{n}} dp = -v_0 p_0^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n-1} \left| p^{\frac{n-1}{n}} \right|_{p_0}^p = \\ &= -v_0 p_0^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n-1} \left(p^{\frac{n-1}{n}} - p_0^{\frac{n-1}{n}} \right) = p_0 v_0 \frac{n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \end{aligned}$$

Gaaside karakterliku võrrandi (91) põhjal $p_0 v_0 = RT_0$, seega tuletatud võrrandi lõplik kuju on:

$$z = \frac{n}{n-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \dots \dots \dots (151),$$

kus z on kõrgus merepinnalt meetrites, T_0 — polütroopse õhkkonna absoluutne temperatuur merepinna kõrgusel, R — õhukonstant, n — polütroopsuse aste, p_0 — õhkkonna rõhuline kg/m² merepinna kõrgusel ja p — õhkkonna rõhuline kg/m² kõrgusel z .

Võrrandist (151) nähtub, et polütroopsel õhkkonnal on piiriline ulatus, mille leiame, kui võrrandis (151) kõrgusega muutuva õhkkonna rõhumise p võtame võrdseks nulliga ($p=0$), sest kõrgusel, kus lõpeb õhkkond, on rõhuline null.

Järelikult sel puhul murd $\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 0$ ja võrrand (151) omab kuju:

$$z_* = \frac{n}{n-1} RT_0 \dots \dots \dots (152).$$

Kui võtame $R=29,27$, $T_0=273^\circ$ ja $n=1,2$, siis saame niisuguse polütroopse õhkkonna ulatuseks võrrandiga (152) ümmarguselt 48 km, sest

$$z_* = \frac{1,2}{1,2-1} \cdot 29,27 \cdot 273 = 47944 \text{ m} \approx 48 \text{ km}.$$

Vahekorra kõrguse muutumisel esineva temperatuurimuutuse kohta leiame, kui võrrandis (151) õhkkonna rõhumiste suhte $\frac{p}{p_0}$ asendame nendele rõhumistele vastavate absoluutsete temperatuuride suhtega. Selle asenduse teeme järgmiselt: polütroopsuse võrrandist $p_0 v_0^n = p v^n$ saame moodustada võrde:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{v_0}{v} \right)^n.$$

Gaaside karakterlikust võrrandist $p v = R T$, mis seob polütroopse õhkkonna seisukorda määravaid suurusid p , v ja T antud kõrgusel, leiame, et õhu erimaht merepinna kõrgusel on:

$$v_0 = \frac{R T_0}{p_0},$$

ja kõrgusel z :

$$v = \frac{R T}{p}.$$

Astendame mõlemad erimahud n -ga:

$$v_0^n = \left(\frac{R T_0}{p_0} \right)^n; \quad v^n = \left(\frac{R T}{p} \right)^n,$$

ja võtame nende erimahtude suhte:

$$\left(\frac{v_0}{v} \right)^n = \left(\frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{R}{R} \right)^n = \left(\frac{p}{p_0} \right)^n \left(\frac{T_0}{T} \right)^n.$$

Asendame nüüd eelsaadud võrdes $\frac{p}{p_0} = \left(\frac{v_0}{v} \right)^n$ suhte $\frac{v_0}{v}$ tema avaldisega, siis saame:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{v_0}{v} \right)^n = \left(\frac{p}{p_0} \right)^n \left(\frac{T_0}{T} \right)^n,$$

kust leiame, jagades mõlemaid pooli suhtega $\left(\frac{p}{p_0} \right)^n$:

$$\left(\frac{p}{p_0} \right)^{1-n} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^n$$

ja siit:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{n}{1-n}} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{n}{n-1}} \dots \dots \dots (153).$$

Asendades nüüd võrrandis (151) rõhumiste suhte tema avaldisega võrrandist (153), saame:

$$z = \frac{n}{n-1} R T_0 \left\{ 1 - \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^{\frac{n-1}{n}} \right\} = \frac{n}{n-1} R T_0 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right),$$

ja lahendades saadud võrrandi temperatuuri T suhtes, leiamegi õhkkonna temperatuuri ja kõrguse vahekorra lõplikult kujul:

$$T = T_0 - \frac{n-1}{n} \frac{z}{R} \dots \dots \dots (154).$$

Saadud võrrand (154) näitab, et polütroopses õhkkonnas temperatuur muutub kõrgusega esimeses astmes, s. o. lineaarselt, nagu see peagu aset leiab ka tõelises õhkkonnas (vt. joonist 6).

Lahendades võrrandi (154) n suhtes, leiame avaldise polütroopsuse astme jaoks seoses kõrgusega ja temperatuuriga:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{T - T_0}{z} R} = \frac{1}{1 - \frac{T_0 - T}{z} R}.$$

Arvesse võttes, et $T - T_0$ on temperatuuri muutus merepinna kõrguselt kuni kõrguseni z , on selge, et suhe $\frac{T_0 - T}{z}$ avaldab temperatuuri muutust ühemeetrilise kõrgusvahe kohta, s. o. väljendab temperatuuri gradienti ühemeetrilise kõrgusvahe jaoks. Kui tähistame temperatuuri gradiendi ühemeetrilise kõrguse kohta tähega δ , s. o.

$$\delta = \frac{T_0 - T}{z} \dots \dots \dots (155),$$

saamegi polütroopsuse astme võrrandi lõpliku kuju:

$$n = \frac{1}{1 - \delta R} \dots \dots \dots (156).$$

Võrrandi (156) tuletamisest järeldame, et temperatuuri gradient δ tuleb võrranditesse asetada alati plussmärgiga, kui kõrguse suurenemisel temperatuur langeb¹⁾.

Eeltoodust võime järeldada, et polütroopses õhkkonnas esineb ühes kõrguse muutusega ka temperatuuri muutus, s. o. polütroopsel õhkkonnal on alati teatav temperatuuri gradient. Arvesse võttes, et ka tõelisel õhkkonnal on alati teatav temperatuuri gradient, võime ütelda, et tõeline õhkkond jälgendab teatavat polütroopset õhkkonda, mille määrab kindlaks õhkkonna keskmine temperatuuri gradient ja õhkkonna seisukord merepinna kõrgusel.

Alljärgnevalt anname polütroopse õhkkonna võrrandid seoses temperatuuri gradiendiga δ ja õhkkonna baromeetrilise rõhumisega.

Selleks et kõrguse arvutluse võrrandit (151) avaldada seoses temperatuuri gradiendiga δ , võtame võrrandisse (151) kuuluvates avaldistes $\frac{n}{n-1}$

ja $\frac{n-1}{n}$ võrrandi (156) põhjal $n = \frac{1}{1 - \delta R}$, millega saame:

$$\frac{n}{n-1} = \frac{1}{\delta R} \quad \text{ja} \quad \frac{n-1}{n} = \delta R \dots \dots \dots (157),$$

ning asendame võrrandi (85) põhjal õhkkonna rõhumiste suhte $\frac{p}{p_0}$ õhkkonna baromeetriliste rõhumiste suhtega $\frac{b}{B}$, saades sel teel:

¹⁾ See lause on δ suhtes maksev kõigi eespool tuletatud polütroopse õhkkonna võrrandite kohta.

$$z = \frac{T_0}{\delta} \left[1 - \left(\frac{b}{B} \right)^{\delta R} \right] \dots \dots \dots (158)^1,$$

kus T_0 ja B on õhkkonna absoluutne temperatuur ja baromeetiline rõhuline merepinna kõrgusel, b — õhkkonna baromeetiline rõhuline kõrgusel z arvates merepinnalt ja R — õhukonstant.

Tehes samasugused asendused võrrandites (153) ja (154), nagu tegime võrrandis (151), saame:

$$\frac{b}{B} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{\delta R}} \dots \dots \dots (160);$$

$$T = T_0 - \delta z \dots \dots \dots (161).$$

Selleks et leida õhkkonna baromeetrilise rõhumise arvutluse võrrandit vastavalt kõrgusele z , lahendame võrrandi (158) baromeetriliste rõhumiste $\frac{b}{B}$ suhtes:

$$\frac{b}{B} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z \right)^{\frac{1}{\delta R}} \dots \dots \dots (162).$$

Vahekorra õhu erikaalude γ_0 ja γ ning kõrguse z vahel annab võrrand (162), kui õhkkonna rõhumiste suhte $\frac{b}{B}$ asendame õhu erikaalude suhtega, mida tuleb teha järgmiselt.

¹⁾ Kõrguse arvutlemine polütroopses õhkkonnas on võimalik ka isotermilise õhkkonna hüsomeetrilise võrrandi (133) alusel:

$$z = RT'_k \ln \frac{B}{b} \dots \dots \dots (159),$$

kus T'_k on antud polütroopses õhkkonnas kõrguseni z ulatuva õhusamba keskmine temperatuur. Selleks et eelantud võrrandiga arvutatud kõrgus ühtuaks täpselt kõrgusega, mida annab võrrand (158), peame keskmise temperatuuri T'_k arvutama võrrandiga (51).

See tingimus tõendub järgmiselt. Võrdsete kõrguste puhul peavad võrrandite (158) ja (159) parempooled olema võrdsed suurused, s. o.

$$RT'_k \ln \frac{B}{b} = \frac{T_0}{\delta} \left[1 - \left(\frac{b}{B} \right)^{\delta R} \right].$$

Asendame saadud võrrandis baromeetriliste rõhumiste suhte võrrandi (153) põhjal absoluutsete temperatuuride suhtega:

$$RT'_k \ln \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{\delta R}} = \frac{T_0}{\delta} \left[1 - \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{või}$$

$$RT'_k \cdot \frac{1}{\delta R} \ln \frac{T_0}{T} = \frac{T_0}{\delta} \cdot \frac{T_0 - T}{T_0}.$$

Lahendades võrrandi T'_k suhtes, saame peale koondamist:

$$T'_k = \frac{T_0 - T}{\ln \frac{T_0}{T}}$$

Siit leiamegi kümnendlogaritmidega logaritmides harmoonilise keskmise võrrandi (51):

$$T'_k = 0,434 \, 294 \frac{T_0 - T}{\log \frac{T_0}{T}},$$

kus T_0 on antud polütroopse õhkkonna temperatuur merepinna kõrgusel ja T — sama õhkkonna temperatuur kõrgusel z .

Polütroopsuse võrrandist $p_0 v_0^n = p v^n$ saame, kui arvesse võtame, et $v = \frac{1}{\gamma}$ (vt. võrrandit 88):

$$\frac{p}{p_0} = \frac{v_0^n}{v^n} = \frac{\gamma^n}{\gamma_0^n}.$$

Silmas pidades, et $\frac{p}{p_0} = \frac{b}{B}$ (vt. võrrandit 85), võime võrrandi (162) põhjal kirjutada:

$$\frac{\gamma^n}{\gamma_0^n} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{\frac{1}{\delta R}}.$$

Juurides selle võrrandi mõlemaid pooli n -ga ja arvesse võttes, et võrrandi (156) põhjal $n = \frac{1}{1 - \delta R}$, saame lõpliku avaldise õhu erikaalu arvutluseks:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{\frac{1 - \delta R}{\delta R}} \dots \dots \dots (163).$$

Võrrand (163) annab arvutusvõrrandi ka õhu tiheduse leidmiseks, sest võrrandi (119) põhjal $\gamma = \rho g$ ja $\gamma_0 = \rho_0 g$ ning seega:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho g}{\rho_0 g} = \frac{\rho}{\rho_0}, \text{ s. o.}$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{\frac{1 - \delta R}{\delta R}} \dots \dots \dots (164).$$

Võrrandites (163) ja (164) on γ_0 ja ρ_0 õhu erikaal ja tihedus merepinna kõrgusel, γ ja ρ — õhu erikaal ja tihedus kõrgusel z arvatud meetrites merepinnalt, δ — temperatuuri gradient ühemeetrilise kõrgusvahe kohta, T_0 — õhkkonna absoluutne temperatuur merepinna kõrgusel ja R — õhukonstant.

Eeltoodust selgub, et õhkkonna polütroopse seisukorra määrajaks on õieti õhkkonna temperatuuri gradient δ , sest tema määrab kindlaks, nagu nägime, polütroopsuse astme „ n “. Juhul, kui temperatuuri gradient $\delta = 0$, siis $n = \frac{1}{1 - \delta R} = 1$, ja seega saame isotermilise õhkkonna, sest sel puhul temperatuur kõrgusega ei muutu, vaid jääb konstantseks. Järelikult on isotermiline seisukord polütroopsuse erijuhuks ja leiab aset, kui $n = 1$.

Mainime siin veel üht erilist polütroopset seisukorda, mis tõelises õhkkonnas vahel esineb, nimelt polütroopsust astmega $n = 1,405$. Arv 1,405 on gaaside erisoojus jääva rõhumise juures c_p , jagatud gaaside erisoojusega jääva mahu juures c_v , s. o. $\frac{c_p}{c_v}$. See suhe tähistatakse harilikult tähega κ ja on peagu

kõigil gaasidel konstantne, nimelt $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,405$. Polütroopset õhkkonda, mille aste $n = \kappa$, nimetatakse *a d i a b a a t s e k s* õ h k k o n n a k s ja ta leiab aset, kui temperatuuri gradient on keskmiselt $\delta = 0,01^\circ \text{C/m}$ ehk

$1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (täpsemalt $0,985^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, millise arvu saame, kui võrrandi 156 lahendame δ suhtes, võttes $n=1,405$).

Gaaside adiabaatseks seisukorraks nimetatakse üldiselt niisugust seisukorda, milles gaas ei saa kokkusurumisel oma soojust kuhugi edasi anda ega laienemisel (paisumisel) saa kuskilt soojust juurde võtta, s. o. adiabaatsel protsessil peab sellest protsessist osavõtva gaasi mass olema soojuslikult isoleeritud.

Järelikult, kui mingisuguse õhumassi tõstame adiabaatselt ühe meetri võrra kõrgemale tema algasendist, siis see õhumass paisub sääraselt, et tema temperatuur langeb $0,00985^{\circ}\text{C}$ võrra, kuna aga algasendist ühe meetri võrra allapaigutamise puhul selle õhumassi temperatuur tõuseb $0,00985^{\circ}\text{C}$ võrra.

Õhkkonnas see olukord leiab aset suurte õhumasside kiirel liikumisel, mil õhumass ei saa oma soojust ära anda ega soojust juurde võtta. Muidugi on eelöeldu kehtiv ainult siis, kui ei toimu soojade ja külmade õhukogude segunemist ning kui ei ole tegemist eriliste soojuslikkude kiirgamisnähtustega jne.

Tasakaalu suhtes võib õhkkond oma kihistuselt olla püsivas (stabiilses), püsimatus või ükskõikses tasakaalus. Püsivas tasakaalus on õhkkond siis, kui teatavas kihis asuv õhumass sellest kihist väljaviimisel oma temperatuuri ja tihedust muudab sääraselt, et ta kohe endisse õhukihti tagasi langeb, kuna aga ebastabiilse ehk püsimatu tasakaalu puhul see õhumass niisugusel juhul eemaldub oma endisest kihist veelgi rohkem. Ükskõikse tasakaalu puhul jääb oma asukohast eemaldatud õhukogu püsima igasse kohta, kuhu ta paisatakse, kuna sel puhul õhumassi seisukord muutub sääraselt, et ta omandab alati täpselt sama tiheduse, mida omab teda ümbritsev õhukiht.

Ükskõikses tasakaalus asub õhkkond adiabaatsel kihitusel, s. o. kui temperatuuri gradient on $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Temperatuuri gradiendi puhul üle $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ on õhukiht ebastabiilne, kuna temperatuuri gradiendi puhul alla $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ on õhukiht stabiilses seisukorras.

Rahvusvaheline standardne õhkkond.

Kõige eeltoodu põhjal võime öelda, et õhkkonna seisukord on väga muutuv ja mitmekesine, olenevalt mere- või maapinnal teotsevast baromeetrilisest rõhumisest, temperatuurist ja temperatuuri gradiendist. Isegi öö-päeva kestel õhkkond teeb läbi mitmekesiseid muudatusi, rääkimata veel aastaaegadest jne. Loomulikult on selle tõttu lennukitega tehtud katsete tulemused igakord isesugused, kuna lennuki aerodünaamilised omadused väga suurel määral sõltuvad õhu tihedusest, mis aga omakorda sõltub õhu temperatuurist ja õhkkonna rõhumisest. Vabas õhkkonnas teostatud katsete tulemuste põhjal ei ole järelikult võimalik teha mingisuguseid täpseid konkreetseid hinnanguid võrdlusaluste lennukite kohta. Selle puuduse kõrvaldamiseks oli peagu kõigis riikides võetud tarvitusele nn. standardne õhkkond, mis ühtub antud riigis asetleidva õhkkonna aastase keskmise seisukorraga. Viimasel ajal on ühtlustamise otstarbel Prantsusmaa standardne õhkkond tunnustatud rahvusvaheliseks. Selle õhkkonna troposfääri ulatus võetakse võrdseks 11000 meetriga. Alates sellest kõrgusest algab standardne isothermiline stratosfäär, mille temperatuur on arvatud võrdseks $-56,5^{\circ}\text{C}$. Praegusel ajal arvutatakse peagu

kõik lennukitega tehtud katsete tulemused rahvusvahelise standardse õhkkonna tingimustesse. Samuti ka lennukite ja nende mootorite projekteerimine, kuivõrd need küsimused on seotud õhkkonnaga, lahendatakse standardse õhkkonna tingimustes.

Standardse õhkkonna konstantsuurused merepinna kõrgusel on antud tabelis 26.

T a b e l 26. Standardne õhkkond.

Konstantsuuruse nimetus	Sümbol	Meetrimõõdu-süsteem	Inglise mõõdu-süsteem
Baromeetriline rõhumine	B_0	760 mm	29,921 in
Rõhumine pindala üksusele	p_0	10332,276 kg/m ²	2116,229 lb/ft ²
Õhu temperatuur	t_0	+15° C	59° F
Õhu absol. temperatuur	T_0	288°	518,4° F
Õhu erikaal	γ_0	1,2255 kg/m ³	0,07651 lb/ft ³
Õhu tihedus	ρ_0	0,12498	0,002378
Õhukonstant	R	29,2708	53,33089
Temperatuuri gradient	δ	0,0065° C/m	0,00356° F/ft
Vabalangemise kiirendus	g	9,80665 m/sek ²	32,1740 ft/sec ²

Temperatuuri langus kuni 11000 m kõrguseni võetakse lineaarsena, gradiendiga 0,0065° C/m. Kõrgusel 11000 m algab, nagu juba öeldud, standardne isothermiline õhkkond, mille temperatuur on -56,5° C. Õhu niiskus arvatakse igal kõrgusel võrdseks nulliga ja oletatakse, et igal kõrgusel õhk allub Clapeyron'i võrrandile

$$pv=RT,$$

kusjuures ei arvestata kõrguse muutumisel esinevat raskustungi muutumist, s. o. igal kõrgusel vabalangemise kiirendus arvatakse võrdseks $g=9,80665$ m/sek². Järelikult võib sel puhul igal kõrgusel õhu erikaalu ja õhu tiheduse arvutamiseks tarvitada võrrandeid (96) ja (123), mis vastavad standardse õhkkonna tingimustele, kuna standardse õhkkonna õhukonstant R on samane õhukonstandiga 45° geograafilisel laiusel, seega

$$\gamma=0,4644 \frac{b}{T};$$

$$\rho=0,04736 \frac{b}{T}.$$

Eeltoodust järeldame, et rahvusvaheline standardne õhkkond kujutab polütroopset õhkkonda, mille temperatuuri gradient on $\delta=0,0065^\circ$ C/m ja mille polütroopsuse aste on vastavalt sellele võrrandi (156) järgi:

$$n = \frac{1}{1-\delta R} = \frac{1}{1-0,0065 \cdot 29,2708} = 1,235.$$

Vahekorra kõrguse ja temperatuuri vahel annab võrrand (161), kui temasse asetame temperatuuri gradiendi $\delta=0,0065^\circ \text{C/m}$ ja võtame $T_0=288$:

$$T=288-0,0065z \dots \dots \dots (165),$$

või arvates Celsiuse nullist:

$$t=15-0,0065z \dots \dots \dots (166),$$

kus z on kõrgus meetrites merepinnalt.

Kõigis alljärgnevates võrrandites sümbolid p , γ , ρ ja T , mis ei ole märgitud indeksiga „0“, vastavad kõrgusele z , mida mõõdetakse meetrites arvates merepinnalt, kuna indeksiga „0“ märgitud sümbolid tähistavad vastavaid suursi merepinna kõrgusel. Seejuures sümbol B_0 tähistab õhkkonna baromeetrilist rõhumist merepinna kõrgusel ja b — kõrgusel z . Kõrgus z on positiivne merepinnalt ülespoole ja negatiivne merepinnalt allapoole.

Vahekorra baromeetrilise rõhumise ja kõrguse vahel annab võrrand (162), milles astmenäitaja võtame võrdseks $\frac{1}{\delta R} = \frac{1}{0,0065 \cdot 29,2708} = 5,256$:

$$\frac{b}{B_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{5,256} \dots \dots \dots (167);$$

asendades murru $\frac{\delta}{T_0}$ tema pöördväärtusega $\frac{T_0}{\delta} = \frac{288}{0,0065} = 44308$, saame võrrandi (167) kujul:

$$\frac{b}{B_0} = \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{5,256} \dots \dots \dots (168).$$

Vahekorra õhu erikaalu, tiheduse ja kõrguse vahel annavad võrrandid (163) ja (164), milledes astmenäitaja võtame võrdseks

$$\frac{1-\delta R}{\delta R} = \frac{1-0,0065 \cdot 29,2708}{0,0065 \cdot 29,2708} = 4,256:$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{4,256} \dots \dots \dots (169),$$

või, kui asendada murd $\frac{\delta}{T_0}$ tema pöördväärtusega $\frac{T_0}{\delta} = 44308$:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{4,256} \dots \dots \dots (170).$$

Kõrguse arvutamiseks tarvitatakse võrrandit (164). Lahendades võrrandi z suhtes, saame:

$$z = \frac{T_0}{\delta} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{\delta R}{1-\delta R}} \right].$$

Asendades astmenäitaja ja avaldise $\frac{T_0}{\delta}$ nende arväärtustega:

$$\frac{\delta R}{1-\delta R} = \frac{0,0065 \cdot 29,2708}{1-0,0065 \cdot 29,2708} = 0,235,$$

$$\frac{T_0}{\delta} = \frac{288}{0,0065} = 44308,$$

saame lõplikult kõrguse arvutluse võrrandi:

$$z = 44308 \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{0,235} \right] \dots \dots \dots (171),$$

kus $\rho_0 = 0,12498$. Võrrandit (171) kasutatakse lennukõrguse leidmiseks standardse õhkkonna tingimustes. Selleks peame lennu ajal määrama mõõdetaval lennukõrgusel õhu temperatuuri ja õhkkonna baromeetrilise rõhumise. Nende suuruste järgi arvutame võrrandiga (123) sellel kõrgusel olnud õhutiheduse, mille arvsuuruse asetamisega võrrandisse (171) leiame standardse kõrguse z .

Vahekorra õhu baromeetrilise rõhumise ja temperatuuri vahel annab võrrand (160), kui asendame astmenäitaja tema arvsuurusega

$$\frac{1}{\delta R} = \frac{1}{0,0065 \cdot 29,2708} = 5,256:$$

$$\frac{b}{B_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{5,256} \dots \dots \dots (172),$$

või, kui juurida mõlemaid pooli 5,256-ga:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{b}{B_0} \right)^{0,190} \dots \dots \dots (173),$$

kus $B_0 = 760$ mm Hg ja $T_0 = 288^\circ$. Võrrandeid (172) ja (173) läheb edaspidi tarvis lennuki mootori kõrguskarakteristika arvutlustes.

Vahekorra õhkkonna baromeetrilise rõhumise ja õhu tiheduse vahel leiame võrranditest (168) ja (170), kui mõlemad võrrandid lahendame

$\left(1 - \frac{z}{44308} \right)$ suhtes. võrdsustame omavahel võrrandite parempooled ja

lahendame nii saadud võrrandi $\frac{b}{B_0}$ suhtes:

$$\frac{b}{B_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1,235} \dots \dots \dots (174),$$

või, juurides mõlemaid pooli 1,235-ga:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{b}{B_0} \right)^{0,810} \dots \dots \dots (175).$$

Vahekorra õhu temperatuuri ja tiheduse vahel annab võrrand (169), sest võrrandis esinev avaldis

$$1 - \frac{\delta}{T_0} z = \frac{T_0 - \delta z}{T_0} = \frac{T}{T_0},$$

kuna võrrandi (161) järgi $T_0 - \delta z = T$. Seega

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{4,256} \quad \text{ehk} \quad \frac{T}{T_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{0,235} \quad \dots \quad (176).$$

Aluseks võttes võrrandi (85), võime eeltoodud võrrandites esineva baromeetriliste rõhumiste suhte $\frac{b}{B_0}$ asendada temale vastava rõhumiste $\frac{\rho}{\rho_0}$ suhtega, milles teatavasti p ja p_0 on rõhumised üheruutmeetrilisele pindalale.

Eeltoodud standardse õhkkonna võrrandid on kehtivad kuni kõrguseni $z=11000$ m. Sellelt kõrguselt algab isothermiline standardne stratosfäär, mille temperatuur on $-56,5^\circ \text{C}$. Standardse õhkkonna stratosfääri algkõrgusele, s. o. kõrgusele 11000 m vastavat õhu seisukorda karakteriseerivad suurused on:

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= 216,5^\circ & \gamma_{11} &= 0,3638 \\ B_{11} &= 169,6 \text{ mm Hg} & \rho_{11} &= 0,03708 \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (177).$$

Stratosfääris esineva vahekorra õhu rõhumise, erikaalu ja tiheduse vahel annab võrrand (134), kui temasse asetame stratosfääri algkõrgusel olevat õhku iseloomustavad suurused, kusjuures kõrgus tuleb arvata alates 11000 meetrist:

$$\frac{b}{B_{11}} = e^{-\frac{z-11000}{RT_{11}}} \quad \dots \quad (178).$$

Arvesse võttes, et konstantse temperatuuri puhul on kehtiv vahekord:

$$\frac{b}{B_{11}} = \frac{\rho}{\rho_{11}} = \frac{\gamma}{\gamma_{11}} = \frac{\rho}{\rho_{11}} \quad \dots \quad (179),$$

mida lihtne tõestada võrrandite (85), (119) ja (150) alusel, kuna isothermilise õhkkonna puhul polütroopsuse aste $n=1$, saame peale tehteid arvsuurstega arvutusvõrrandi (178) lõplikult kujul:

$$\frac{b}{B_{11}} = \frac{\rho}{\rho_{11}} = \frac{\gamma}{\gamma_{11}} = \frac{\rho}{\rho_{11}} = e^{-\frac{z-11000}{6340}} \quad \dots \quad (180)^1),$$

kus z on kõrgus meetrites arvates merepinnalt.

Võrrandile (180) saame anda arvutlemiseks iga otsitava suhtes lihtsama kuju. Selleks logaritmime võrrandit otsitava suuruse suhtes. Näiteks, logaritmides võrrandit õhkkonna rõhumise suhtes, saame:

$$\log b = \log B_{11} - \frac{z-11000}{6340} \log e.$$

Logaritm arvust $e=2,718282$ on 0,4342945. Seega omab õhkkonna rõhumise arvutluse võrrand stratosfääri jaoks, pärast tehteid arvsuurstega, lõplikku kuju:

$$\log b = \log B_{11} - \frac{z-11000}{14592} \quad \dots \quad (181).$$

¹⁾ Korrutis $RT_{11}=29,2708 \cdot 216,5=6337,13$. Võrrandisse on see suurus võetud ümardatult arvuna 6340.

Lahendades võrrandi (181) suuruse $z=11000$ suhtes, saame kõrguse arvutluse võrrandi stratosfääri jaoks:

$$z-11000=14592 \log \frac{B_{11}}{b} \dots \dots \dots (182).$$

Võrrandites (181) ja (182) on b õhkkonna rõhumine kõrgusel z arva-
tes merepinnalt ja B_{11} — õhkkonna rõhumine kõrgusel $z=11000$ m, s. o.
 $B_{11}=169,6$ mm Hg.

Standardse kõrguse leidmiseks vastavalt õhkkonna baromeetrilisele rõ-
humisele b ja temperatuurile $t^\circ \text{C}$ on raamatu lõpus antud standardse õhk-
konna tabel 37, milles kõrgused on antud 50-meetriste kõrgusvahede järel.
Selleks et tabelit tarvitada kõrguse määramiseks õhu temperatuuri ja baro-
meetrilise rõhumise järgi, peame enne arvutama õhu tiheduse ja siis tabelist
otsima sellele suurusele vastava kõrguse. Õhu tiheduse leiame võrrandiga
(123). Kui tabelis arvutlusel saadud õhu tihedusele vastavat täpset arvu ei
leidu, siis leiame tabelist õhu erikaalule või tihedusele vastava kõrguse inter-
poleerimisega.

Näide 30.

Lennuk saavutas kõrguse, kus õhkkonna rõhumine oli $b=410$ mm ja temperatuur
 -13°C , s. o. $T=260^\circ$. Leida lennukõrgus standardse õhkkonna tingimustes.

Esiteks arvutleme võrrandiga (123) sellel kõrgusel oleva õhutiheduse:

$$\rho = 0,04736 \cdot \frac{b}{T} = 0,04736 \cdot \frac{410}{260} = 0,07468.$$

Kõrguse arvutlemiseks kasutame võrrandit (171). Selleks leiame enne suhte
 $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0,235}$ arvsuuruse:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0,235} = \left(\frac{0,07468}{0,12498}\right)^{0,235} = 0,59754^{0,235} = 0,88603$$

ja siis võrrandi (171) järgi kõrguse:

$$z=44308 (1-0,88603)=5050 \text{ m.}$$

Lennukõrgus standardse õhkkonna tingimustes oli seega 5050 m.

Näide 31.

Leida standardse õhkkonna baromeetriline rõhumine kõrgusel $z=15000$ m.

Lahendamiseks kasutame võrrandit (180):

$$\frac{b}{B_{11}} = \frac{b}{169,6} = e^{-\frac{z-11000}{6340}} = e^{-\frac{4000}{6340}} = e^{-0,6310}.$$

Järelikult

$$b=169,6 \cdot e^{-0,6310}.$$

Logaritmidest saame:

$$\log b = \log 169,6 - 0,6310 \log e = 2,2294 - 0,6310 \cdot 0,43430 = 1,9554.$$

Logaritmile 1,9554 vastab logaritmide tabeli järgi arv 90,24. Seega standardse õhk-
konna rõhumine kõrgusel $z=15000$ m on $b=90,24$ mm Hg.

Standardse õhkkonna õhu erikaalu ja tiheduse ligikaudsed arvutusvõrrandid.

Nagu nähtub võrrandist (170), on õhu erikaal ja tihedus murd-astmeline funktsioon kõrgusest. Säärase funktsiooni käsitlemine valmistab teatavaid raskusi, millede vältimiseks antakse eelmainitud funktsioonile lihtsam analüütiline kuju, mis aga siiski küllaldase täpsusega väljendab standardse õhkkonna erikaalu ja tiheduse muutust.

Nimelt asendatakse võrrandis (170) astmenäitaja 4,256 arvuga 4 ja murru nimetaja 44308 arvuga 42000. Seega võrrand (170) omandab kuju:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{z}{42000}\right)^4 \dots \dots \dots (183),$$

kus z on kõrgus meetrites merepinnalt.

Lihtsa vahekorra õhu erikaalu, õhu tiheduse ja kõrguse vahel annab veel võrrand:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{20-z}{20+z} \dots \dots \dots (184),$$

kus z on kõrgus merepinnalt kilomeetrites, γ_0 ja ρ_0 — õhu erikaal ja tihedus merepinna kõrgusel (vt. tabelit 26) ning γ ja ρ — õhu erikaal ja tihedus kõrgusel z . Võrrandite (183) ja (184) täpsuse võrdlus täpse võrrandiga (170) on antud tabelis 27.

Tabel 27.

Kõrgus z m	$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{4,256}$	$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{z}{42000}\right)^4$	$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{20-z}{20+z}$
0	1,0000	1,0000	1,0000
1000	0,9074	0,90808	0,90476
2000	0,8216	0,82270	0,81818
3000	0,7420	0,74343	0,73913
4000	0,6686	0,67007	0,66667
5000	0,6008	0,60228	0,60000
6000	0,5384	0,53976	0,53846
7000	0,4810	0,48226	0,48148
8000	0,4285	0,42946	0,42857
9000	0,3806	0,38110	0,37931
10000	0,3367	0,33698	0,33333
11000	0,2968	0,29679	0,29032
12000	0,2535	0,26030	0,25000
13000	0,2165	0,22730	0,21212
14000	0,1849	0,19753	0,17647
15000	0,1579	0,17078	0,14286

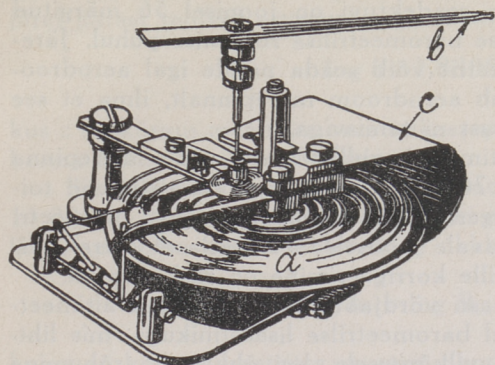
Rekordlendude puhul tarvitatakse kõrguste arvutlemiseks baromeetriste rõhumiste järgi Soreau valemit:

$$z = 5(3064 + 1,73b - 0,0011b^2) \log \frac{760}{b} \dots \dots \dots (185),$$

kus b on baromeetiline rõhumine kõrgusel z . See valem on kehtiv kuni 20 000-meetrilise kõrguseni.

Õhkkonna rõhumise mõjul töötavad kõrguse- mõõteriistad.

Lennuki lennukõrguse määramine toimub harilikult mõõteriistadega, mida nimetatakse altimeetriteks ehk kõrgusenäitajaiks.



Joon. 55.

Altimeeter on aneroidmõõteriist, sarnanev aneroidbaromeetriga, ja töötab õhkkonna rõhumise mõjul. Selle rõhumise vastuvõtjaks on aneroidkarp ehk nn. surveelement, mille deformatsiooni määra näitab altimeetri astmikku mööda liikuv osuti vastava kõrguse näol, sest tõusude ja laskumiste puhul on õhkkonna rõhumine teatav funktsioon kõrgusest ning seega on ka altimeetri survelemendi deformatsioon õhkkonna rõhumisest oleneva suurusena funktsioon kõrgusest. Altimeetri ehitus on näidatud joonisel 55. Tähte-

dega on märgitud: *a* — aneroidkarp, *b* — osuti ja *c* — aneroidkarbi vedru.

Astmiku jaotuse iseloomult on altimeetrid kahesugused: võrdjaotusliku astmikuga, kui jaotusvahed on kõik ühesuurused kogu astmiku ulatusel (joon. 56) ja ebäühtlase jaotusega astmikuga, kui jaotusvahed kõrguse suurenemisel vähenevad (joon. 57).



Joon. 56.



Joon. 57.

Astmiku ebäühtlane jaotus on tingitud asjaolust, et õhkkonna rõhumine kõrgusega ei muutu ühtlaselt, vaid kõrguse suurenemisel rõhumisvahe kõrguse mõõtühiku kohta pidevalt väheneb. Näiteks merepinna lähedal langeb 11-meetrilisel tõusul õhkkonna baromeetriline rõhumine keskmiselt 1 mm Hg võrra, kuna aga 4 km kõrgusel rõhumine langeb ühe millimeetri võrra 17-meetrise tõusu puhul. Seega peavad altimeetri astmiku jaotised kõrguse suurenemisega järjest vähenema, kuna osuti edasiliikumine astmikul ühe ja sama kõrgusvahe puhul kõrguse suurenemisega väheneb.

Astmiku tüüp oneneb altimeetri konstruktsioonist. Näiteks võrdjaotusliku astmiku altimeetril on osutit liikuma paneva mehhanismi konstruktsioon säärane, et see ise korrigeerib õhkkonna rõhumise ebaühtlast muutumist (muutuv suurenus) vastavalt kõrgusele nii, et osuti edasilikumine on igasugusel kõrgusel ühesuuruste kõrgusvahede jaoks jääv suurus.

Võrdjaotusliku astmikuga altimeeter on käsitlemiseks lihtsam, sest tema osutit võib seada nullile (nullkõrguse seadekruvi on joonisel 56 märgitud tähega *a*) igal kõrgusel, s. o. igasuguse baromeetrilise rõhumise puhul. Järelikult võrdjaotusliku astmikuga altimeetrit võib seada nullile igal aerodroomil, vaatamata sellele, kui kõrgel asub aerodroom merepinnalt, ilma et see astmiku jaotistes põhjustaks mingisugust näitamisviga.

Ebaühtlase astmikujaotusega altimeetri nullkõrgus vastab merepinna kõrgusele, s. o. õhkkonna rõhumisele 760 mm. Seepärast, kui väljalend toimub kohast, mis on merepinnast kõrgemal või madalamal, peab altimeetri osuti seadma maakoha kõrgusele vastavale jaotisele, sest vastasel korral altimeetri lugemis esineb tunduv viga, mille korrigeerimine on raskendatud.

Praegusel ajal tarvitatakse enamasti võrdjaotusliku astmikuga altimeetreid. Need varustatakse sagedasti veel baromeetrilise lisaastmikuga, mis lihtsustab altimeetri seadmist sihtjaama nullkõrgusele, kui õhkkonna rõhumine sihtjaamas on teada. Sel võimalusel on suur tähtsus öölendudel ja udu korral.

Altimeetri tundlikkus kõrguse muutuse suhtes oneneb survelemendi ja osuti mehhanismi ehitusest. Tundlikke altimeetreid tarvitatakse väikeste kõrguste määramiseks madallennul ja pimedas ning uduga maandumisel, kuid ehitatakse ka altimeetreid, mis 500-meetrilise kõrgusvahe näitavad osuti ühe ringi ulatusel, kusjuures riista mõõteulatus on 0 kuni 6000 m (12 ringi).

Altimeetri astmiku kalibreerimine (jagamine) toimub kindlaksmääratud korrapärasel õhkkonnas, kõrguse muutmisel esineva õhkkonna rõhumise muutuse järgi, sest sel puhul võime altimeetri survelemendi deformatsiooni vaadelda enamvähem täpse funktsioonina kõrgusest.

Praegusaegsete altimeetrite astmikud kalibreeritakse rahvusvahelise standardse õhkkonna ja isotermilise õhkkonna järgi. Selle isotermilise õhkkonna temperatuur merepinna kõrgusel on $+10^{\circ}\text{C}$ ja rõhumine samal kõrgusel 760 mm Hg. Mõlemate õhkkondade arvutluste aluseks võetakse 45° põhjalaiust ja jäetakse arvestamata õhu niiskuse mõju ning raskustungi muutumine kõrgusega.

Rahvusvahelise standardse õhkkonna puhul toimub altimeetri astmiku kalibreerimine kuni stratosfäärini, s. o. kuni 11 000 m kõrguseni, võrrandi (167) alusel:

$$\frac{b}{B_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{5,256},$$

mille kuju pärast tehteid arvsuurustega on:

$$\frac{b}{B_0} = \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{5,256}.$$

Isotermilise õhkkonna puhul teostatakse altimeetri astmiku kalibreerimine võrrandi (134) järgi:

$$\frac{b}{B_0} = e^{-\frac{z}{R_0 T}}$$

Selleks et võrrandile anda arvutlemiseks sobivamat kuju, logaritmime võrrandi mõlemaid pooli:

$$\log b = \log B_0 - \frac{z}{R_0 T} \log e$$

ja asendame võrrandis meile teada olevad suurused nende arväärtustega: $R_0 = 29,2708$, $T = 283$, $\log B_0 = \log 760 = 2,8808$ ja $\log e = 0,43429$, mille järel pärast tehteid arvsuurustega saame võrrandi lõplikult kujul:

$$\log b = 2,8808 - \frac{z}{19074} \dots \dots \dots (186),$$

kus z on kõrgus meetrites arvates merepinnalt ja b — kõrgusele z vastav õhkkonna baromeetriline rõhumine.

Eeltoodud võrrandid on kehtivad kuni 11 000 m kõrguseni. Alates 11 000 m kõrgusest toimub altimeetri astmiku kalibreerimine nii rahvusvahelise standardse kui ka isotermlise õhkkonna puhul võrrandiga (181), s. o.:

$$\log b_{11} = \log B_{11} - \frac{z - 11\,000}{14\,592},$$

kus z on kõrgus meetrites arvates merepinnalt, B_{11} — õhkkonna baromeetriline rõhumine 11 000 m kõrgusel, s. o. stratosfääri algusel, ja b_{11} — otsitav õhkkonna rõhumine kõrgusel z .

Edaspidi nimetame altimeetrite kalibreerimise aluseks võetud võrrandite järgi arvutatud kõrgusi hüpsomeetristeks kõrgusteks.

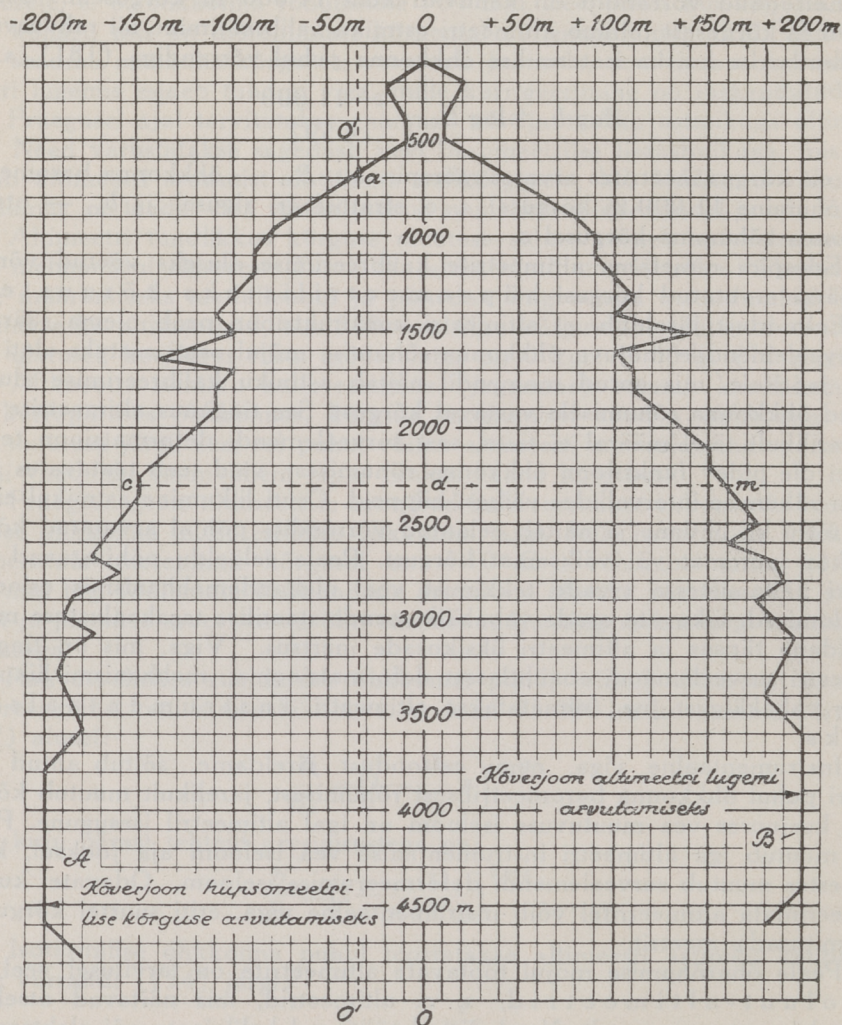
Eeltoodust järeldub, et altimeetri konstruktsioon peab olema säärane, et surveelemendile mõjuva õhkkonna rõhumise mõjul osuti asetuks alati astmiku jaotisele, mis antud momendil näitab astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna rõhumisele vastavat kõrgust. See tingimus altimeetrite juures harilikult täiel määral ei täitu, sest surveelemendi deformatsioon tegelikult ei ole pidev funktsioon õhkkonna rõhumisest, vaid teeb teatavates õhkkonna rõhumise intervallides väikesi hüppeid. Osuti liikumine astmikul ei ole selle tõttu ka ühtlane ja näitab eelantud võrrandite põhjal arvutatud kõrgusest kas suuremat või väiksemat kõrgust. Peale eelöeldu põhjustavad altimeetri näitamistesse vigade tekkimist veel ülekandemehhanismis esinevad hõõrdumised, liikuvate osade vabakäik, nende staatilise tasakaalustuse mittekuüllaldane täpsus ja altimeetri üksikosade inertsus. Viga, mis on tingitud altimeetri surveelemendi ebäühtlasest deformatsioonist, mehhanismi liikuvate osade vabakäigust jne., nimetatakse altimeetri instrumentaalseks veksiks.

Instrumentaalne viga, nagu eeltoodust järeldame, sõltub antud altimeetri puhul õhkkonna baromeetrilisest rõhumisest, järelikult muutub kõrgusega, kusjuures vea muutuvuse iseloom on igal altimeetril isesugune. Peale selle muutub iga altimeetri instrumentaalse vea iseloom aja jooksul, kuna aja kestes muutub surveelemendi deformeerumise iseloom. Odavatel kui ka reguleerimata altimeetritel võib instrumentaalne viga, eriti suurtel kõrgustel, olla mitusada meetrit.

Peale õhurõhumise mõjul töötavate altimeetrite on tarvilusel veel nn. absoluut-altimeetrid, s. o. altimeetrid, mis näitavad otsekohe täpset kõrgust maapinnalt. Need riistad töötavad helilainete või elektromagnetiliste lainete tagasipõrkamise toimetel.

Altimeetri instrumentaalne viga ja selle määramine.

Nagu eespool mainitud, sõltub altimeetri instrumentaalne viga õhk-
konna rõhumisest ehk, mis sama, hüpsomeetrilisest kõrgusest, s. o. instrumen-
taalne viga antud altimeetri jaoks on teatav funktsioon hüpsomeetrilisest kõr-
gusest. Järelikult ristkoordinaadistikus kujutab altimeetri instrumentaalne
viga teatavat kõverjoont, nagu näidatud joonisel 58. Joonisel on püstteljele
00 ülevalt allapoole märgitud hüpsomeetrilised kõrgused ja horisontaalteljele,
vastavalt kõrgusele, teljest 00 paremale poole pluss-märgiga ja vasakule
poole miinus-märgiga instrumentaalse vea väärtused.



Joon. 58.

Selleks et kõrguste määramisel leida instrumentaalset viga, koostatakse iga altimeetri jaoks joonisel 58 näidatud diagramm, mida edaspidi nime-tame altimeetri korrektsioonidiagrammiks, kust alti-meetri poolt näidatud iga kõrguse jaoks on võimalik leida instrumentaalse vea suurust. Korrigeerides altimeetri poolt näidatud kõrgust diagrammist lei-tud instrumentaalse veaga, leiame hüpsomeetrilise kõrguse vastavalt altimeetri kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustele.

Altimeetri korrektsioonidiagramm koostatakse kontrollides altimeetri näitamisi tema astmiku kalibreerimise aluseks võetud rahvusvahelise stan-dardse või isothermilise õhkkonna hüpsomeetriliste kõrgustega, mis on antud sellekohastes tabelites käesoleva raamatu lõpus. Tabel 39 vastab rahvus-vahelisele standardsele õhkkonnale, tabel 40 $+10^{\circ}\text{C}$ ja tabel 41 0°C isothermilisele õhkkonnale. Kõik tabelid on koostatud vastavalt 45°N lai-
usele. Nende tabelite esimeses lahtris on antud hüpsomeetrilised kõrgused, teises lahtris — õhkkonna baromeetrilised rõhumised millimeetrites elav-hõbeda 0°C temperatuuril, ja kolmandas lahtris — õhkkonna baromeetri-
sed rõhumised millimeetrites elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ temperatuuril, sest alti-meetrite kontrollimine toimub tavaliselt ruumis, mille temperatuur on $+15^{\circ}\text{C}$, mille tõttu sama temperatuuri omab ka kontrollseadise baromeetri elavhõbe.

Altimeetri kontrollimine eelkirjeldatud tabelite abil toimub lk. 80 kirjeldatud aparaadiga (joonis 45). Enne kontrollitava altimeetri asetamist kontrollaparaadi kupli alla reguleeritakse altimeeter sääraselt, et ta kupli all õhurõhumisel 760 mm Hg (elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ temperatuuril 761,8 mm Hg) näitaks nullkõrgust, kuna hüpsomeetrilistes tabelites see rõhumine vas-tab nullkõrgusele. Näiteks kui kontrollaparaadi kõrgusel õhkkonna rõhu-mine on 754 mm ja kontrollimise aluseks on $+10^{\circ}\text{C}$ isothermiline õhkkond, siis et selle õhkkonna tingimustes altimeeter 760-mm rõhumise puhul näitaks nullkõrgust, peab altimeeter enne kupli alla asetamist näitama kõrgust, mis $+10^{\circ}\text{C}$ isothermilise õhkkonna tingimustes vastab kontrollaparaadi kõrgusel teotsevale vaba õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele, s. o. 754 millimeet-rile. Antud juhul on mainitud kõrgus 66 m, sest tabelist 36 leiame, et $+10^{\circ}\text{C}$ temperatuuril 754- ja 760-mm rõhumise vahe puhul baromeetriline kõrgus-
aste on 11 meetrit ning seega 6-mm rõhumise muutusele vastab kõrgus 66 meetrit. Kui altimeetri instrumentaalsel veal 760-mm rõhumise lähedal on tähelepanuväärne suurus, siis kõrgus 66 m tuleb korrigeerida selle instrumen-taalse veaga, mille leiame, kui 66 m näitamiskõrgusele seatud altimeetri ase-tame kontrollaparaadi kupli all 760-mm rõhumise alla (elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ temperatuuril 761,8-mm). Selle rõhumise juures altimeetri poolt näidatud kõrgus ongi otsitav instrumentaalne viga.

Kui kontrollaparaadi kupli all altimeeter on eelkirjeldatud viisil sea-tud null-lugemile, hakatakse kupli all muutma õhu rõhumist vastavalt hüpso-meetrilistes tabelites antud rõhumistele ja võrreldakse vastavate rõhumiste juures altimeetri lugemeid tabelis antud kõrgustega. Vahe, mille saame lahu-tades tabelis antud kõrgusest altimeetri poolt näidatud kõrguse, ongi antud kõrgusele vastav instrumentaalne viga.

Toome sellekohase näite. Altimeetri astmik on kalibreeritud rahvus-vahelise standarse õhkkonna järgi. Kontrollaparaadi kupli all elavhõbebaro-meetri järgi on rõhumine 433,9 mm (elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ temperatuuril), mis rahvusvahelise standardse õhkkonna tingimustes vastab kõrgusele

4500 m (vt. tabelit 39). Kupli all kontrollitav altimeeter aga näitab kõrgust 4680 m, seega altimeetri instrumentaalne viga vastavalt sellele lugemile on $4500 - 4680 = -180$ m.

Altimeetri instrumentaalsed vead võivad olla kahesugused: vead, mis esinevad õhurõhumise vähenemise puhul (tõusul), ja vead, mis esinevad õhurõhumise suurenemisel (laskumisel). Ühel ja samal hüpsomeetrilisel kõrgusel esineva tõusu ja laskumise instrumentaalsete vigade vahe annab surveelemendi elastsuse hüstereesist ehk nn. järeldedeformatsioonist tingitud vea. Selle vea suuruse järgi võib otsustada altimeetri kõlblikkuse üle. Headel altimeetritel elastsuse hüstereesist tingitud viga normaalse tõusu- ja laskumiskiiruse puhul harilikult ei ületa 0,1% tõusukõrgusest. Surveelemendi elastsuse hüstereesist, s. o. järeldedeformatsioonist, on tingitud nähtus, et lennuki maandumisel altimeeter näitab veel teatavat kõrgust, kuigi õhkkonna rõhumine aerodroomi kõrgusel on sama kui oli lennuki startimisel. Selle vea suurus oleneb tõusu kõrgusest, lennu kestusest antud kõrgusel ja laskumise kiirusest. Harilikult järeldedeformatsioonist tingitud viga ei ületa maandumisel 15 meetrit, kui lennuk on 5 tundi viibinud 4500 m kõrgusel.

Altimeetri kontrollimisel peab silmas pidama, et ruumi temperatuur, kus asetseb kontrollaparaat, oleks säärane, mille juures kontrollaparaadi baromeetri elavhõbe omaks temperatuuri $+15^{\circ}\text{C}$, kuna tabelites baromeetrilised rõhumised on antud vastavalt elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ temperatuurile. Peale selle on veel tähtis, et rõhumist kontrollaparaadi kupli all muudetaks nii aeglaselt, et altimeetri lugemi muutus minutis ei ületaks 300 m, sest vastasel korral võivad esineda suured, surveelemendi elastsuse hüstereesist tingitud vead. Üldiselt, mida aeglasemalt muudame rõhumist kupli all, seda väiksem on järeldedeformatsioonist tingitud viga.

Täpse korrektsioonidiagrammi ehitamiseks kontrollitakse altimeetri lugemeid hüpsomeetriliste tabelite järgi iga 100-m kõrgusvahe järel nii tõusu kui laskumise tingimustes. Kontrollimise andmed ja arvutlused on soovitatav korraldada alljärgneva tabeli 29 eeskujul.

Samal alusel võib toimuda ka kõrgusbarograafi kontrollimine ja temale vastava korrektsioonidiagrammi või -tabeli koostamine.

Tabeli esimesse lahtrisse märgitakse altimeetri kontrollimise aluseks võetud õhkkonna hüpsomeetrilised kõrgused z_1 . Teise lahtrisse märgitakse esimese lahtri hüpsomeetrilistele kõrgustele vastavate õhurõhumiste juures altimeetri poolt näidatud kõrgused z_0 , kui rõhumist kontrollaparaadi kupli all vähendame kontrollimise algkõrgusest kuni kontrollimise lõppkõrguseni, mis vastab lennuki tõusu tingimustele. Kolmandasse lahtrisse märgitakse valemi

$$\varepsilon = z_1 - z_0 \quad \dots \dots \dots (187)$$

järgi arvutatud, altimeetri igale lugemile vastav, lennuki tõusu olukorras esinev instrumentaalne viga ε . Neljandasse lahtrisse märgitakse esimese lahtri hüpsomeetrilistele kõrgustele vastavate õhurõhumiste juures altimeetri poolt näidatud kõrgused, kui rõhumist kontrollaparaadi kupli all suurendame maksimaalsest kontrollimise kõrgusest kuni kontrollimise algkõrguseni. See olukord vastab lennuki laskumise tingimustele. Viiendasse lahtrisse märgitakse altimeetri instrumentaalne viga laskumise tingimustel ja kuuendasse — surveelemendi elastsuse hüstereesist tingitud viga.

T a b e l 29. Altimeetri kontrollimise tabel.

Kontrollimise aeg „.....“19.....a.

Altimeetri firma nr.....

Kontrollimise aluseks on õhkkond.

Õhu keskmine temperatuur kontrollaparaadi kupli all° C.

I	II	III	IV	V	VI
Kõrgus hüpsomeet- rilise tabeli järgi meetrites	Tõusu tingimustes		Laskumise tingimustes		Elastsuse hüstereesist tingitud viga meetrites
	altimeetri poolt näidatud kõrgus meetrites	viga meetrites	altimeetri poolt näidatud kõrgus meetrites	viga meetrites	
z_1	z_0	$\varepsilon = z_1 - z_0$	z'_0	$\varepsilon' = z_1 - z'_0$	$\varepsilon - \varepsilon' = z'_0 - z_0$
0					
100					
200					
300					
.					
.					
.					
.					
.					

Valemist (187) nähtub, et instrumentaalsel veal ε on miinusmärk, kui altimeeter näitab hüpsomeetrisest kõrgusest suuremat kõrgust, s. o. kui $z_1 < z_0$. Kui aga altimeeter näitab hüpsomeetrisest kõrgusest väiksemat kõrgust, s. o. kui $z_1 > z_0$, siis on instrumentaalsel veal plussmärk. Valemist (187) järeldame veel, et altimeetri lugemi z_0 järgi hüpsomeetrisest kõrguse z_1 leidmiseks peame altimeetri lugemile juurde arvutama instrumentaalse vea sama märgiga, millega ta on antud, sest kui lahendame valemi (187) hüpsomeetrisest kõrguse z_1 suhtes, leiame:

$$z_1 = z_0 + \varepsilon \dots \dots \dots (188).$$

Kui aga hüpsomeetrisest kõrguse z_1 ja instrumentaalse vea järgi otsime altimeetri vastavat lugemit, siis tuleb hüpsomeetrisest kõrgusele juurde arvutada instrumentaalne viga vastupidise märgiga, s. o.:

$$z_0 = z_1 - \varepsilon \dots \dots \dots (189).$$

Korrektsoonidiagrammi ehitamiseks on vajalikud tabeli 29 lahtrid I, II ja III. Teised kolm lahtrit omavad ainult altimeetri seisukorda hindava kontrolli tähtsust.

Altimeetri korrektsioonidiagrammi näide on antud joonisel 58¹⁾. Diagrammi keskjoonele *00* on märgitud kõrgused meetrites ja ülemisele horisontaaljoonele keskjoonest paremale poole plussmärgiga ning keskjoonest vasakule poole miinusmärgiga instrumentaalsete vigade väärtused meetrites.

Instrumentaalse vea väärtuse leiame diagrammilt joone *A* järgi. Veaga korrigeeritud altimeetri lugem annab hüpsomeetrilise kõrguse altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustes. Näiteks: altimeeter näitab kõrgust 2300 m; diagrammilt leiame 2300 m kõrgusele vastava vea väärtuse, -150 meetrit (joonlõik *cd* keskjoonelt *00* — 2300 m kõrguse kohalt — mööda horisontaali kuni jooneni *A*); seega altimeetri lugemile vastav hüpsomeetiline kõrgus on $2300 - 150 = 2150$ m.

Sama diagrammi (joon. 58) joone *B* järgi on võimalik arvutada lugemit, mida altimeeter peab näitama, et lennuk lendaks altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustes ettemääratud kõrgusel. Olgu näiteks vaja leida altimeetri lugem, mille puhul lennuk asuks kõrgusel 2300 m altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustes. Vastava korrektsiooni leiame analoogiliselt eelmisele näitele, s. o. korrektsiooni annab keskjoonelt 2300 m kõrguse kohalt kuni jooneni *B* mööda horisontaali võetud joonlõik *dm*, mille väärtus vastab antud juhul $+159$ meetrile. Seega eelantud tingimuse täitmiseks altimeeter peab näitama kõrgust $2300 + 159 = 2459$ m.

Joone *A* ehitamine diagrammil toimub järgmiselt. Tabeli 29 lahtris III antud vea väärtused kantakse diagrammile joonlõikudena, vastavas mõõdus, keskjoonelt *00* mööda horisontaale, lahtris II antud kõrguste kohalt, plussmärgiga vead paremale poole ja miinusmärgiga vead vasakule poole keskjoont. Ühendades nii saadud joonlõikude lõpp-punktid omavahel joonega, saamegi joone *A*. Joone *B* saamiseks kantakse diagrammile lahtrist III vea väärtused samal viisil ja samas mõõdus, kuid lahtris I antud kõrguste kohalt ja plussmärgiga vead vasakule ning miinusmärgiga vead paremale poole keskjoont, muutes sellega vigade märgid vastavalt võrrandile (189) vastupidisteks, mille tõttu altimeetri lugemi leidmiseks tuleb hüpsomeetrilisele kõrgusele juurde arvata diagrammist saadud vea väärtus sama märgiga.

Kui korrektsioonijoon *A* on üldiselt lame murdjoon ja altimeetri astmiku näitamis-ulatus on 4—6 km ning instrumentaalvead ei oma suuri väärtusi, siis ei ole erilist vajadust korrektsioonijoonet *B* järgi ja diagramm võib olla ilma jooneta *B*. Sel puhul võib joont *A* tarvitada antud hüpsomeetrilisele kõrgusele vastava altimeetri lugemi leidmiseks, ilma et sellejuures tekiks tähelepanavat viga. Pealegi on kõrguse lugemise täpsus altimeetrilt, mille astmiku ühe ringi ulatus vastab 4—6 kilomeetrile, 10—15 meetrit, nii et eelmainitud vea määramisel on suurem täpsus üleliigne. Joone *A* kasutamisel hüpsomeetrilisele kõrgusele altimeetri vastava lugemi leidmiseks peab silmas pidama, et sel juhul diagrammilt võetud instrumentaalne viga tuleb valemi (189) kohaselt hüpsomeetrilisele kõrgusele juurde arvutada vastupidise märgiga. Näiteks hüpsomeetrilisele kõrgusele 2500 m altimeetri vastava lugemi määramiseks leiame diagrammilt (joon. 58), et sellele kõrgusele vastab joone *A* järgi instrumentaalne viga -162 m. Seega otsitav altimeetri lugem, mis vastab

¹⁾ Diagramm vastab reguleerimata altimeetrile.

hüpsomeetrilisele kõrgusele 2500 m, on $2500 + 162 = 2662$ m. Joone *B* järgi on korrektsioon $+175$ m ja altimeetri lugem $2500 + 175 = 2675$ m. Seega joone *A* järgi arvutlemisel gitime vea 13 meetrit.

Korrektsioonidiagrammi käsitlemisel peab tähelepanu pöörama veel alljärgnevale asjaolule. Diagrammidel nullkõrgus, nagu mainitud, vastab õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele 760 mm ehk 1013,2 mb. Kui altimeeter on seatud nullkõrgusele õhkkonna rõhumise juures 760 mm, siis saame diagrammilt sääraselt korraldatud altimeetri lugemitele täpsed instrumentaalse vea väärtused. On aga altimeeter seatud nullkõrgusele kas suurema või väiksema õhurõhumise juures kui 760 mm, siis see on võrdne korrektsioonidiagrammi koordinaatide algpunkti *O* ja kõrgustelje *OO* rööbitise edasipaigutamise korrektsioonikõvera uude punkti, mille ordinaat algkoordinaatide süsteemis võrdub kõrgusega, mis vastab altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustes sellele baromeetrilisele rõhumisele, mille juures altimeeter seati nullkõrgusele, ja abstsiss — instrumentaalsele veale, mida altimeeter omab uue nullkõrguse juures algkoordinaattelgede süsteemi järgi. Eelõeldu on kehtiv diagrammi nii *A*- kui ka *B*-joone kohta. Näiteks kui altimeeter seati nullkõrgusele õhkkonna rõhumise juures 700 mm, siis korrektsioonidiagrammil (joon. 58) joone *A* nullpunkt *O* paigutub punkti *a*, mille ordinaat on $(760 - 700) \cdot 11,3 = 678 \text{ m}^1$ ja abstsiss — 678-meetrilisele kõrgusele vastav instrumentaalne viga -35 m. Tõmmates läbi selle punkti joone *O'O'* rööbiti endise kõrgusteljega, saame uue kõrgustelje, mille järgi peame arvutama instrumentaalseid vigu vastavalt altimeetri uuele nullkõrgusele. Instrumentaalset viga võime arvutada ka endise kõrgustelje järgi, kuid sel puhul peame altimeetri lugemile antud juhul juurde arvutama $+678$ m ja nii saadud kõrguse järgi otsima diagrammist instrumentaalse vea, millest arvutame maha 35 m, s. o. uue nullpunkti *a* abstsissi. Analoogiliselt toimub ka antud hüpsomeetrilisele kõrgusele altimeetri vastava lugemi leidmine.

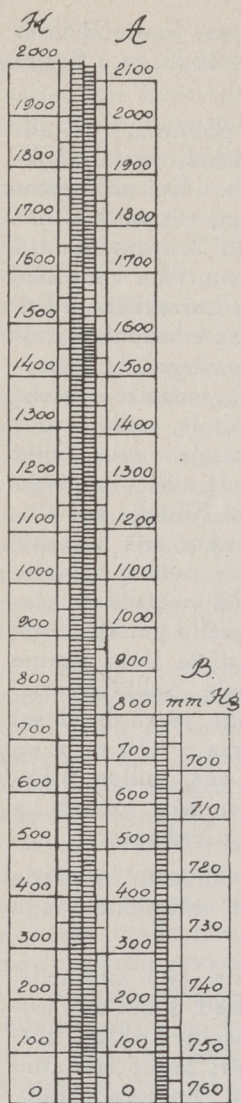
Praktiliselt on joonisel 58 antud diagrammi asemel lihtsam käsitleda ühes ja samas mõõtkavas ehitatud kahte kõrvutiasetsevat astmikku, nagu näidatud joonisel 59²⁾.

Astmik *A* tuleb ehitada vastavalt tabeli 29 teise lahtri (II) andmeile, s. o. astmikule *A* kantakse altimeetri poolt näidatud kõrgused, kuna aga astmikule *H* — sama tabeli esimeses lahtris (I) antud hüpsomeetrilised kõrgused. Nii korraldatud astmikude abil on lihtne altimeetri poolt näidatud kõrgusi ümber arvutada hüpsomeetrilisteks kõrgusteks ja ümberpöördukt. Näiteks kui altimeeter näitab kõrgust 2050 m, leiame astmikult *H*, et altimeetri sellele lugemile vastab hüpsomeetriline kõrgus 1922 m. Samuti leiame, et hüpsomeetrilisele kõrgusele 1500 m vastab altimeetri lugem 1640 meetrit, jne.

Joonisel 59 antud astmikude *A* ja *H* nullkõrgus vastab õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele 760 mm ehk 1013,2 mb, aga kui teha astmik *H*

¹⁾ 11,3 m on 760- ja 700-mm baromeetriliste rõhumiste keskmine kõrgusaste vastavalt altimeetri kontrollimise aluseks võetud õhkkonna 760- ja 700-mm rõhumiste vahelise õhusamba keskmisele temperatuurile. Antud juhul vastavalt $+10^{\circ}\text{C}$ (isoterm $+10^{\circ}\text{C}$).

²⁾ Astmikud *A* ja *H* on ehitatud vastavalt joonisel 58 antud diagrammi andmeile.



Joon. 59.

liikuvana mööda astmikku A, s. o. ehitada astmikud A ja H vastava arvutuslükati kujul, millel astmik A on paigalseisev, on võimalik arvutamist toimetada iga uue nullkõrguse järgi. Sel puhul tuleb astmiku H nullkriips seada astmiku A kõrgusjaotisele, mis vastab altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna tingimustes sellele baromeetrilisele rõhumisele, mille juures altimeeter seati uuele nullkõrgusele. See jaotis astmikul A ongi uueks nullkriipsuks. Eeltähendatud tehe on samane joonisel 58 antud diagrammil koordinaattelgedede edasipaigutamisega uude nullpunkti.

Arvutlemist uue nullkriipsu järgi, kui ta asub kõrgemal astmiku A ehituse nullkriipsust, s. o. nullkriipsust, mis vastab baromeetrilisele rõhumisele 760 mm, tuleb toimetada järgmiselt.

Altimeetri lugemile vastava hüpsomeetrilise kõrguse leidmiseks arvutame altimeetri lugemile juurde astmiku A uue nullkriipsu kõrguse. Nüüd otsime saadud arvule vastava jaotuskriipsu astmikult A ja selle kriipsuga kohastikku olev kriips astmikul H määrabki otsitava hüpsomeetrilise kõrguse.

Hüpsomeetrilisele kõrgusele altimeetri vastava lugemile leidmiseks otsime astmikult H antud hüpsomeetrilise kõrguse jaotuskriipsu. Selle jaotisega astmikult A kohastikku olevast arvust lahutame astmiku A uue nullkriipsu kõrguse. Saadud arv on otsitav altimeetri lugem.

Juhul, kui uus nullkriips asub allpool astmiku A ehituse nullkriipsu ¹⁾, s. o. kui altimeeter on seatud nullile 760 mm-st kõrgema baromeetrilise rõhumise juures, siis, nagu seda lihtne järeldada, tuleb altimeetri lugemile vastava hüpsomeetrilise kõrguse leidmiseks astmiku A uue nullkriipsu kõrgus altimeetri lugemist maha arvutada, jne.

Astmikul A uue nullkriipsu määramise lihtsustamiseks võib vastavalt astmiku A kõrgustele ehitada astmiku A juurde altimeetri kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna baromeetriliste rõhumiste astmiku. See astmik on joonisel 59 märgitud tähega B.

Altimeetrite puhul, millede instrumentaalsed vead võimalikkude nullkõrguste intervallile vastavate baromeetriliste rõhumiste juures on väiksemad antud altimeetri

astmiku lugemise täpsusest või sellega võrdsed, ei ole liikuva astmiku H järelle vajadust, sest ei ole mingit mõtet arvutlusi toimetada suurema täpsusega, kui seda on altimeetri lugem. Järelikult ka astmikud A, H ja B tuleb ehitada vastavalt altimeetri astmiku lugemise täpsusele.

Kuna altimeetrite astmikud on kalibreeritud kas $+10^{\circ}\text{C}$ isothermilise või rahvusvahelise standardse õhkkonna alusel, siis peab sellele vastavalt toimuma ka altimeetri kontrollimine, s. o. kas isothermilise või rahvusvahelise stan-

¹⁾ Joonisel 59 astmik A ei sisalda jaotisi allpool astmiku ehituse nullkriipsu.

dardse õhkkonna tabeli järgi. Juhul, kui näiteks altimeetri astmik on ka libreeritud rahvusvahelise standardse õhkkonna alusel ja altimeetri kontrolimist teostatakse isothermilise õhkkonna hüpsomeetrilise tabeli järgi, siis saadud instrumentaalsete vigade väärtused on, eriti suurtel kõrgustel, tõelistest vigadest suuremad, nagu seda järeldame hüpsomeetrilistes tabelites 39 ja 40 antud baromeetriliste rõhumiste võrdlusest. Mis puutub meie geograafilise laiusse mõjusse hüpsomeetrilistele kõrgustele, siis sellest tingitud viga on praktiliselt tähtsusetu. Näiteks 10000 m kõrguse puhul on see viga ~ 14 m, 5000 m puhul ~ 6 m ja 2000 m puhul ~ 3 m.

Peale instrumentaalsete ja surveelemendi elastsuse hüstereesist tingitud vigade esineb altimeetritel veel temperatuurilisi ja aja- ehk nn. sekulaarvigu.

Altimeetri temperatuuriline viga (vt. lk. 80) on tingitud temperatuuri mõjust survelemendi materjali elastsuse moodulile ja osuti mehhanismi üksikosade paisumisest vastavalt temperatuuri muutustele. Vea suurus oleneb surveelemendi ja osuti mehhanismi materjalist ning konstruktsioonist. Praegusaegsete mõõteriistade temperatuuriline viga õhurõhumistel kuni 350 mm Hg ja temperatuuri muutuste piires $\pm 40^{\circ}\text{C}$ tavaliselt ei ületa 30 meetrit.

Aja- ehk sekulaarviga on tingitud altimeetri mehhanismis esinenud sise-pingete järelmõjust. Sekulaarvea suurus on kuni 30 m, kui mõõteriist on 15 kuud seisnud toatemperatuuris.

Kõigi eelloetletud altimeetri vigade summaarne väärtus reguleeritud altimeetritel näitamis-intervalliga -300 m kuni 7000 m, õhurõhumise muutumisel vastavalt kõrguse muutumisele 305 m minutis, ei tohi inglise määruste kohaselt ületada alljärgnevaid piire:

-300 m kuni kõrguseni	600 m lubatav viga	± 6 m
600 „ „ „	2000 „ „ „	± 10 „
2000 „ „ „	3200 „ „ „	± 15 „
3200 „ „ „	4200 „ „ „	± 20 „
4200 „ „ „	5200 „ „ „	± 25 „
5200 „ „ „	6000 „ „ „	± 31 „

Eelantud instrumentaalsete vigade puhul esineva temperatuuri-kõrvalekaldumise suhtes lubavad eeskirjad alates 1524 -m standardiselt kõrguselt temperatuuri erinevust standardse õhkkonna temperatuurist 10°C võrra.

Kõrguste jaoks kuni 1520 meetrini võib temperatuuri kõikumus olla:

0 m kõrgusel	-5°C kuni	$+35^{\circ}\text{C}$
300 „ „	-5°C „	$+31^{\circ}\text{C}$
600 „ „	-5°C „	$+27^{\circ}\text{C}$
900 „ „	-5°C „	$+23^{\circ}\text{C}$
1200 „ „	-5°C „	$+19^{\circ}\text{C}$
1500 „ „	-5°C „	$+15^{\circ}\text{C}$

Altimeetri lugemitesse vea tekkimist võib põhjustada ka altimeetri asukoht lennukil, kuna lennuki siseruumides lennu ajal õhurõhumine sagedasti erineb välisõhu staatilisest rõhumisest, millest tingitult võib esineda viga kuni 50 meetrit. Selle nähtuse vältimiseks ühendatakse altimeeter staatilise toruga, mis asetab altimeetri surveelemendi välisõhu staatilise rõhumise alla. Ka sel puhul võib veel esineda teatav õhurõhumiste vahe, kuid sellest tingitud viga harilikult ei ületa 10 meetrit.

Altimeetri lugemi korrigeerimine vastavalt vaba õhkkonna temperatuurilisele seisukorrale.

Nagu teame, on kõrgus z vabas õhkkonnas, antud geograafilisel laiusel, kui õhu niiskuse ja raskustungi muutuse mõju kõrguse muutumisel arvame võrdseks nulliga, funktsionaalne suurus kahest argumendist — õhkkonna rõhumisest ja õhkkonna temperatuurist, s. o.

$$z = f(b, t).$$

Altimeetri lugem on aga üldiselt funktsionaalne suurus ainult õhkkonna rõhumisest ja seega altimeter ei näita kõrguse muutust, mis on tingitud õhkkonna temperatuurilisest muutusest. Järelikult näitab altimeter vabas õhkkonnas tõelist kõrgust ainult siis, kui vaba õhkkonna temperatuuriline seisukord ühtub altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna temperatuurilise seisukorraga. Kui aga vaba õhkkonna temperatuuriline seisukord sellest erineb, siis peame tõelise kõrguse leidmiseks altimeetri lugemi korrigerima peale instrumentaalse vea veel vastavalt vaba õhkkonna temperatuurilisele seisukorrale. Korrektsioon on seda suurem, mida enam vaba õhkkonna temperatuuriline seisukord erineb altimeetri astmiku kalibreerimise aluseks võetud õhkkonna omast. Altimeetri lugemi korrigeerimiseks vastavalt vaba õhkkonna temperatuurilisele seisukorrale peame teadma, missuguse korrapärase õhkkonna järgi on altimeter kontrollitud, s. o. missuguse korrapärase õhkkonna järgi on koostatud altimeetri instrumentaalse vea diagramm.

Kui altimeter on kontrollitud isotermilise õhkkonna järgi, mille temperatuur on T , baromeetriline rõhumine nullkõrgusel B_1 ja z_1 -kõrgusel b_1 , siis altimeetri poolt näidatud kõrgus z_1 , korrigeeritult instrumentaalse veaga, avaldub võrrandiga (133):

$$z_1 = R_0 T \cdot \ln \frac{B_1}{b_1} \dots \dots \dots (190).$$

Kui tähistame vaba õhkkonna baromeetrilise rõhumise mõõtmise algpunktis, s. o. nullkõrgusel, tähega B , kõrgusel z tähega b ja kõrguseni z ulatava õhusamba keskmise temperatuuri tähega T_k , siis avaldub kõrgus z sama võrrandiga (133) kujul:

$$z = R_0 T_k \cdot \ln \frac{B}{b} \dots \dots \dots (191).$$

Oletame, et vabas õhkkonnas kõrguse mõõtmise algpunktis baromeetrilise rõhumise B puhul altimeter on seatud nullile ja kõrgusel z , kus baromeetriline rõhumine on b , altimeter näitab instrumentaalse veaga korrigeeritud kõrgust z_1 meetrit, siis sel puhul on võrdsed võrrandid (190) ja (191)

baromeetriliste rõhumiste suhete logaritmid, s. o. $\ln \frac{B_1}{b_1} = \ln \frac{B}{b}$, kuna üles seatud tingimuste kohaselt altimeetri surveelemendile nullkõrgusel mõjub õhkkonna rõhumine $B = B_1$ ja kõrgusel z , kus altimeter näitas kõrgust z_1 — õhkkonna rõhumine $b = b_1$.

Järelikult jagades võrrandi (191) võrrandiga (190) saame pärast võrdsete suuruste koondamist:

$$\frac{z}{z_1} = \frac{R_0 T_k \ln \frac{B}{b}}{R_0 T \ln \frac{B_1}{b_1}} = \frac{T_k}{T}, \text{ s. o.}$$

$$\frac{z}{z_1} = \frac{T_k}{T} \dots \dots \dots (192).$$

Lahendades saadud võrrandi (192) kõrguse z suhtes ja asendades altimeetri astmiku aluseks võetud isotermilise õhkkonna temperatuuri tema arv-
väärtusega $T=283$ (vt. lk. 136), saame korrigeeritud võrrandi altimeetri
poolt näidatud kõrguse korrigeerimiseks vastavalt vaba õhkkonna tempera-
tuurilisele seisukorrale:

$$z = z_1 \frac{T_k}{283} \dots \dots \dots (193).$$

Võrrandis (193), nagu varemalt juba öeldud, on z otsitav tõeline kõr-
gus, z_1 — altimeetri poolt näidatud kõrgus, mis korrigeeritud instrumentaalse
veaga, ja T_k — mõõtekõrgusega õhusamba keskmine absoluutne tempe-
raatuur.

Õhusamba keskmise absoluutse temperatuuri arvutus toimub võr-
randiga:

$$T_k = \frac{T_0 + T_1}{2},$$

või võrrandiga:

$$T_k = 273 + \frac{t_0 + t_1}{2},$$

kus T_0 ja t_0 on vaba õhkkonna temperatuur kõrguse mõõtmise algpunktis,
s. o. kõrgusel, mille juures altimeeter seati nullile, ja T_1 ning t_1 — vaba õhk-
konna temperatuur mõõtekõrgusel. Temperatuur t_1 (või T_1) määratakse alti-
meetri lugemi z_1 määramise momendil.

Temperatuurid t_0 ja t_1 on arvatud Celsiuse nullist; allpool Celsiuse null-
punkti tuleb t_0 ja t_1 võtta võrrandisse miinusemärgiga.

Suurte kõrguste puhul, kui esinevad temperatuurilised inversioonid, peab
täpse kõrguse leidmiseks keskmise temperatuuri arvutama täpsemate võrran-
ditega (vt. lk. 49 jj.).

Vaba õhkkonna temperatuurilisest seisukorrast tingitud vea suuruse
leiame, kui võrrandi (193) mõlematest pooltest lahutame altimeetri poolt
näidatud kõrguse z_1 , s. o.

$$z - z_1 = z_1 \frac{T_k}{283} - z_1 = z_1 \frac{T_k - 283}{283}.$$

Tähistades kõrgusvahe $z - z_1 = \Delta z$, ja $T_k - 283 = t_k$, saame lõplikult:

$$\Delta z = z_1 \frac{t_k}{283} \dots \dots \dots (194).$$

Võrrandis (194) on Δz õhkkonna temperatuurilisest seisukorrast tingi-
tud kõrguseparandus, mis tuleb tõelise kõrguse leidmiseks algebraliselt liita

kindlaks üheaegselt altimeetri lugemi määramisega. Temperatuurid T_0 ja T_1 on arvatud absoluutsest nullpunktist ja vastavad samadele kõrgustele nagu t_0 ja t_1 .

Standardse õhkkonna õhusamba keskmise temperatuuri võime määrata võrrandiga (42) mõõtekõrguse alg- ja lõpp-punkti absoluutsete temperatuuride kaudu. Standardse õhkkonna nullkõrgusel, mis vastab baromeetrilisele rõhumisele 760 mm (ehk 1013,2 mb), on õhu absoluutne temperatuur 288°. Oletame, et altimeeter seati nullile baromeetrilise rõhumise B juures, siis standardse õhkkonna tingimustes kõrguse mõõtmise algpunktis temperatuur on:

$$T_0 = 288 - a(760 - B) \delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (199)^1,$$

kus a on baromeetriliste rõhumiste 760 mm ja B mm keskmine kõrgusaste vastavalt nende rõhumiste vahelise õhusamba keskmisele temperatuurile standardse õhkkonna tingimustes, ja δ — standardse õhkkonna vertikaalne temperatuuri gradient. Samal alusel võime kirjutada avaldise standardse õhkkonna temperatuuri jaoks altimeetri poolt näidatud kõrgusel z_1 , s. o.

$$T_1 = 288 - a(760 - B) \delta - \delta z_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (200).$$

Järelikult mõõtekõrgusega z_1 standardse õhkkonna õhusamba keskmine temperatuur on:

$$T_k' = \frac{T_0 + T_1}{2} = 288 - a(760 - B) \delta - \frac{\delta}{2} z_1.$$

Asendades $\delta = 0,0065^\circ \text{C/m}$, saame arvutusvõrrandi T_k' jaoks lõplikult kujul:

$$T_k' = 288 - 0,0065 a(760 - B) - 0,00325 z_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (201).$$

Juhul, kui B on lähedane 760 mm või kui kõrgust arvatakse merepinalt (hüdroplaanide puhul), siis võime võrrandis (201) liikme $0,0065 a(760 - B)$ arvata võrdseks nulliga ning võrrand avaldub kujul:

$$T_k' = 288 - 0,00325 z_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (202).$$

Kui õhkkonna rõhumine on mõõdetud millibaarides, siis võrrand (201) omab kujul:

$$T_k' = 288 - 0,0065 a(1013,2 - B) - 0,00325 z_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (203).$$

Võrrandis (203) tuleb baromeetriline kõrgusaste a määrata tabelist 36, valides temperatuuri, mis standardse õhkkonna tingimustes on keskmine baromeetrilistele rõhumistele 1013,2 mb ja B mb.

Korrigeeritud võrrandi (198) tuletasime isotermilise õhkkonna alusel. Juhul, kui vaba õhkkonna vertikaalne keskmine temperatuuri gradient ühtub rahvusvahelise standardse õhkkonna omaga, s. o. kui $\delta = 0,0065^\circ \text{C/m}$, siis on võimalik korrigeeritud võrrandit tuletada ka rahvusvahelise standardse õhkkonna alusel, mis toimub alljärgnevalt.

¹⁾ Vt. võrrandit (144). δ tuleb kõigis võrrandis võtta plussmärgiga, kui temperatuur kõrguse suurenemisel langeb.

Rahvusvahelise standardse õhkkonna tingimustes toimub altimeetri kontrollimine võrrandiga (167):

$$\frac{b}{B_0} = \left(1 - \frac{\delta}{T_0} z\right)^{5,256}$$

Asendades selles võrrandis $T_0 = 288^\circ$ ja andes võrrandi parempoolle ühise nimetaja, saame:

$$\frac{b}{B_0} = \left(\frac{288 - \delta z}{288}\right)^{5,256} \dots \dots \dots (204).$$

Võrrandist (204) järeldame, et rahvusvahelises standardses õhkkonnas antud kõrgusvahele vastavad baromeetrilised rõhumised suhtuvad nagu nendele baromeetrilistele rõhumistele vastavad absoluutsed temperatuurid astmes 5,256. Öeldust järeldame, et kui altimeeter standardse õhkkonna tingimustes on seatud nullile õhkkonna baromeetrilise rõhumise B_1 juures ja näitab kõrgusel, kus õhkkonna baromeetiline rõhumine on b_1 , kõrgust z_1 , siis võime võrrandi (204) põhjal kirjutada vahekorra:

$$\frac{b_1}{B_1} = \left(\frac{288 - a(760 - B_1)\delta - \delta z_1}{288 - a(760 - B_1)\delta}\right)^{5,256} \dots \dots \dots (205),$$

kus avaldis $288 - a(760 - B_1)\delta - \delta z_1$ on võrrandi (200) järgi õhkkonna absoluutne temperatuur kõrgusel z_1 ja vastab baromeetrilisele rõhumisele b_1 ning avaldis $288 - a(760 - B_1)\delta$ on võrrandi (199) järgi õhkkonna absoluutne temperatuur kõrguse mõõtmise algpunktis, kus altimeeter seati nullile, ja vastab baromeetrilisele rõhumisele B_1 . Võrrandis (205) esinev baromeetiline rõhumine 760 mm vastab standardse õhkkonna nullkõrgusele, kus õhkkonna absoluutne temperatuur on 288° .

Kui vaba õhkkonna keskmine temperatuuri gradient ühtub rahvusvahelise standardse õhkkonna temperatuuri gradiendiga, siis tähistades kõrguse mõõtmise algpunktis õhkkonna baromeetrilise rõhumise tähega B ja kõrgusel z tähega b ning oletades, et kõrgusel z õhkkonna absoluutne temperatuur on T , võime eeltoodu põhjal baromeetriliste rõhumiste suhte avaldada kujul:

$$\frac{b}{B} = \left(\frac{T}{T + \delta z}\right)^{5,256} \dots \dots \dots (206),$$

kus avaldis $T + \delta z$ on õhkkonna absoluutne temperatuur kõrguse mõõtmise algpunktis, s. o. vastavalt baromeetrilisele rõhumisele B .

Oletame, et altimeeter seati nullile õhkkonna baromeetrilise rõhumise juures $B_1 = B$ ja et altimeetri poolt näidatud kõrgusel z_1 , mis on korrigeeritud instrumentaalse veaga, on õhkkonna rõhumine $b_1 = b$, siis sel puhul võrrandite (205) ja (206) vasakpooled on võrdsed. Järelikult peavad võrdsed olema ka samade võrrandite parempooled, s. o. võime kirjutada vahekorra:

$$\left(\frac{T}{T + \delta z}\right)^{5,256} = \left(\frac{288 - a(760 - B)\delta - \delta z_1}{288 - a(760 - B)\delta}\right)^{5,256}$$

Juurides selle võrrandi mõlemaid pooli 5,256-ga ja lahendades võrrandi z suhtes, saamegi otsitava korrigeeritud võrrandi:

$$z = \frac{Tz_1}{288 - a(760 - B)\delta - \delta z_1}.$$

Kui asendame temperatuuri gradiendi tema arvsuurusega $\delta = 0,0065^\circ \text{C/m}$, saame korrigeeritud võrrandi lõplikul kujul:

$$z = \frac{Tz_1}{288 - 0,0065 a(760 - B) - 0,0065 z_1} \quad \dots \quad (207).$$

Juhul, kui altimeeter seatakse nullile õhkkonna rõhumise juures 760 mm (1013,2 mb), siis $B = 760$ mm ning seega korrigeeritud võrrand omab kuju:

$$z = \frac{Tz_1}{288 - 0,0065 z_1} \quad \dots \quad (208).$$

Kui õhkkonna rõhumine on mõõdetud millibaarides, siis korrigeeritud võrrandi (207) kuju on:

$$z = \frac{Tz_1}{288 - 0,0065 a(1013,2 - B) - 0,0065 z_1} \quad \dots \quad (209).$$

Standardse õhkkonna alusel kontrollitud altimeetri jaoks tuletatud korrigeeritud võrranditest kõige täpsemad arvutluse tulemused annab võrrand (198), kuna võrrand (207), nagu mainitud, on maksev juhul, kui vaba õhkkonna temperatuuri gradient suuresti ei erine standardse õhkkonna temperatuuri gradiendist. Sel puhul võrranditega (198) ja (207) saadud arvutluse tulemused ühtuvad.

Vaadeldes eeltoodud korrigeeritud võrrandeid arvutlustehnilisest seisukohast, leiame, et arvutlusteks on kõige lihtsamad isothermilise õhkkonna võrrandid. Seega on soovitav tarvitada altimeetreid, millede astmik on kalibreeritud isothermilise õhkkonna tingimustes.

Praktilisteks otstarveteks on olemas sellekohased kalkulaatorid altimeetri poolt näidatud kõrguste korrigeerimiseks vastavalt vaba õhkkonna temperatuurilisele seisukorrale.

Näide 33.

Altimeeter on kontrollitud $+10^\circ \text{C}$ isothermilise õhkkonna tingimustes ja on seatud nullkõrgusele aerodroomil õhkkonna rõhumise juures 740 mm.

Leida tõeline kõrgus, arvates aerodroomilt, kui õhu temperatuur on aerodroomil -6°C ja kui lennukõrgusel, kus altimeeter näitab kõrgust 2000 m, on õhu temperatuur -16°C .

Esiteks korrigeerime altimeetri lugemi instrumentaalse veaga joonisel 58 antud korrektsoonidiagrammi järgi. Tabelist 36 leiame, et baromeetriline kõrgusaste on 11,0 m, seega korrektsoonidiagrammi uue nullpunkti ordinaat on $11(760 - 740) = 220$ m ja abstsiss, nagu nähtub diagrammilt, -20 m (vt. lk. 138). Aluseks võttes uue nullpunkti leiame, et altimeetri lugemile 2000 m vastab instrumentaalne viga -126 m. Järelikult altimeetri korrigeeritud lugem on

$$z_1 = 2000 - 126 = 1874 \text{ m.}$$

Võrrandi (43) järgi on lennukõrguseni ulatuva õhusamba keskmine temperatuur:

$$T_k = 273 + \frac{-6-16}{2} = 262^\circ.$$

Tõelise kõrguse leiame võrrandiga (193):

$$z = 1874 \frac{262}{283} = 1735 \text{ m.}$$

Näide 34.

Leida $+10^\circ\text{C}$ isothermilise õhkkonna tingimustes kontrollitud altimeetri lugem tõelisele kõrgusele 2500 m, kui õhkkonna baromeetriline rõhumine aerodroomil on 740 mm, temperatuur -4°C ja vaatluste järgi kavatses taval lennukõrgusel on õhu temperatuur -20°C .

Esiteks leiame võrrandiga (43) õhusamba keskmise temperatuuri:

$$T_k = 273 + \frac{-4-20}{2} = 261^\circ.$$

Altimeetri kontrollimise aluseks võetud isothermilise õhkkonna tingimustes kõrgusele 2500 m vastava kõrguse z_1 leiame võrrandiga (196):

$$z_1 = 2500 \frac{283}{261} = 2711 \text{ m.}$$

Instrumentaalse vea määrame joonisel 58 antud diagrammilt. 740-mm baromeetrilise rõhumise puhul on diagrammi uue nullpunkti ordinaat 220 m ja abstsiss, joone B järgi, $+19$ m. Uue nullpunkti järgi kõrgusele 2711 m vastab instrumentaalne viga $+153$ m.

Seega on altimeetri otsitav lugem (vt. lk. 142):

$$z_0 = 2711 + 157 = 2868 \text{ m.}$$

Näide 35.

Altimeeter on kontrollitud rahvusvahelise standardse õhkkonna tingimustes ja on seatud nullkõrgusele aerodroomil. Leida tõeline lennukõrgus, kui õhu temperatuur aerodroomil on $+30^\circ\text{C}$, baromeetriline rõhumine 993 mb ja kui lennukõrgusel, kus altimeeter näitab kõrgust 2800 m, korrigeeritult instrumentaalse veaga, on õhu temperatuur $+18^\circ\text{C}$.

Esiteks leiame vaba õhkkonna ja standardse õhkkonna lennukõrgusele vastavate õhusammaste keskmised temperatuurid.

Võrrandi (43) järgi on vaba õhkkonna õhusamba keskmine absoluutne temperatuur:

$$T_k = 273 + \frac{30+18}{2} = 297^\circ.$$

Standardse õhkkonna õhusamba keskmise temperatuuri leidmiseks määrame enne kindlaks rõhumisele 1013 mb ja 993 mb vastava keskmise baromeetrilise kõrgusastme. Nendele rõhumistele standardse õhkkonna tingimustes vastab keskmine temperatuur $\sim +14,4^\circ\text{C}^1$) ja keskmine baromeetriline rõhumine $(1013+993):2=1003$ mb. Järe-

¹⁾ Vt. tabelit 37.

likult võime suuremat viga tegemata valida kõrgusastme vastavalt rõhumisele 1000 mb ja temperatuurile $+15^{\circ}\text{C}$. Tabelist 36 leiame nende suuruste järgi kõrgusastme $a=8,4$ m. Standardse õhkkonna õhusamba keskmise absoluutse temperatuuri saame nüüd määrata võrrandiga (203):

$$T_k' = 288 - 0,0065 \cdot 8,4(1013,2 - 993) - 0,00325 \cdot 2800 = 277,8^{\circ}.$$

Teades keskmisi temperatuure T_k ja T_k' saame võrrandiga (198) leida täpse kõrguse vastavalt vaba õhkkonna tingimustele:

$$z = 2800 \frac{297}{277,8} = 2994 \text{ m.}$$

Kui standardse õhkkonna õhusamba keskmise temperatuuri arvutame võrrandiga (202), s. o. kui jätame tähele panemata asjaolu, et altimeeter seati nullile rõhumisel 993 mb, siis leiame keskmise temperatuuri jaoks väärtuse:

$$T_k' = 288 - 0,00325 \cdot 2800 = 278,9^{\circ}.$$

ja otsitavaks lennukõrguseks saame sel puhul:

$$z = 2800 \frac{297}{278,9} = 2982 \text{ m.}$$

Järelikult võrrand (198) annab keskmise temperatuuri puhul $278,9^{\circ}$ vea $2994 - 2982 = 12$ m.

Võrrandi (208) järgi on otsitav kõrgus:

$$z = \frac{(273 + 18) \cdot 2800}{288 - 0,0065 \cdot 2800} = 3020 \text{ m,}$$

ja võrrandi (209) järgi:

$$z = \frac{(273 + 18) \cdot 2800}{288 - 0,0065 \cdot 8,4(1013,2 - 993) - 0,0065 \cdot 2800} = 3032 \text{ m.}$$

Lennukõrguse korrigeerimine vastavalt lennu- suunas esinevale õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele ja maakoha kõrgusele.

Pikematel lendudel, ühelt aerodroomilt teisele jne., tuleb tõelise kõrguse määramiseks peale eelkirjeldatud korrigeerimiste arvestada veel korrigeerimisi, mis on tingitud maakoha kõrgusest merepinnalt ja horisontaalsuunas esinevast õhkkonna rõhumise muutuvusest. Kui horisontaalsuunas esineb õhkkonna rõhumise muutumine, siis lendamisel altimeetri järgi konstantsel kõrgusel, ei toimu lend mitte mööda horisontaalpinda, vaid mööda samarõhupinda (isobaarpinda), sest altimeetri lugem on funktsioon õhkkonna rõhumisest. Peale selle, lennuki saabudes sihtkohta, ei näita altimeeter, mis lähtekohas seatud nullile, kõrgust ei lähtekoha sihtkoha horisontaalpinnalt, vaid lähtekohta läbistavalt isobaarpinnalt arvates.

Korrigeerimise võrrandi tuletamiseks oletame, et lend toimub punktist L (lähtekoht) punkti S (sihtkoht). Olgu lähtepunkti L (vt. joonist 60) kõrgus merepinnalt $\overline{LP} = h_1$ meetrit ja õhkkonna baromeetriline rõhumine samas punktis b_1 , mille taandatult merepinna kõrgusele tähistame tähega B_1 . Siht-

a_L — baromeetriliste rõhumiste B_1 ja b_1 keskmine kõrgusaste vastavalt lähtekoha temperatuurile, mille alusel toimus lähtekohas teotseva baromeetrilise rõhumise b_1 taandamine merepinna kõrgusele;

a'_s — baromeetriliste rõhumiste B_1 ja b_1 keskmine kõrgusaste vastavalt isobaarpindade B_1 ja b_1 vahelise õhusamba keskmisele temperatuurile sihtpunkti vertikaalil, s. o. vastavalt kõrgusvahe $\overline{KN}$ õhusamba keskmisele temperatuurile.

Asendades võrrandis (a) $\overline{MK}$ ja $\overline{KN}$ nende eelantud avaldistega, saame korrektsioonivõrrandi kujul:

$$\Delta z = (h_1 - h_2) + (a'_s - a_L)(B_1 - b_1) - a_s(B_1 - B_2) \dots \dots (b).$$

Kui sihtpunkti vertikaalil õhkkonna temperatuuriline seisukord ühtub või ainult vähe eraldub lähtepunkti vertikaali õhkkonna temperatuurilisest seisukorrast, nagu see enamasti aset leiab, siis võime baromeetrilised kõrgusastmed a'_s ja a_L arvata võrdseteks, mille tõttu korrektsioonivõrrandis (b) liige $(a'_s - a_L)(B_1 - b_1)$ muutub nulliks ning seega võrrand omandab praktiliste arvutluste jaoks kuju:

$$\Delta z = (h_1 - h_2) - a_s(B_1 - B_2) \dots \dots \dots (210).$$

Võrrandis (210) on:

Δz korrektsioon meetrites, mille peab altimeetri poolt sihtpunkti kohal näidatud kõrgusele z märgi kohaselt juurde arvutama, et leida lennuki tõelist kõrgust z' sihtpunkti kohal; enne selle korrektsiooni tegemist peab altimeetri lugemi korrigeerima instrumentaalse veaga ja taandama sihtpunkti kohal oleva õhu temperatuurilisele seisukorrale;

h_1 — lähtepunkti kõrgus merepinnalt meetrites;

h_2 — sihtpunkti kõrgus merepinnalt meetrites;

B_1 — baromeetriline rõhumine lähtepunktis taandatult merepinna kõrgusele;

B_2 — baromeetriline rõhumine sihtpunktis taandatult merepinna kõrgusele;

a_s — baromeetriliste rõhumiste B_1 ja B_2 keskmine kõrgusaste, mille võime valida ilma tähelepandevat viga tegemata vastavalt temperatuurile, mille alusel toimus sihtpunkti baromeetrilise rõhumise taandamine merepinna kõrgusele.

Baromeetriliste rõhumiste B_1 ja B_2 suhtes peab silmas pidama järgmisi asjaolusid:

1) Kui lähte- ja sihtpunkti geograafilised laiused on suuresti erinevad (üle 15°) ja õhkkonna baromeetriline rõhumine määratakse elavhõbe-baromeetriga, siis B_1 ja B_2 peab taandama 45° geograafilisele laiuzele. Aneroid-baromeetri puhul, kui korrektsioonidiagramm või -tabel on koostatud vastavalt 45° geograafilisele laiuzele, langeb see nõue ära (vt. lk. 79).

2) Kui lend vältab kaua ja sihtpunktis baromeetriline rõhumine B_2 on tõusmas või langemas, peab seda Δz arvutlemisel arvestama.

Kui soovitakse, et sihtpunktis ei oleks vajalik teha võrrandiga (210) määratavat korrektsiooni, s. o. kui soovitakse, et altimeeter sihtpunkti horisontaalil näitaks nullkõrgust, siis peab lähtepunktis altimeetri osuti seadma

mitte nullile, vaid korrektsiooni Δz väärtusele, kusjuures korrektsiooni Δz märk tuleb muuta vastupidiseks. Näiteks, kui korrektsioon Δz on $+80$ meetrit, peab altimeetri osuti seadma nulli asemel kõrgusele -80 meetrit.

Näide 36.

Lähtepunkti kõrgus merepinnalt on $h_1=40$ m ja baromeetriline rõhumine taandatud merepinna kõrgusele $B_1=760$ mm. Sihtpunkti kõrgus merepinnalt on $h_2=100$ m ja baromeetriline rõhumine taandatud merepinna kõrgusele $B_2=755$ mm. Määrata lennuki kõrgus sihtpunkti kohal, kui altimeeter, mis lähtepunkti seatud nullile, näitab sihtpunkti kohal kõrgust, mis korregeeritud instrumentaalse veaga ja vaba õhkkonna temperatuurilise seisukorraga, $z=1000$ m. Õhu keskmine temperatuur sihtpunktis on $+15^\circ\text{C}$.

Antud juhul on baromeetriline kõrgusaste tabeli 36 järgi:

$$a_s=11,15 \text{ m.}$$

Otsitav korrektsioon võrrandi (210) järgi on:

$$\Delta z=(40-100)-11,15(760-755)=-116 \text{ m.}$$

Seega lennuki kõrgus sihtpunkti kohal on:

$$z'=1000-116=884 \text{ m.}$$

Näide 37.

Lahendada eelmine ülesanne, kui $h_1=80$ m, $h_2=40$ m, $B_1=750$ mm, $B_2=760$ mm ja $z=1000$ m.

Võrrandi (210) järgi on korrektsioon:

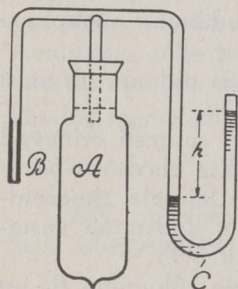
$$\Delta z=(80-40)-11,15(750-760)=151,5 \text{ m.}$$

Seega lennuki kõrgus sihtpunkti kohal on:

$$z'=1000+151,5=1151,5 \text{ m.}$$

Variomeetrid.

Peale altimeetrite töötavad õhkkonna rõhumise muutumise mõjul veel nn. variomeetrid. Viimaste ülesandeks on näidata lennuki tõusu või laskumise kiirust ja olla kontrollabinõuks täpse horisontaalse lennu teostamiseks¹⁾, mille järele on tarvidust näiteks marsruutsete fotode tegemisel, pomide pildumisel jne.



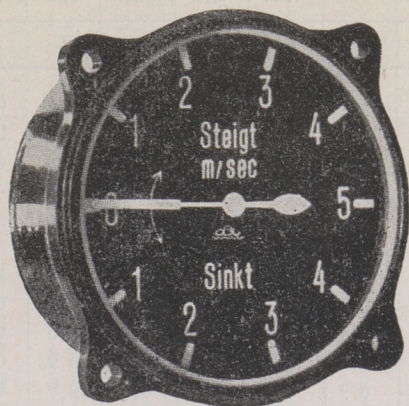
Joon. 61.

Variomeetri üldvaade on näidatud joonisel 62. Variomeeter koosneb termos pudelist A (joon. 61), milles asuv õhk on välisõhust soojuslikult isoleeritud, vedelikmanomeetrist C ja kapillaartorust B . Nii vedelikmanomeeter C kui ka kapillaartoru B on ühendatud termos pudelis asuva õhuga. Kapillaartoru ülesandeks on ühendada termos pudelit välisõhuga nii, et termos pudelis asuva õhu rõhumine pidevalt püüaks tasakaalustada välisõhu rõhumisega, kuna manomeeter C on termos pudelis asuva õhu ja välisõhu rõhumiste vahe näitamiseks.

Variomeeter töötab järgmiselt. Kui näiteks lennuk

¹⁾ Tegelikult lend variomeetri järgi toimub mööda isobaari, kuid mõnekilomeetrisel distantil võime isobaari arvata horisontaalseks.

liigub täpselt horisontaalselt (mööda isobaarpinda), siis termospuudelis asuva õhu rõhumine on kapillaartoru *B* kaudu tasakaalustatud välisõhu rõhumisega ning seega manomeetri *C* nivoopinnad asuvad ühel kõrgusel. Kui aga lennuk tõuseb, siis vedeliku nivoopind hakkab tõusma manomeetri toru välisgarus, sest tõusu puhul ei suuda termospuudelis teotsev õhurõhumine kitsa kapillaar-



Joon. 62.

toru kaudu sel määral tasakaalustuda välisõhu rõhumisega, nagu kõrguse muutumisega välisõhu rõhumine langeb. Selle tagajärjel õhk termospuudelis satub ülerõhu seisukorda, mida näitabki manomeetri välisgarus vedeliku tõusmine. Loomulikult, mida kiiremini lennuk tõuseb, seda suurem on manomeetri nivoopindade vahe. Järelikult vedelikusamba kõrgus nivoopindade vahel annab teatava hinnangu lennuki tõusu kiiruse kohta.

Kui lennuk laskub, tekib termospuudelis alarõhk, mille tagajärjel vedelikusammas tõuseb termospuudelipoolses garus, kusjuures vedeliku tõus oleb laskumise kiirusest.

Vedelikmanomeetrite asemel tarvitatakse enamasti väga tundlikku baromeetrilist surveelementi, mis on toru kaudu ühendatud termospuudeliga, nii et survelemendist mõjutatud osuti vastaval astmikul näitab, kas lend toimub horisontaalselt või leiab aset tõus või langus.

Survelemendiga töötavaid variomeetreid nimetatakse ka statoskoopideks.

T a b e l 30. Korrektsioonid $\Delta b'''$ elavhõbebaromeetri lugemi taandamiseks elavhõbeda
0° C juurde.

$$\Delta b''' = -0,000163 \text{ } tb''.$$

Tempe- ratuur °C	Baromeetri lugem mm Hg											
	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
3,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4,0	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
6,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
6,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
7,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
7,5	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
8,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
8,5	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
9,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
9,5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
10,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3
10,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
11,0	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4
11,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
12,0	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
12,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
13,0	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7
13,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
14,0	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8
14,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
15,0	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9
15,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0
16,0	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1
16,5	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1
17,0	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2
17,5	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3
18,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3
18,5	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4
19,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4
19,5	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5
20,0	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6

Tempe- ratuur °C	Baromeetri lugem mm Hg											
	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
20,5	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
21,0	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7
21,5	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8
22,0	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8
22,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9
23,0	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0
23,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0
24,0	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1
24,5	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1
25,0	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2
25,5	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3
26,0	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
26,5	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4
27,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5
27,5	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5
28,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6

Tabel 31. Elavhõbebaromeetri kapillaarne depressioon mm Hg.
(O. Eggert, „Handbuch der Vermessungskunde“.)

Meniski kõrgus mm	Klaastoru seesmine läbimõõt millimeetrites											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,00	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,3	0,1	0,1	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
0,10	0,6	0,3	0,2	0,12	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
0,15	0,9	0,4	0,3	0,18	0,13	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
0,20	1,1	0,6	0,4	0,24	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
0,25	1,4	0,8	0,5	0,30	0,21	0,15	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
0,30	1,5	0,9	0,6	0,36	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03
0,35	1,8	1,0	0,6	0,42	0,29	0,21	0,15	0,11	0,08	0,07	0,05	0,04
0,40	2,1	1,2	0,7	0,48	0,33	0,24	0,17	0,13	0,10	0,07	0,06	0,04
0,45	2,3	1,3	0,8	0,53	0,37	0,27	0,20	0,15	0,11	0,08	0,07	0,05
0,50	2,5	1,4	0,9	0,59	0,41	0,29	0,22	0,16	0,12	0,09	0,07	0,05
0,55	2,7	1,5	0,9	0,64	0,45	0,32	0,24	0,18	0,13	0,10	0,08	0,06
0,60	2,9	1,6	1,0	0,70	0,49	0,35	0,26	0,19	0,14	0,11	0,08	0,06
0,65	3,0	1,8	1,1	0,75	0,52	0,37	0,28	0,21	0,16	0,12	0,09	0,07
0,70	3,1	1,9	1,2	0,80	0,56	0,40	0,30	0,22	0,17	0,13	0,10	0,07
0,75	3,2	2,0	1,3	0,85	0,60	0,43	0,32	0,24	0,18	0,14	0,10	0,08

Meniski kõrgus mm	Klaastoru seesmine läbimõõt millimeetrites											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,80		2,0	1,3	0,90	0,63	0,45	0,34	0,25	0,19	0,14	0,11	0,08
0,85		2,1	1,4	0,94	0,66	0,48	0,35	0,26	0,20	0,15	0,12	0,09
0,90		2,2	1,4	0,98	0,70	0,50	0,37	0,28	0,21	0,16	0,12	0,09
0,95		2,3	1,5	1,03	0,73	0,53	0,39	0,29	0,22	0,17	0,13	0,10
1,00			1,6	1,07	0,76	0,55	0,41	0,30	0,23	0,18	0,13	0,10
1,05			1,6	1,10	0,79	0,57	0,42	0,32	0,24	0,18	0,14	0,11
1,10			1,7	1,14	0,82	0,59	0,44	0,33	0,25	0,19	0,15	0,11
1,15			1,7	1,18	0,84	0,61	0,46	0,34	0,26	0,20	0,15	0,12
1,20			1,7	1,21	0,87	0,63	0,47	0,35	0,27	0,20	0,16	0,12
1,25			1,8	1,24	0,89	0,65	0,49	0,37	0,28	0,21	0,16	0,13
1,30			1,8	1,27	0,92	0,67	0,50	0,38	0,29	0,22	0,17	0,13
1,35			1,8	1,30	0,94	0,69	0,52	0,39	0,29	0,22	0,17	0,13
1,40			1,9	1,32	0,96	0,71	0,53	0,40	0,30	0,23	0,18	0,14
1,45			1,9	1,34	0,98	0,72	0,54	0,41	0,31	0,24	0,18	0,14
1,50			2,0	1,37	1,00	0,74	0,55	0,42	0,32	0,24	0,19	0,14
1,55			2,0	1,39	1,01	0,75	0,56	0,43	0,32	0,25	0,19	0,15
1,60				1,41	1,03	0,77	0,58	0,44	0,33	0,25	0,20	0,15
1,65				1,42	1,04	0,78	0,59	0,44	0,34	0,26	0,20	0,15
1,70				1,44	1,06	0,79	0,60	0,45	0,34	0,26	0,20	0,16
1,75				1,45	1,07	0,80	0,60	0,46	0,35	0,27	0,21	0,16
1,80				1,46	1,08	0,81	0,61	0,47	0,36	0,27	0,21	0,16

Tabel 32. Elavhõbebaromeetri kapillaarne depressioon mm Hg
firma R. Fuess'i andmeil.

Toru sees- mine läbi- mõõt mm	Meniski kõrgus millimeetrites							
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
6	0,27	0,41	0,56	0,78	0,98	1,21	1,43	—
7	0,18	0,28	0,40	0,53	0,67	0,82	0,97	1,13
8	—	0,20	0,29	0,38	0,46	0,56	0,65	0,77
9	—	0,15	0,21	0,28	0,33	0,40	0,46	0,52
10	—	—	0,15	0,20	0,25	0,29	0,33	0,37
11	—	—	0,10	0,14	0,18	0,21	0,24	0,27
12	—	—	0,07	0,10	0,13	0,15	0,18	0,19
13	—	—	0,04	0,07	0,10	0,12	0,13	0,14

Tabel 33. Korrektsioonid $\triangle b'$ baromeetrilise lugemi taandamiseks 45° geograafilisele laiusele.
 $\triangle b' = 0,00259 \cos 2 \varphi \cdot b'$

Laiuskraad φ		Baromeetriline lugem mm Hg												
—	+	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0°	90°	1,76	1,79	1,81	1,84	1,86	1,89	1,92	1,94	1,97	1,99	2,02	2,05	2,07
1	89	76	79	81	84	86	89	92	94	97	99	02	04	07
2	88	76	78	81	83	86	89	91	94	96	99	02	04	07
3	87	75	78	80	83	85	88	91	93	96	98	01	03	06
4	86	74	77	80	82	85	87	90	92	95	97	2,00	03	05
5	85	1,73	1,76	1,79	1,81	1,84	1,86	1,89	1,91	1,94	1,96	1,99	2,02	2,04
6	84	72	75	77	80	82	85	87	90	93	95	98	2,00	03
7	83	71	73	76	78	81	83	86	88	91	94	96	1,99	2,01
8	82	69	72	74	77	79	82	84	87	89	92	94	97	1,99
9	81	67	70	72	75	77	80	82	85	87	90	92	95	97
10	80	1,65	1,68	1,70	1,73	1,75	1,78	1,80	1,83	1,85	1,87	1,90	1,92	1,95
11	79	63	66	68	70	73	75	78	80	83	85	87	90	92
12	78	61	63	66	68	70	73	75	77	80	82	85	87	89
13	77	58	61	63	65	68	70	72	75	77	79	82	84	86
14	76	56	58	60	62	65	67	69	72	74	76	78	81	83
15	75	1,53	1,55	1,57	1,59	1,61	1,64	1,66	1,68	1,70	1,73	1,75	1,77	1,79
16	74	49	52	54	56	58	60	63	65	67	69	71	74	76
17	73	46	48	50	52	55	57	59	61	63	65	67	70	72
18	72	42	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	66	68
19	71	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63
20	70	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
21	69	31	33	35	37	39	41	42	44	46	48	50	52	54
22	68	27	29	30	32	34	36	38	40	42	43	45	47	49
23	67	22	24	26	28	30	31	33	35	37	39	40	42	44
24	66	18	20	21	23	25	27	28	30	32	33	35	37	39
25	65	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22	1,23	1,25	1,27	1,28	1,30	1,32	1,33
26	64	08	10	12	13	15	16	18	20	21	23	24	26	28
27	63	1,04	05	07	08	10	11	13	14	16	17	19	20	22
28	62	0,98	1,00	1,01	1,03	1,04	06	07	09	10	12	13	14	16
29	61	93	0,95	0,96	0,97	0,99	1,00	1,02	1,03	1,04	06	07	08	10
30	60	0,88	0,89	0,91	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	1,00	1,01	1,02	1,04
31	59	83	84	85	86	88	89	90	91	92	0,94	0,95	0,96	0,97
32	58	77	78	79	81	82	83	84	85	86	87	89	90	91
33	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
34	56	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
35	55	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71
36	54	54	55	56	57	58	58	59	60	61	62	62	63	64
37	53	49	49	50	51	51	52	53	54	54	55	56	56	57
38	52	43	43	44	44	45	46	46	47	48	48	49	50	50
39	51	37	37	38	38	39	39	40	40	41	41	42	43	43
40	50	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36
41	49	25	25	25	26	26	26	27	27	27	28	28	28	29
42	48	18	19	19	19	19	20	20	20	21	21	21	21	22
43	47	12	12	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14
44	46	06	06	06	06	07	07	07	07	07	07	07	07	07
45	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabel 34. Küllastatud veeauru rõhumine e_0 mm Hg, 45° geograafilisel laiusel, elavhõbeda temperatuuril 0°C (erikaalu juures $\gamma_0=13,59593$).

(Travaux et mémoires du bureau international des poids et mesures. I.)

t	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0	4,57	4,60	4,64	4,67	4,70	4,74	4,77	4,80	4,84	4,87
1	4,91	4,94	4,98	5,02	5,05	5,09	5,12	5,16	5,20	5,23
2	5,27	5,31	5,35	5,39	5,42	5,46	5,50	5,54	5,58	5,62
3	5,66	5,70	5,74	5,78	5,82	5,86	5,90	5,94	5,98	6,03
4	6,07	6,11	6,15	6,20	6,24	6,28	6,33	6,37	6,42	6,46
5	6,51	6,55	6,60	6,64	6,69	6,74	6,78	6,83	6,88	6,92
6	6,97	7,02	7,07	7,12	7,17	7,22	7,26	7,31	7,36	7,42
7	7,47	7,52	7,57	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,88	7,94
8	7,99	8,05	8,10	8,15	8,21	8,27	8,32	8,37	8,43	8,49
9	8,55	8,61	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08
10	9,14	9,20	9,26	9,32	9,39	9,45	9,51	9,58	9,64	9,70
11	9,77	9,83	9,90	9,96	10,03	10,09	10,16	10,23	10,30	10,36
12	10,43	10,50	10,57	10,64	10,71	10,78	10,85	10,92	10,99	11,06
13	11,14	11,21	11,28	11,36	11,43	11,50	11,58	11,66	11,73	11,81
14	11,88	11,96	12,04	12,12	12,19	12,27	12,35	12,43	12,51	12,59
15	12,67	12,76	12,84	12,92	13,00	13,09	13,17	13,25	13,34	13,42
16	13,51	13,60	13,68	13,77	13,86	13,95	14,04	14,12	14,21	14,30
17	14,40	14,49	14,58	14,67	14,76	14,86	14,95	15,04	15,14	15,23
18	15,33	15,43	15,52	15,62	15,72	15,82	15,92	16,02	16,12	16,22
19	16,32	16,42	16,52	16,63	16,73	16,83	16,94	17,04	17,15	17,26
20	17,36	17,47	17,58	17,69	17,80	17,91	18,02	18,13	18,24	18,35
21	18,47	18,58	18,69	18,81	18,92	19,04	19,16	19,27	19,39	19,51
22	19,63	19,75	19,87	19,99	20,11	20,24	20,36	20,48	20,61	20,73
23	20,86	20,98	21,11	21,24	21,37	21,50	21,63	21,76	21,89	22,02
24	22,15	22,29	22,42	22,55	22,69	22,83	22,96	23,10	23,24	23,38
25	23,52	23,66	23,80	23,94	24,08	24,23	24,37	24,52	24,66	24,81
26	24,96	25,10	25,25	25,40	25,55	25,70	25,86	26,01	26,16	26,32
27	26,47	26,63	26,78	26,94	27,10	27,26	27,42	27,58	27,74	27,90
28	28,07	28,23	28,39	28,56	28,73	28,89	29,06	29,23	29,40	29,57
29	29,74	29,92	30,09	30,26	30,44	30,62	30,79	30,97	31,15	31,33
30	31,51	31,69	31,87	32,06	32,24	32,43	32,61	32,80	32,99	33,18
31	33,37	33,56	33,75	33,94	34,14	34,33	34,53	34,72	34,92	35,12
32	35,32	35,52	35,72	35,92	36,13	36,33	36,54	36,74	36,95	37,16
33	37,37	37,58	37,79	38,00	38,22	38,43	38,65	38,87	39,08	39,30
34	39,52	39,74	39,97	40,19	40,42	40,64	40,87	41,09	41,32	41,55
35	41,78	42,02	42,25	42,48	42,72	42,96	43,19	43,43	43,67	43,92

Tabel 35. Veeauru küllastusrõhk e_0 mm Hg (allpool 0°C — jää kohal). Vee mass q_0 ühes kantmeetris grammides.

t $^\circ\text{C}$	e_0	q_0	t $^\circ\text{C}$	e_0	q_0	t $^\circ\text{C}$	e_0	q_0
—60	0,007	0,011	—30	0,28	0,33	0	4,6	4,8
—59	0,008	0,012	—29	0,31	0,37	1	4,9	5,2
—58	0,009	0,014	—28	0,34	0,41	2	5,3	5,6
—57	0,011	0,016	—27	0,38	0,46	3	5,7	6,0
—56	0,013	0,019	—26	0,42	0,51	4	6,1	6,4
—55	0,015	0,021	—25	0,47	0,55	5	6,5	6,8
—54	0,017	0,024	—24	0,52	0,60	6	7,0	7,3
—53	0,019	0,027	—23	0,58	0,66	7	7,5	7,8
—52	0,022	0,030	—22	0,64	0,73	8	8,0	8,3
—51	0,025	0,034	—21	0,70	0,80	9	8,6	8,8
—50	0,029	0,038	—20	0,77	0,88	10	9,2	9,4
—49	0,033	0,043	—19	0,85	0,96	11	9,8	10,0
—48	0,037	0,048	—18	0,93	1,05	12	10,5	10,7
—47	0,042	0,054	—17	1,03	1,15	13	11,2	11,4
—46	0,047	0,060	—16	1,13	1,27	14	12,0	12,1
—45	0,052	0,067	—15	1,24	1,38	15	12,8	12,8
—44	0,058	0,074	—14	1,36	1,51	16	13,6	13,6
—43	0,066	0,083	—13	1,49	1,65	17	14,5	14,5
—42	0,074	0,093	—12	1,63	1,80	18	15,5	15,4
—41	0,083	0,104	—11	1,78	1,96	19	16,5	16,3
—40	0,093	0,117	—10	1,95	2,14	20	17,5	17,3
—39	0,105	0,130	—9	2,13	2,33	21	18,7	18,3
—38	0,119	0,144	—8	2,32	2,54	22	19,8	19,4
—37	0,134	0,160	—7	2,53	2,76	23	21,1	20,6
—36	0,150	0,178	—6	2,76	2,99	24	22,4	21,8
—35	0,167	0,198	—5	3,01	3,24	25	23,8	23,1
—34	0,185	0,220	—4	3,28	3,51	26	25,2	24,4
—33	0,205	0,244	—3	3,57	3,81	27	26,7	25,8
—32	0,227	0,271	—2	3,88	4,13	28	28,3	27,2
—31	0,252	0,301	—1	4,22	4,47	29	30,0	28,7
						30	31,8	30,3

Tabel 36. Baromeetrilised kõrgusastmed vastav

Baromeetri- line rõhum. mm või mb	T e m p e r														
	—30	—28	—26	—24	—22	—20	—18	—16	—14	—12	—10	—8	—6	—4	—
500	14,23	14,34	14,46	14,58	14,69	14,81	14,93	15,05	15,16	15,28	15,40	15,51	15,63	15,75	15,87
505	14,08	14,20	14,32	14,43	14,55	14,66	14,78	14,90	15,01	15,13	15,24	15,36	15,48	15,59	15,71
510	13,95	14,06	14,18	14,29	14,41	14,52	14,64	14,75	14,87	14,98	15,09	15,21	15,32	15,44	15,56
515	13,81	13,93	14,04	14,15	14,27	14,38	14,49	14,61	14,72	14,83	14,95	15,06	15,18	15,29	15,41
520	13,68	13,79	13,90	14,02	14,13	14,24	14,35	14,47	14,58	14,69	14,80	14,92	15,03	15,14	15,26
525	13,55	13,66	13,77	13,88	13,99	14,11	14,22	14,33	14,44	14,55	14,66	14,77	14,89	15,00	15,12
530	13,42	13,53	13,64	13,75	13,86	13,97	14,08	14,19	14,30	14,41	14,52	14,64	14,75	14,86	14,98
535	13,30	13,40	13,51	13,62	13,73	13,84	13,95	14,06	14,17	14,28	14,39	14,50	14,61	14,72	14,84
540	13,17	13,28	13,39	13,50	13,61	13,71	13,82	13,93	14,04	14,15	14,26	14,36	14,47	14,58	14,70
545	13,05	13,16	13,27	13,37	13,48	13,59	13,70	13,80	13,91	14,02	14,13	14,23	14,34	14,45	14,57
550	12,93	13,04	13,15	13,25	13,36	13,46	13,57	13,68	13,78	13,89	14,00	14,10	14,21	14,32	14,44
555	12,82	12,92	13,03	13,13	13,24	13,34	13,45	13,55	13,66	13,77	13,87	13,98	14,08	14,19	14,31
560	12,70	12,81	12,91	13,01	13,12	13,22	13,33	13,43	13,54	13,64	13,75	13,85	13,96	14,06	14,19
565	12,59	12,69	12,80	12,90	13,00	13,11	13,21	13,31	13,42	13,52	13,63	13,73	13,83	13,94	14,07
570	12,48	12,58	12,68	12,79	12,89	12,99	13,09	13,20	13,30	13,40	13,51	13,61	13,71	13,81	13,94
575	12,37	12,47	12,57	12,68	12,78	12,88	12,98	13,08	13,18	13,29	13,39	13,49	13,59	13,69	13,83
580	12,26	12,36	12,47	12,57	12,67	12,77	12,87	12,97	13,07	13,17	13,27	13,37	13,47	13,58	13,72
585	12,16	12,26	12,36	12,46	12,56	12,66	12,76	12,86	12,96	13,06	13,16	13,26	13,36	13,46	13,61
590	12,06	12,15	12,25	12,35	12,45	12,55	12,65	12,75	12,85	12,95	13,05	13,15	13,25	13,35	13,51
595	11,95	12,05	12,15	12,25	12,35	12,45	12,54	12,64	12,74	12,84	12,94	13,04	13,14	13,23	13,41
600	11,85	11,95	12,05	12,15	12,25	12,34	12,44	12,54	12,64	12,73	12,83	12,93	13,03	13,12	13,31
605	11,76	11,85	11,95	12,05	12,14	12,24	12,34	12,43	12,53	12,63	12,72	12,82	12,92	13,01	13,21
610	11,66	11,76	11,85	11,95	12,04	12,14	12,24	12,33	12,43	12,52	12,62	12,72	12,81	12,91	13,11
615	11,57	11,66	11,76	11,85	11,95	12,04	12,14	12,23	12,33	12,42	12,52	12,61	12,71	12,80	13,01
620	11,47	11,57	11,66	11,76	11,85	11,94	12,04	12,13	12,23	12,32	12,42	12,51	12,61	12,70	12,92
625	11,38	11,47	11,57	11,66	11,76	11,85	11,94	12,04	12,13	12,22	12,32	12,41	12,50	12,60	12,83
630	11,29	11,38	11,48	11,57	11,66	11,75	11,85	11,94	12,03	12,13	12,22	12,31	12,41	12,50	12,74
635	11,20	11,29	11,39	11,48	11,57	11,66	11,75	11,85	11,94	12,03	12,12	12,22	12,31	12,40	12,66
640	11,11	11,21	11,30	11,39	11,48	11,57	11,66	11,75	11,85	11,94	12,03	12,12	12,21	12,30	12,58
645	11,03	11,12	11,21	11,30	11,39	11,48	11,57	11,66	11,75	11,84	11,94	12,03	12,12	12,21	12,50
650	10,94	11,03	11,12	11,21	11,30	11,39	11,48	11,57	11,66	11,75	11,84	11,93	12,02	12,11	12,42
655	10,86	10,95	11,04	11,13	11,22	11,31	11,40	11,48	11,57	11,66	11,75	11,84	11,93	12,02	12,34
660	10,78	10,87	10,95	11,04	11,13	11,22	11,31	11,40	11,49	11,58	11,66	11,75	11,84	11,93	12,27
665	10,70	10,78	10,87	10,96	11,05	11,14	11,22	11,31	11,40	11,49	11,58	11,66	11,75	11,84	11,99
670	10,62	10,70	10,79	10,88	10,97	11,05	11,14	11,23	11,32	11,40	11,49	11,58	11,66	11,75	11,88
675	10,54	10,62	10,71	10,80	10,88	10,97	11,06	11,14	11,23	11,32	11,40	11,49	11,58	11,66	11,77
680	10,46	10,55	10,63	10,72	10,80	10,89	10,98	11,06	11,15	11,23	11,32	11,41	11,49	11,58	11,66
685	10,38	10,47	10,55	10,64	10,73	10,81	10,90	10,98	11,07	11,15	11,24	11,32	11,41	11,49	11,55
690	10,31	10,39	10,48	10,56	10,64	10,73	10,82	10,90	10,99	11,07	11,16	11,24	11,33	11,41	11,45
695	10,23	10,32	10,40	10,49	10,57	10,66	10,74	10,82	10,91	10,99	11,08	11,16	11,24	11,33	11,40

aromeetrilisele rõhumisele (mb või mm Hg) ja õhu temperatuurile.

u u r °C															
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
15,98	16,10	16,22	16,33	16,45	16,57	16,68	16,80	16,92	17,04	17,15	17,27	17,39	17,50	17,62	17,74
15,82	15,94	16,06	16,17	16,29	16,40	16,52	16,64	16,75	16,87	16,98	17,10	17,21	17,33	17,45	17,56
15,67	15,78	15,90	16,01	16,13	16,24	16,36	16,47	16,59	16,70	16,82	16,93	17,05	17,16	17,28	17,39
15,52	15,63	15,74	15,86	15,97	16,08	16,20	16,31	16,43	16,54	16,65	16,77	16,88	16,99	17,11	17,22
15,37	15,48	15,59	15,70	15,82	15,93	16,04	16,16	16,27	16,38	16,49	16,61	16,72	16,83	16,94	17,06
15,22	15,33	15,44	15,56	15,67	15,78	15,89	16,00	16,11	16,22	16,34	16,45	16,56	16,67	16,78	16,89
15,08	15,19	15,30	15,41	15,52	15,63	15,74	15,85	15,96	16,07	16,18	16,29	16,40	16,51	16,62	16,73
14,94	15,05	15,16	15,26	15,37	15,48	15,59	15,70	15,81	15,92	16,03	16,14	16,25	16,36	16,47	16,58
14,80	14,91	15,01	15,12	15,23	15,34	15,45	15,56	15,67	15,77	15,88	15,99	16,10	16,21	16,32	16,42
14,66	14,77	14,88	14,98	15,09	15,20	15,31	15,41	15,52	15,63	15,74	15,84	15,95	16,06	16,17	16,27
14,53	14,64	14,74	14,85	14,95	15,06	15,17	15,27	15,38	15,49	15,59	15,70	15,81	15,91	16,02	16,13
14,40	14,50	14,61	14,71	14,82	14,93	15,03	15,14	15,24	15,35	15,45	15,56	15,66	15,77	15,87	15,98
14,27	14,37	14,48	14,58	14,69	14,79	14,90	15,00	15,11	15,21	15,31	15,42	15,52	15,63	15,73	15,84
14,14	14,25	14,35	14,45	14,56	14,66	14,76	14,87	14,97	15,08	15,18	15,28	15,39	15,49	15,59	15,70
14,02	14,12	14,22	14,33	14,43	14,53	14,64	14,74	14,84	14,94	15,05	15,15	15,25	15,35	15,46	15,56
13,90	14,00	14,10	14,20	14,30	14,41	14,51	14,61	14,71	14,81	14,92	15,02	15,12	15,22	15,32	15,42
13,78	13,88	13,98	14,08	14,18	14,28	14,38	14,48	14,58	14,69	14,79	14,89	14,99	15,09	15,19	15,29
13,66	13,76	13,86	13,96	14,06	14,16	14,26	14,36	14,46	14,56	14,66	14,76	14,86	14,96	15,06	15,16
13,54	13,64	13,74	13,84	13,94	14,04	14,14	14,24	14,34	14,44	14,54	14,64	14,73	14,83	14,93	15,03
13,43	13,53	13,63	13,73	13,82	13,92	14,02	14,12	14,22	14,32	14,41	14,51	14,61	14,71	14,81	14,91
13,32	13,42	13,51	13,61	13,71	13,81	13,91	14,00	14,10	14,20	14,29	14,39	14,49	14,59	14,68	14,78
13,21	13,30	13,40	13,50	13,60	13,70	13,79	13,89	13,98	14,08	14,18	14,27	14,37	14,47	14,56	14,66
13,10	13,20	13,29	13,39	13,48	13,58	13,68	13,77	13,87	13,96	14,06	14,16	14,25	14,35	14,44	14,54
12,99	13,09	13,18	13,28	13,37	13,47	13,56	13,66	13,75	13,85	13,95	14,04	14,14	14,23	14,33	14,42
12,89	12,98	13,08	13,17	13,27	13,36	13,46	13,55	13,64	13,74	13,83	13,93	14,02	14,12	14,21	14,30
12,78	12,88	12,97	13,07	13,16	13,25	13,35	13,44	13,53	13,63	13,72	13,82	13,91	14,00	14,10	14,19
12,68	12,78	12,87	12,96	13,06	13,15	13,24	13,33	13,43	13,52	13,61	13,71	13,80	13,89	13,99	14,08
12,58	12,68	12,77	12,86	12,95	13,05	13,14	13,23	13,32	13,41	13,51	13,60	13,69	13,78	13,87	13,97
12,49	12,58	12,67	12,76	12,85	12,94	13,03	13,13	13,22	13,31	13,40	13,49	13,58	13,68	13,77	13,86
12,39	12,48	12,57	12,66	12,75	12,84	12,93	13,02	13,12	13,21	13,30	13,39	13,48	13,57	13,66	13,75
12,29	12,38	12,47	12,56	12,65	12,74	12,83	12,92	13,01	13,10	13,19	13,28	13,37	13,46	13,55	13,64
12,20	12,29	12,38	12,47	12,56	12,65	12,74	12,83	12,91	13,00	13,09	13,18	13,27	13,36	13,45	13,54
12,11	12,20	12,28	12,37	12,46	12,55	12,64	12,73	12,82	12,91	12,99	13,08	13,17	13,26	13,35	13,44
12,02	12,10	12,19	12,28	12,37	12,46	12,54	12,63	12,72	12,81	12,90	12,98	13,07	13,16	13,25	13,34
11,93	12,01	12,10	12,19	12,28	12,36	12,45	12,54	12,63	12,71	12,80	12,89	12,98	13,06	13,15	13,24
11,84	11,93	12,01	12,10	12,19	12,27	12,36	12,45	12,53	12,62	12,71	12,79	12,88	12,97	13,05	13,14
11,75	11,84	11,92	12,01	12,10	12,18	12,27	12,35	12,44	12,53	12,61	12,70	12,78	12,87	12,96	13,04
11,67	11,75	11,84	11,92	12,01	12,09	12,18	12,26	12,35	12,43	12,52	12,61	12,69	12,78	12,86	12,94
11,58	11,67	11,75	11,84	11,92	12,01	12,09	12,17	12,26	12,34	12,43	12,51	12,60	12,68	12,77	12,85
11,50	11,58	11,67	11,75	11,83	11,92	12,00	12,09	12,17	12,26	12,34	12,42	12,51	12,59	12,68	12,76

Barometri- line rõhm mm với mb	T e m p e r														
	—30	—28	—26	—24	—22	—20	—18	—16	—14	—12	—10	—8	—6	—4	—2
700	10,16	10,24	10,33	10,41	10,50	10,58	10,66	10,75	10,83	10,91	11,00	11,08	11,16	11,25	11,3
705	10,09	10,17	10,26	10,33	10,42	10,50	10,59	10,67	10,75	10,84	10,92	11,00	11,09	11,17	11,2
710	10,02	10,10	10,18	10,27	10,35	10,43	10,51	10,60	10,68	10,76	10,84	10,92	11,00	11,09	11,
715	9,95	10,03	10,11	10,19	10,28	10,36	10,44	10,52	10,60	10,68	10,77	10,85	10,93	11,01	11,0
720	9,88	9,96	10,04	10,12	10,20	10,29	10,37	10,45	10,53	10,61	10,69	10,77	10,85	10,94	11,0
725	9,81	9,89	9,97	10,05	10,13	10,21	10,30	10,38	10,46	10,54	10,62	10,70	10,78	10,86	10,9
730	9,74	9,82	9,90	9,98	10,06	10,14	10,22	10,30	10,39	10,47	10,55	10,63	10,71	10,79	10,8
735	9,68	9,76	9,84	9,92	10,00	10,08	10,16	10,24	10,31	10,39	10,47	10,55	10,63	10,71	10,7
740	9,61	9,69	9,77	9,85	9,93	10,01	10,09	10,17	10,24	10,32	10,40	10,48	10,56	10,64	10,7
745	9,55	9,63	9,70	9,78	9,86	9,94	10,02	10,10	10,18	10,25	10,33	10,41	10,49	10,57	10,6
750	9,49	9,56	9,64	9,72	9,80	9,87	9,95	10,03	10,11	10,19	10,26	10,34	10,42	10,50	10,5
755	9,42	9,50	9,58	9,65	9,73	9,81	9,89	9,96	10,04	10,12	10,20	10,27	10,35	10,43	10,5
760	9,36	9,44	9,51	9,59	9,67	9,74	9,82	9,90	9,98	10,05	10,13	10,21	10,28	10,36	10,4
765	9,30	9,37	9,45	9,53	9,60	9,68	9,76	9,83	9,91	9,99	10,06	10,14	10,22	10,29	10,3
770	9,24	9,31	9,39	9,47	9,54	9,62	9,69	9,77	9,85	9,92	10,00	10,07	10,15	10,23	10,3
775	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,56	9,63	9,71	9,78	9,86	9,93	10,01	10,08	10,16	10,2
780	9,12	9,19	9,27	9,34	9,42	9,49	9,57	9,64	9,72	9,79	9,87	9,94	10,02	10,09	10,1
785	9,06	9,14	9,21	9,28	9,36	9,43	9,51	9,58	9,66	9,73	9,80	9,88	9,96	10,03	10,1
790	9,00	9,08	9,15	9,23	9,30	9,37	9,45	9,52	9,60	9,67	9,74	9,82	9,89	9,97	10,0
795	8,95	9,02	9,09	9,17	9,24	9,32	9,39	9,46	9,54	9,61	9,68	9,76	9,83	9,90	9,9
800	8,89	8,96	9,04	9,11	9,18	9,26	9,33	9,40	9,48	9,55	9,62	9,70	9,77	9,84	9,9
805	8,84	8,91	8,98	9,05	9,13	9,20	9,27	9,34	9,42	9,49	9,56	9,64	9,71	9,78	9,8
810	8,78	8,85	8,93	9,00	9,07	9,14	9,21	9,29	9,36	9,43	9,50	9,58	9,65	9,72	9,7
815	8,73	8,80	8,87	8,94	9,01	9,09	9,16	9,23	9,30	9,37	9,44	9,52	9,59	9,66	9,7
820	8,67	8,75	8,82	8,89	8,96	9,03	9,10	9,17	9,25	9,32	9,39	9,46	9,53	9,60	9,6
825	8,62	8,69	8,76	8,83	8,91	8,98	9,05	9,18	9,19	9,26	9,33	9,40	9,47	9,54	9,6
830	8,57	8,64	8,71	8,78	8,85	8,92	8,99	9,06	9,13	9,20	9,27	9,35	9,42	9,49	9,5
835	8,52	8,59	8,66	8,73	8,80	8,87	8,94	9,01	9,08	9,15	9,22	9,29	9,36	9,43	9,5
840	8,47	8,54	8,61	8,68	8,75	8,82	8,89	8,96	9,03	9,09	9,16	9,23	9,30	9,37	9,4
845	8,42	8,49	8,56	8,63	8,69	8,76	8,83	8,90	8,97	9,04	9,11	9,18	9,25	9,32	9,3
850	8,37	8,44	8,51	8,57	8,64	8,71	8,78	8,85	8,92	8,99	9,06	9,13	9,19	9,26	9,3
855	8,32	8,39	8,46	8,52	8,59	8,66	8,73	8,80	8,87	8,94	9,00	9,07	9,14	9,21	9,2
860	8,27	8,34	8,41	8,47	8,54	8,61	8,68	8,75	8,82	8,88	8,95	9,02	9,09	9,16	9,2
865	8,22	8,29	8,36	8,43	8,49	8,56	8,63	8,70	8,76	8,83	8,90	8,97	9,04	9,10	9,1
870	8,18	8,24	8,31	8,38	8,44	8,51	8,58	8,65	8,71	8,78	8,85	8,92	8,98	9,05	9,1
875	8,13	8,20	8,26	8,33	8,40	8,46	8,53	8,60	8,66	8,73	8,80	8,86	8,93	9,00	9,0
880	8,08	8,15	8,22	8,28	8,35	8,42	8,48	8,55	8,61	8,68	8,75	8,81	8,88	8,95	9,0
885	8,04	8,10	8,17	8,24	8,30	8,37	8,43	8,50	8,57	8,63	8,70	8,76	8,83	8,90	8,9
890	7,99	8,06	8,12	8,19	8,26	8,32	8,39	8,45	8,52	8,58	8,65	8,72	8,78	8,85	8,9
895	7,95	8,01	8,09	8,14	8,21	8,27	8,34	8,41	8,47	8,54	8,60	8,67	8,73	8,80	8,8

u u r °C																	
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
11,42	11,50	11,58	11,67	11,75	11,83	11,92	12,00	12,08	12,17	12,25	12,34	12,42	12,50	12,59	12,67		
11,33	11,42	11,50	11,58	11,67	11,75	11,83	11,92	12,00	12,08	12,17	12,25	12,33	12,41	12,50	12,58		
11,25	11,34	11,42	11,50	11,58	11,67	11,75	11,83	11,91	12,00	12,08	12,16	12,24	12,33	12,40	12,49		
11,18	11,26	11,34	11,42	11,53	11,59	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,08	12,16	12,24	12,32	12,40		
11,10	11,18	11,26	11,34	11,42	11,50	11,59	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07	12,16	12,24	12,32		
11,02	11,10	11,18	11,26	11,35	11,43	11,51	11,59	11,67	11,74	11,83	11,91	11,99	12,07	12,15	12,23		
10,95	11,03	11,11	11,19	11,27	11,35	11,43	11,51	11,59	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07	12,15		
10,87	10,95	11,03	11,11	11,19	11,27	11,35	11,43	11,51	11,59	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07		
10,80	10,88	10,96	11,04	11,11	11,19	11,27	11,35	11,43	11,51	11,59	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99		
10,73	10,80	10,88	10,96	11,04	11,12	11,20	11,28	11,35	11,43	11,51	11,59	11,67	11,75	11,83	11,90		
10,65	10,73	10,81	10,89	10,97	11,04	11,12	11,20	11,28	11,36	11,44	11,51	11,59	11,67	11,75	11,83		
10,58	10,66	10,74	10,82	10,89	10,97	11,05	11,13	11,20	11,28	11,36	11,44	11,51	11,59	11,67	11,75		
10,51	10,59	10,67	10,75	10,82	10,90	10,98	11,05	11,13	11,21	11,28	11,36	11,44	11,52	11,59	11,67		
10,45	10,52	10,60	10,68	10,75	10,83	10,90	10,98	11,06	11,13	11,21	11,29	11,36	11,44	11,52	11,59		
10,38	10,45	10,53	10,61	10,68	10,76	10,83	10,91	10,99	11,06	11,14	11,21	11,29	11,37	11,44	11,52		
10,31	10,39	10,46	10,54	10,61	10,69	10,76	10,84	10,92	10,99	11,07	11,14	11,22	11,29	11,37	11,44		
10,24	10,32	10,39	10,47	10,55	10,62	10,70	10,77	10,85	10,92	11,00	11,07	11,15	11,22	11,30	11,37		
10,18	10,25	10,33	10,40	10,48	10,55	10,63	10,70	10,78	10,85	10,93	11,00	11,07	11,15	11,22	11,30		
10,12	10,19	10,26	10,34	10,41	10,49	10,56	10,63	10,71	10,78	10,86	10,93	11,00	11,08	11,15	11,23		
10,05	10,13	10,20	10,27	10,35	10,42	10,49	10,57	10,64	10,71	10,79	10,86	10,94	11,01	11,08	11,16		
9,99	10,06	10,14	10,21	10,28	10,35	10,43	10,50	10,57	10,65	10,72	10,79	10,87	10,94	11,01	11,09		
9,93	10,00	10,07	10,14	10,21	10,29	10,36	10,44	10,51	10,58	10,65	10,73	10,80	10,87	10,94	11,02		
9,87	9,94	10,01	10,08	10,15	10,23	10,30	10,37	10,44	10,52	10,59	10,66	10,73	10,80	10,88	10,95		
9,80	9,88	9,95	10,02	10,09	10,16	10,24	10,31	10,38	10,45	10,52	10,59	10,67	10,74	10,81	10,88		
9,75	9,82	9,89	9,96	10,03	10,10	10,17	10,24	10,32	10,39	10,46	10,53	10,60	10,67	10,74	10,82		
9,69	9,76	9,83	9,90	9,97	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,40	10,47	10,54	10,61	10,68	10,75		
9,63	9,70	9,77	9,84	9,91	9,98	10,05	10,12	10,19	10,26	10,33	10,40	10,47	10,54	10,62	10,69		
9,57	9,64	9,71	9,78	9,85	9,92	10,00	10,06	10,13	10,20	10,27	10,34	10,41	10,48	10,55	10,62		
9,51	9,58	9,65	9,72	9,79	9,86	9,93	10,00	10,07	10,14	10,21	10,28	10,35	10,42	10,49	10,56		
9,46	9,53	9,60	9,66	9,73	9,80	9,87	9,94	10,01	10,08	10,15	10,22	10,29	10,36	10,43	10,50		
9,40	9,47	9,54	9,61	9,68	9,75	9,81	9,88	9,95	10,02	10,09	10,16	10,23	10,30	10,37	10,43		
9,35	9,41	9,48	9,55	9,62	9,69	9,76	9,83	9,89	9,96	10,03	10,10	10,17	10,24	10,30	10,37		
9,29	9,36	9,43	9,50	9,56	9,63	9,70	9,77	9,84	9,90	9,97	10,04	10,11	10,18	10,24	10,31		
9,24	9,31	9,37	9,44	9,51	9,58	9,64	9,71	9,78	9,85	9,91	9,98	10,05	10,12	10,19	10,25		
9,19	9,25	9,32	9,39	9,45	9,52	9,59	9,66	9,72	9,79	9,86	9,93	9,99	10,06	10,13	10,19		
9,13	9,20	9,27	9,33	9,40	9,47	9,53	9,60	9,67	9,73	9,80	9,87	9,94	10,00	10,07	10,14		
9,08	9,15	9,21	9,28	9,35	9,41	9,48	9,55	9,61	9,68	9,75	9,81	9,88	9,95	10,01	10,08		
9,03	9,10	9,16	9,23	9,29	9,36	9,43	9,49	9,56	9,62	9,69	9,76	9,82	9,89	9,96	10,02		
8,98	9,04	9,11	9,18	9,24	9,31	9,37	9,43	9,50	9,57	9,64	9,70	9,77	9,83	9,90	9,97		
8,93	8,99	9,06	9,12	9,19	9,26	9,32	9,39	9,45	9,52	9,58	9,63	9,71	9,78	9,84	9,91		

Barometri- line rõhum. mm või mb	T e m p e r														
	—30	—28	—26	—24	—22	—20	—18	—16	—14	—12	—10	—8	—6	—4	—2
900	7,90	7,97	8,03	8,10	8,16	8,23	8,29	8,36	8,42	8,49	8,55	8,62	8,68	8,75	8,81
905	7,86	7,92	7,99	8,05	8,12	8,18	8,25	8,31	8,38	8,44	8,51	8,57	8,64	8,70	8,76
910	7,82	7,88	7,95	8,01	8,07	8,14	8,20	8,27	8,33	8,40	8,46	8,52	8,59	8,65	8,71
915	7,77	7,84	7,90	7,97	8,03	8,09	8,16	8,22	8,29	8,35	8,41	8,48	8,54	8,61	8,67
920	7,73	7,79	7,86	7,92	7,99	8,05	8,11	8,18	8,24	8,30	8,37	8,43	8,49	8,56	8,62
925	7,69	7,75	7,82	7,88	7,94	8,01	8,07	8,13	8,20	8,26	8,32	8,39	8,45	8,51	8,58
930	7,65	7,71	7,77	7,84	7,90	7,96	8,03	8,09	8,15	8,21	8,28	8,34	8,40	8,47	8,53
935	7,61	7,67	7,73	7,80	7,86	7,92	7,98	8,05	8,11	8,17	8,23	8,30	8,36	8,42	8,48
940	7,57	7,63	7,69	7,75	7,82	7,88	7,94	8,00	8,07	8,13	8,19	8,25	8,31	8,38	8,44
945	7,53	7,59	7,65	7,71	7,77	7,84	7,90	7,96	8,02	8,08	8,15	8,21	8,27	8,33	8,39
950	7,49	7,55	7,61	7,67	7,73	7,80	7,86	7,92	7,98	8,04	8,10	8,16	8,23	8,29	8,35
955	7,45	7,51	7,57	7,63	7,69	7,75	7,82	7,88	7,94	8,00	8,06	8,12	8,18	7,24	8,31
960	7,41	7,47	7,53	7,59	7,65	7,71	7,77	7,84	7,90	7,96	8,02	8,08	8,14	8,20	8,26
965	7,37	7,43	7,49	7,55	7,61	7,67	7,73	7,80	7,86	7,92	7,98	8,04	8,10	8,16	8,22
970	7,33	7,39	7,45	7,51	7,57	7,63	7,69	7,76	7,82	7,88	7,94	8,00	8,06	8,12	8,18
975	7,30	7,36	7,42	7,48	7,54	7,60	7,66	7,72	7,78	7,84	7,90	7,96	8,02	8,08	8,14
980	7,26	7,32	7,38	7,44	7,50	7,56	7,62	7,68	7,74	7,80	7,86	7,92	7,97	8,03	8,09
985	7,22	7,28	7,34	7,40	7,46	7,52	7,58	7,64	7,70	7,76	7,82	7,88	7,93	7,99	8,05
990	7,18	7,24	7,30	7,36	7,42	7,48	7,54	7,60	7,66	7,72	7,78	7,83	7,89	7,95	8,01
995	7,15	7,21	7,27	7,33	7,38	7,44	7,50	7,56	7,62	7,68	7,74	7,80	7,85	7,91	7,97
1000	7,11	7,17	7,23	7,29	7,35	7,41	7,46	7,52	7,58	7,64	7,70	7,76	7,82	7,87	7,93
1005	7,08	7,14	7,19	7,25	7,31	7,37	7,43	7,49	7,54	7,60	7,66	7,72	7,78	7,83	7,89
1010	7,04	7,10	7,16	7,22	7,27	7,33	7,39	7,45	7,51	7,56	7,62	7,68	7,74	7,80	7,85
1015	7,01	7,07	7,12	7,18	7,24	7,30	7,35	7,41	7,47	7,53	7,58	7,64	7,70	7,76	7,82
1020	6,97	7,03	7,09	7,15	7,20	7,26	7,32	7,38	7,43	7,49	7,55	7,60	7,66	7,72	7,78
1025	6,94	7,00	7,05	7,11	7,17	7,22	7,28	7,34	7,40	7,45	7,51	7,57	7,62	7,68	7,74
1030	6,91	6,96	7,02	7,08	7,13	7,19	7,25	7,30	7,36	7,42	7,47	7,53	7,59	7,64	7,70
1035	6,87	6,93	6,99	7,04	7,10	7,16	7,21	7,27	7,32	7,38	7,44	7,49	7,55	7,61	7,66
1040	6,84	6,90	6,95	7,01	7,06	7,12	7,18	7,23	7,29	7,35	7,40	7,46	7,51	7,57	7,63
1045	6,81	6,86	6,92	6,97	7,03	7,09	7,14	7,20	7,25	7,31	7,37	7,42	7,48	7,53	7,59
1050	6,77	6,83	6,89	6,94	7,00	7,05	7,11	7,16	7,22	7,28	7,33	7,39	7,44	7,50	7,55
1055	6,74	6,80	6,85	6,91	6,96	7,02	7,07	7,13	7,19	7,24	7,30	7,35	7,41	7,46	7,52
1060	6,71	6,77	6,82	6,88	6,93	6,99	7,04	7,10	7,15	7,21	7,26	7,32	7,37	7,43	7,48
1065	6,68	6,73	6,79	6,84	6,90	6,95	7,01	7,06	7,12	7,17	7,23	7,28	7,34	7,39	7,45
1070	6,65	6,70	6,76	6,81	6,87	6,92	6,98	7,03	7,09	7,14	7,19	7,25	7,30	7,36	7,41
1075	6,62	6,67	6,73	6,78	6,83	6,89	6,94	7,00	7,05	7,11	7,16	7,22	7,27	7,32	7,38
1080	6,59	6,64	6,69	6,75	6,80	6,86	6,91	6,97	7,02	7,07	7,13	7,18	7,24	7,29	7,34
1085	6,56	6,61	6,66	6,72	6,77	6,83	6,88	6,93	6,99	7,04	7,10	7,15	7,20	7,26	7,31
1090	6,53	6,58	6,63	6,69	6,74	6,80	6,85	6,90	6,96	7,01	7,06	7,12	7,17	7,22	7,28
1095	6,50	6,55	6,60	6,66	6,71	6,76	6,82	6,87	6,92	6,98	7,03	7,08	7,14	7,19	7,24
1100	6,47	6,52	6,57	6,63	6,68	6,73	6,79	6,84	6,89	6,95	7,00	7,05	7,10	7,16	7,21

t u u r °C

0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
8,88	8,94	9,01	9,07	9,14	9,20	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,66	9,72	9,79	9,85
8,83	8,89	8,96	9,02	9,09	9,15	9,22	9,28	9,35	9,41	9,48	9,54	9,61	9,67	9,74	9,80
8,78	8,85	8,91	8,97	9,04	9,10	9,17	9,23	9,30	9,36	9,42	9,49	9,55	9,62	9,68	9,75
8,73	8,80	8,86	8,93	8,99	9,05	9,12	9,18	9,25	9,31	9,37	9,44	9,50	9,57	9,63	9,69
8,69	8,75	8,81	8,88	8,94	9,00	9,07	9,13	9,19	9,26	9,32	9,39	9,45	9,51	9,58	9,64
8,64	8,70	8,77	8,83	8,89	8,96	9,02	9,08	9,15	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,52	9,59
8,59	8,66	8,72	8,78	8,84	8,91	8,97	9,03	9,10	9,16	9,22	9,28	9,35	9,41	9,47	9,54
8,55	8,61	8,67	8,73	8,80	8,86	8,92	8,98	9,05	9,11	9,17	9,24	9,30	9,36	9,42	9,49
8,50	8,56	8,63	8,69	8,75	8,81	8,87	8,94	9,00	9,06	9,12	9,19	9,25	9,31	9,37	9,44
8,46	8,52	8,58	8,64	8,70	8,77	8,83	8,89	8,95	9,01	9,08	9,14	9,20	9,26	9,32	9,39
8,41	8,47	8,53	8,60	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,97	9,03	9,09	9,15	9,21	9,27	9,34
8,37	8,43	8,49	8,55	8,61	8,67	8,74	8,80	8,86	8,92	8,98	9,04	9,10	9,16	9,23	9,29
8,32	8,38	8,45	8,51	8,57	8,63	8,69	8,75	8,81	8,87	8,93	8,99	9,06	9,12	9,18	9,24
8,28	8,34	8,40	8,46	8,52	8,58	8,64	8,71	8,77	8,83	8,89	8,95	9,01	9,07	9,13	9,19
8,24	8,30	8,36	8,42	8,48	8,54	8,60	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,14
8,20	8,26	8,32	8,38	8,44	8,50	8,56	8,62	8,68	8,74	8,80	8,86	8,92	8,98	9,04	9,10
8,15	8,21	8,27	8,33	8,39	8,45	8,51	8,57	8,63	8,69	8,75	8,81	8,87	8,93	8,99	9,05
8,11	8,17	8,23	8,29	8,35	8,41	8,47	8,53	8,59	8,65	8,71	8,77	8,83	8,89	8,94	9,00
8,07	8,13	8,19	8,25	8,31	8,37	8,43	8,49	8,54	8,60	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96
8,03	8,09	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,50	8,56	8,62	8,68	8,74	8,80	8,85	8,91
7,99	8,05	8,11	8,17	8,23	8,28	8,34	8,40	8,46	8,52	8,58	8,63	8,69	8,75	8,81	8,87
7,95	8,01	8,07	8,13	8,18	8,24	8,30	8,36	8,42	8,48	8,53	8,59	8,65	8,71	8,77	8,82
7,91	7,97	8,03	8,09	8,14	8,20	8,26	8,32	8,38	8,43	8,49	8,55	8,61	8,67	8,72	8,78
7,87	7,93	7,99	8,05	8,10	8,16	8,22	8,28	8,33	8,39	8,45	8,51	8,56	8,62	8,68	8,74
7,83	7,89	7,95	8,01	8,06	8,12	8,18	8,24	8,29	8,35	8,41	8,47	8,52	8,58	8,64	8,70
7,80	7,85	7,91	7,97	8,02	8,08	8,14	8,20	8,25	8,31	8,37	8,42	8,48	8,54	8,60	8,65
7,76	7,81	7,87	7,93	7,99	8,04	8,10	8,16	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,50	8,55	8,61
7,72	7,78	7,83	7,89	7,95	8,00	8,06	8,12	8,17	8,23	8,29	8,34	8,40	8,46	8,51	8,57
7,68	7,74	7,80	7,85	7,91	7,97	8,02	8,08	8,13	8,19	8,25	8,30	8,36	8,42	8,47	8,53
7,65	7,70	7,76	7,81	7,87	7,93	7,98	8,04	8,09	8,15	8,21	8,26	8,32	8,37	8,43	8,49
7,61	7,67	7,72	7,78	7,83	7,89	7,94	8,00	8,06	8,11	8,17	8,22	8,28	8,34	8,39	8,45
7,57	7,63	7,69	7,74	7,80	7,85	7,91	7,96	8,02	8,07	8,13	8,18	8,24	8,30	8,35	8,41
7,54	7,59	7,65	7,70	7,76	7,81	7,87	7,93	7,98	8,04	8,10	8,15	8,20	8,26	8,31	8,37
7,50	7,56	7,61	7,67	7,72	7,78	7,83	7,89	7,94	8,00	8,05	8,11	8,16	8,22	8,27	8,33
7,47	7,52	7,58	7,63	7,69	7,74	7,80	7,85	7,91	7,96	8,02	8,07	8,12	8,18	8,23	8,29
7,43	7,49	7,54	7,60	7,65	7,71	7,76	7,81	7,87	7,92	7,98	8,03	8,09	8,14	8,20	8,25
7,40	7,45	7,51	7,56	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,89	7,94	8,00	8,05	8,10	8,16	8,21
7,36	7,42	7,47	7,53	7,58	7,63	7,69	7,74	7,80	7,85	7,90	7,96	8,01	8,07	8,12	8,17
7,33	7,38	7,44	7,50	7,55	7,60	7,65	7,71	7,76	7,81	7,87	7,92	7,98	8,03	8,08	8,14
7,30	7,35	7,40	7,46	7,51	7,56	7,62	7,67	7,73	7,78	7,83	7,89	7,94	7,99	8,05	8,10
7,26	7,32	7,37	7,42	7,48	7,53	7,58	7,64	7,69	7,74	7,80	7,85	7,90	7,96	8,01	8,06

Tabel 37. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetiline tabel — 1000 kuni 11000 m.

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb									
— 1000	854,58	1139,35	1,1244	21,500	294,500	291,235	1,0226	0,1374	1,0996	1,3476	— 3280,8
— 950	849,63	1132,75	1,1179	21,175	294,175	291,075	1,0214	0,1368	1,0945	1,3413	— 3116,8
— 900	844,71	1126,19	1,1115	20,850	293,850	290,913	1,0203	0,1361	1,0893	1,3350	— 2952,8
— 850	839,82	1119,67	1,1050	20,525	293,525	290,752	1,0192	0,1355	1,0842	1,3287	— 2788,7
— 800	834,94	1113,16	1,0986	20,200	293,200	290,590	1,0181	0,1349	1,0791	1,3325	— 2624,7
— 750	830,08	1106,68	1,0922	19,875	292,875	290,429	1,0170	0,1342	1,0740	1,3162	— 2460,6
— 700	825,25	1100,24	1,0859	19,550	292,550	290,267	1,0158	0,1336	1,0690	1,3100	— 2296,6
— 650	820,45	1093,84	1,0796	19,225	292,225	290,106	1,0147	0,1330	1,0639	1,3038	— 2132,5
— 600	815,67	1087,47	1,0733	18,900	291,900	289,944	1,0135	0,1323	1,0589	1,2977	— 1968,5
— 550	810,91	1081,12	1,0670	18,575	291,575	289,783	1,0124	0,1317	1,0539	1,2916	— 1804,5
— 500	806,16	1074,79	1,0607	18,250	291,250	289,621	1,0113	0,1311	1,0489	1,2854	— 1640,4
— 450	801,44	1068,50	1,0545	17,925	290,925	289,459	1,0102	0,1305	1,0439	1,2793	— 1476,4
— 400	796,75	1062,25	1,0484	17,600	290,600	289,297	1,0091	0,1298	1,0390	1,2733	— 1312,3
— 350	792,09	1056,03	1,0422	17,275	290,275	289,136	1,0079	0,1292	1,0341	1,2672	— 1148,3
— 300	787,44	1049,83	1,0361	16,950	289,950	288,974	1,0068	0,1286	1,0291	1,2612	— 984,2
— 250	782,81	1043,66	1,0300	16,625	289,625	288,812	1,0056	0,1280	1,0242	1,2552	— 820,2
— 200	778,20	1037,51	1,0240	16,300	289,300	288,650	1,0045	0,1274	1,0193	1,2492	— 656,2
— 150	773,62	1031,41	1,0179	15,975	288,975	288,488	1,0034	0,1268	1,0145	1,2433	— 492,1
— 100	769,06	1025,33	1,0119	15,650	288,650	288,325	1,0023	0,1262	1,0096	1,2373	— 328,1
— 50	764,52	1019,28	1,0059	15,325	288,325	288,163	1,0011	0,1256	1,0048	1,2314	— 164,0
0	760,00	1013,25	1,0000	15,000	288,000	288,000	1,0000	0,12497	1,0000	1,2255	0
50	755,50	1007,25	0,9941	14,675	287,605	287,873	0,9989	0,12437	0,9952	1,2196	164,0
100	751,03	1001,29	0,9882	14,350	280,350	287,675	0,9978	0,12377	0,9904	1,2137	328,1
150	746,57	995,35	0,9823	14,025	287,025	287,513	0,9966	0,12317	0,9856	1,2079	492,1
200	742,12	989,41	0,9765	13,700	286,700	287,350	0,9955	0,12258	0,9809	1,2021	656,2

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb									
250	737,73	983,56	0,9707	13,375	286,375	287,187	0,9944	0,12199	0,9762	1,1963	820,2
300	733,35	977,72	0,9649	13,050	286,050	287,024	0,9933	0,12141	0,9715	1,1905	984,2
350	728,97	971,88	0,9592	12,725	285,725	286,861	0,9921	0,12082	0,9668	1,1848	1148,3
400	724,62	966,08	0,9534	12,400	285,400	286,697	0,9910	0,12023	0,9621	1,1791	1312,3
450	720,30	960,32	0,9478	12,075	285,075	286,534	0,9899	0,11965	0,9575	1,1734	1476,4
500	715,99	954,58	0,9421	11,750	284,750	286,371	0,9887	0,11907	0,9528	1,1677	1640,4
550	711,71	948,87	0,9364	11,425	284,425	286,208	0,9876	0,11849	0,9482	1,1620	1804,5
600	707,45	943,19	0,9308	11,100	284,100	286,044	0,9865	0,11792	0,9436	1,1564	1968,5
650	703,21	937,54	0,9253	10,775	283,775	285,881	0,9854	0,11735	0,9390	1,1508	2132,5
700	698,98	931,90	0,9197	10,450	283,450	285,717	0,9842	0,11678	0,9345	1,1452	2296,6
750	694,78	926,30	0,9142	10,125	283,125	285,554	0,9831	0,11621	0,9299	1,1396	2460,6
800	690,60	920,72	0,9087	9,800	282,800	285,390	0,9820	0,11564	0,9254	1,1340	2624,7
850	686,43	915,16	0,9031	9,475	282,475	285,227	0,9808	0,11507	0,9208	1,1285	2788,7
900	682,30	909,66	0,8977	9,150	282,150	285,063	0,9797	0,11451	0,9163	1,1230	2952,8
950	678,18	904,17	0,8923	8,825	281,825	284,900	0,9786	0,11395	0,9119	1,1175	3116,8
1000	674,09	898,71	0,8870	8,500	281,500	284,736	0,9775	0,11340	0,9074	1,1120	3280,8
1050	670,01	893,27	0,8816	8,175	281,175	284,572	0,9763	0,11285	0,9030	1,1065	3444,9
1100	665,95	887,86	0,8762	7,850	280,850	284,408	0,9752	0,11229	0,8985	1,1011	3608,9
1150	661,91	882,47	0,8709	7,525	280,525	284,245	0,9741	0,11174	0,8941	1,0957	3773,0
1200	657,89	877,11	0,8656	7,200	280,200	284,080	0,9729	0,11119	0,8897	1,0903	3937,0
1250	653,88	871,77	0,8604	6,875	279,875	283,916	0,9718	0,11064	0,8853	1,0849	4101,0
1300	649,90	866,46	0,8551	6,550	279,550	283,752	0,9707	0,11010	0,8810	1,0796	4265,1
1350	645,94	861,18	0,8499	6,225	279,225	283,589	0,9696	0,10955	0,8766	1,0743	4429,1
1400	642,00	855,93	0,8448	5,900	278,900	283,424	0,9684	0,10901	0,8723	1,0690	4593,2
1450	638,08	850,70	0,8396	5,575	278,575	283,261	0,9673	0,10847	0,8680	1,0637	4757,2

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmoonline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgaides
	mm	mb									
1500	634,18	845,50	0,8345	5,250	278,250	283,096	0,9662	0,10794	0,8637	1,0584	4921,3
1550	630,30	840,33	0,8293	4,925	277,925	282,932	0,9650	0,10740	0,8594	1,0532	5085,3
1600	626,44	835,18	0,8243	4,600	277,600	282,767	0,9639	0,10687	0,8551	1,0480	5249,3
1650	622,59	830,05	0,8192	4,275	277,275	282,603	0,9628	0,10634	0,8509	1,0428	5413,4
1700	618,77	824,96	0,8142	3,950	276,950	282,438	0,9617	0,10581	0,8467	1,0376	5577,4
1750	614,97	819,89	0,8092	3,625	276,625	282,274	0,9605	0,10528	0,8424	1,0324	5741,5
1800	611,19	814,85	0,8042	3,300	276,300	282,109	0,9594	0,10475	0,8382	1,0272	5905,5
1850	607,42	809,83	0,7992	2,975	275,975	281,945	0,9583	0,10423	0,8340	1,0221	6069,5
1900	603,67	804,83	0,7943	2,650	275,650	281,779	0,9571	0,10371	0,8299	1,0170	6233,6
1950	599,94	799,85	0,7894	2,325	275,325	281,615	0,9560	0,10319	0,8257	1,0119	6397,6
2000	596,23	794,91	0,7845	2,000	275,000	281,450	0,9549	0,10267	0,8216	1,0068	6561,7
2050	592,54	789,99	0,7797	1,675	274,675	281,286	0,9538	0,10215	0,8175	1,0018	6725,7
2100	588,86	785,08	0,7748	1,350	274,350	281,120	0,9526	0,10164	0,8133	0,9968	6889,8
2150	585,19	780,19	0,7700	1,025	274,025	280,956	0,9515	0,10113	0,8092	0,9918	7053,8
2200	581,56	775,35	0,7652	0,700	273,700	280,790	0,9504	0,10062	0,8052	0,9868	7217,8
2250	577,94	770,52	0,7605	0,375	273,375	280,625	0,9492	0,10012	0,8011	0,9818	7381,9
2300	574,34	765,72	0,7557	0,050	273,050	280,459	0,9481	0,09961	0,7971	0,9768	7545,9
2350	570,74	760,92	0,7510	—	272,725	280,295	0,9470	0,09910	0,7931	0,9719	7710,0
2400	567,19	756,19	0,7463	—	272,400	280,129	0,9459	0,09861	0,7891	0,9670	7874,0
2450	563,64	751,46	0,7417	—	272,075	279,964	0,9447	0,09811	0,7851	0,9621	8038,0
2500	560,11	746,75	0,7370	—	271,750	279,798	0,9436	0,09761	0,7811	0,9572	8202,1
2550	556,60	742,07	0,7324	—	271,425	279,633	0,9425	0,09711	0,7771	0,9523	8366,1
2600	553,10	737,41	0,7278	—	271,100	279,466	0,9413	0,09662	0,7732	0,9475	8530,2
2650	549,62	732,77	0,7231	—	270,775	279,301	0,9402	0,09614	0,7691	0,9427	8694,2
2700	546,17	728,17	0,7186	—	270,450	279,135	0,9391	0,09565	0,7652	0,9379	8858,3

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmäär	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgaüles
	mm	mb									
2750	542,73	723,58	0,7141	—	270,125	278,969	0,9380	0,09516	0,7613	0,9331	9022,3
2800	539,32	719,03	0,7097	—	269,800	278,803	0,9368	0,09467	0,7575	0,9283	9186,3
2850	535,91	714,49	0,7052	—	269,475	278,638	0,9357	0,09419	0,7536	0,9236	9350,4
2900	532,53	709,98	0,7007	—	269,150	278,471	0,9346	0,09371	0,7497	0,9189	9514,4
2950	529,16	705,49	0,6962	—	268,825	278,305	0,9334	0,09322	0,7459	0,9141	9678,5
3000	525,79	701,00	0,6918	—	268,500	278,138	0,9323	0,09274	0,7420	0,9094	9842,5
3050	522,46	696,56	0,6874	—	268,175	277,972	0,9312	0,09227	0,7382	0,9047	10006,5
3100	519,14	692,13	0,6831	—	267,850	277,805	0,9301	0,09179	0,7344	0,9001	10170,6
3150	515,84	687,73	0,6787	—	267,525	277,639	0,9289	0,09132	0,7307	0,8955	10334,6
3200	512,56	683,36	0,6744	—	267,200	277,472	0,9278	0,09085	0,7269	0,8908	10498,7
3250	509,28	678,98	0,6701	—	266,875	277,306	0,9267	0,09038	0,7231	0,8862	10662,7
3300	506,04	674,66	0,6658	—	266,550	277,139	0,9255	0,08991	0,7194	0,8817	10826,8
3350	502,80	670,35	0,6616	—	266,225	276,972	0,9244	0,08945	0,7157	0,8771	10990,8
3400	499,58	666,05	0,6574	—	265,900	276,805	0,9233	0,08899	0,7120	0,8726	11154,8
3450	496,37	661,77	0,6532	—	265,575	276,638	0,9222	0,08851	0,7083	0,8679	11318,9
3500	493,19	657,53	0,6490	—	265,250	276,470	0,9210	0,08805	0,7046	0,8634	11482,9
3550	490,03	653,32	0,6447	—	264,925	276,303	0,9199	0,08760	0,7009	0,8590	11647,0
3600	486,88	649,12	0,6406	—	264,600	276,136	0,9188	0,08714	0,6972	0,8545	11811,0
3650	483,75	644,95	0,6365	—	264,275	275,969	0,9176	0,08669	0,6936	0,8501	11975,0
3700	480,62	640,77	0,6324	—	263,950	275,801	0,9165	0,08623	0,6900	0,8456	12139,1
3750	477,53	636,65	0,6283	—	263,625	275,634	0,9154	0,08578	0,6864	0,8412	12303,1
3800	474,44	632,53	0,6242	—	263,300	275,466	0,9143	0,08534	0,6828	0,8368	12467,2
3850	471,37	628,44	0,6202	—	262,975	275,299	0,9131	0,08488	0,6792	0,8324	12631,2
3900	468,32	624,38	0,6162	—	262,650	275,131	0,9120	0,08444	0,6757	0,8281	12795,3
3950	465,28	620,32	0,6122	—	262,325	274,964	0,9109	0,08399	0,6721	0,8236	12959,3

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgaides
	mm	mb									
4000	462,26	616,30	0,6082	—11,000	262,000	274,796	0,9097	0,08355	0,6686	0,8193	13123,3
4050	459,25	612,28	0,6043	—11,325	261,675	274,628	0,9086	0,08311	0,6651	0,8150	13287,4
4100	456,25	608,28	0,6004	—11,650	261,350	274,460	0,9075	0,08267	0,6616	0,8107	13451,4
4150	453,28	604,32	0,5964	—11,975	261,025	274,293	0,9064	0,08224	0,6580	0,8065	13615,5
4200	450,32	600,38	0,5925	—12,300	260,700	274,125	0,9052	0,08181	0,6545	0,8022	13779,5
4250	447,38	596,46	0,5886	—12,625	260,375	273,957	0,9041	0,08136	0,6511	0,7980	13943,5
4300	444,46	592,56	0,5848	—12,950	260,050	273,788	0,9030	0,08093	0,6476	0,7938	14107,6
4350	441,54	588,67	0,5809	—13,275	259,725	273,621	0,9018	0,08050	0,6442	0,7895	14271,6
4400	438,64	584,81	0,5771	—13,600	259,400	273,452	0,9007	0,08007	0,6408	0,7853	14435,7
4450	435,77	580,98	0,5734	—13,925	259,075	273,284	0,8996	0,07965	0,6374	0,7811	14599,7
4500	432,90	577,15	0,5696	—14,250	258,750	273,115	0,8985	0,07923	0,6340	0,7770	14763,8
4550	430,04	573,34	0,5659	—14,575	258,425	272,947	0,8973	0,07881	0,6306	0,7728	14927,8
4600	427,22	569,58	0,5621	—14,900	258,100	272,778	0,8962	0,07839	0,6273	0,7687	15091,8
4650	424,40	565,82	0,5584	—15,225	257,775	272,610	0,8951	0,07796	0,6238	0,7646	15255,9
4700	421,59	562,07	0,5547	—15,550	257,450	272,440	0,8939	0,07754	0,6205	0,7605	15419,9
4750	418,80	558,35	0,5510	—15,875	257,125	272,271	0,8928	0,07713	0,6172	0,7563	15584,0
4800	416,02	554,65	0,5474	—16,200	256,800	272,102	0,8917	0,07672	0,6139	0,7523	15748,0
4850	413,27	550,98	0,5437	—16,525	256,475	271,934	0,8906	0,07631	0,6106	0,7483	15912,0
4900	410,52	547,32	0,5401	—16,850	256,150	271,764	0,8894	0,07590	0,6073	0,7443	16076,1
4950	407,79	543,68	0,5365	—17,175	255,825	271,596	0,8883	0,07549	0,6041	0,7403	16240,1
5000	405,09	540,08	0,5330	—17,500	255,500	271,425	0,8872	0,07508	0,6008	0,7363	16404,2
5050	402,38	536,46	0,5295	—17,825	255,175	271,257	0,8860	0,07467	0,5975	0,7323	16568,2
5100	399,69	532,88	0,5259	—18,150	254,850	271,089	0,8849	0,07427	0,5943	0,7283	16732,3
5150	397,02	529,32	0,5224	—18,475	254,525	270,918	0,8838	0,07387	0,5911	0,7244	16896,3
5200	394,36	525,77	0,5189	—18,800	254,200	270,749	0,8827	0,07347	0,5879	0,7205	17060,3

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgrades
	mm	mb									
5250	391,71	522,24	0,5155	—19,125	253,875	270,580	0,8815	0,07307	0,5847	0,7166	17224,4
5300	389,07	518,72	0,5119	—19,450	253,550	270,410	0,8804	0,07267	0,5815	0,7127	17388,4
5350	386,46	515,24	0,5085	—19,775	253,225	270,241	0,8793	0,07227	0,5784	0,7088	17552,5
5400	383,88	511,80	0,5051	—20,100	252,900	270,071	0,8781	0,07188	0,5752	0,7049	17716,5
5450	381,29	508,35	0,5017	—20,425	252,575	269,901	0,8768	0,07149	0,5720	0,7010	17880,5
5500	378,71	504,91	0,4983	—20,750	252,250	269,730	0,8759	0,07110	0,5689	0,6972	18044,6
5550	376,15	501,49	0,4950	—21,075	251,925	269,561	0,8748	0,07071	0,5658	0,6934	18208,6
5600	373,61	498,11	0,4916	—21,400	251,600	269,391	0,8736	0,07032	0,5627	0,6897	18372,7
5650	371,09	494,75	0,4882	—21,725	251,275	269,221	0,8725	0,06993	0,5596	0,6859	18536,7
5700	368,58	491,40	0,4850	—22,050	250,950	269,050	0,8714	0,06955	0,5566	0,6821	18700,8
5750	366,08	488,07	0,4817	—22,375	250,625	268,880	0,8703	0,06917	0,5535	0,6783	18864,8
5800	363,59	484,75	0,4784	—22,700	250,300	268,709	0,8692	0,06879	0,5505	0,6746	19028,8
5850	361,11	481,44	0,4751	—23,025	249,975	268,539	0,8680	0,06841	0,5474	0,6709	19192,9
5900	358,65	478,16	0,4719	—23,350	249,650	268,368	0,8669	0,06803	0,5444	0,6672	19356,9
5950	356,20	474,89	0,4687	—23,675	249,325	268,198	0,8657	0,06765	0,5414	0,6635	19521,0
6000	353,77	471,65	0,4655	—24,000	249,000	268,027	0,8646	0,06728	0,5384	0,6598	19685,0
6050	351,35	468,43	0,4622	—24,325	248,675	267,856	0,8635	0,06691	0,5354	0,6561	19849,0
6100	348,94	465,22	0,4591	—24,650	248,350	267,684	0,8624	0,06654	0,5325	0,6525	20013,1
6150	346,55	462,03	0,4559	—24,975	248,025	267,514	0,8612	0,06617	0,5294	0,6489	20177,1
6200	344,17	458,86	0,4528	—25,300	247,700	267,342	0,8601	0,06579	0,5265	0,6453	20341,2
6250	341,81	455,71	0,4497	—25,625	247,375	267,172	0,8590	0,06543	0,5236	0,6417	20505,2
6300	339,47	452,59	0,4466	—25,950	247,050	267,000	0,8578	0,06507	0,5207	0,6380	20669,3
6350	337,13	449,47	0,4436	—26,275	246,725	266,830	0,8567	0,06471	0,5178	0,6345	20833,3
6400	334,80	446,36	0,4405	—26,600	246,400	266,658	0,8556	0,06435	0,5149	0,6310	20997,3
6450	332,49	443,28	0,4374	—26,925	246,075	266,487	0,8545	0,06398	0,5119	0,6275	21161,4

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgaides
	mm	mb									
6500	330,18	440,20	0,4344	—27,250	245,750	266,315	0,8533	0,06362	0,5091	0,6240	21325,4
6550	327,90	437,16	0,4314	—27,575	245,425	266,145	0,8522	0,06326	0,5062	0,6204	21489,5
6600	325,62	434,12	0,4284	—27,900	245,100	265,973	0,8511	0,06291	0,5034	0,6169	21653,5
6650	323,36	431,11	0,4255	—28,225	244,775	265,802	0,8499	0,06255	0,5006	0,6135	21817,5
6700	321,11	428,11	0,4225	—28,550	244,450	265,630	0,8488	0,06220	0,4977	0,6101	21981,6
6750	318,87	425,13	0,4195	—28,875	244,125	265,459	0,8477	0,06185	0,4949	0,6066	22145,6
6800	316,65	422,17	0,4166	—29,200	243,800	265,286	0,8466	0,06150	0,4921	0,6031	22309,7
6850	314,43	419,21	0,4137	—29,525	243,475	265,115	0,8454	0,06116	0,4893	0,5997	22473,7
6900	312,23	416,27	0,4108	—29,850	243,150	264,942	0,8443	0,06080	0,4866	0,5964	22637,8
6950	310,04	413,35	0,4079	—30,175	242,825	264,771	0,8432	0,06046	0,4838	0,5930	22801,8
7000	307,87	410,46	0,4051	—30,500	242,500	264,598	0,8420	0,06012	0,4810	0,5896	22965,8
7050	305,71	407,58	0,4022	—30,825	242,175	264,427	0,8409	0,05978	0,4783	0,5862	23129,9
7100	303,56	404,71	0,3993	—31,150	241,850	264,254	0,8398	0,05943	0,4756	0,5827	23293,9
7150	301,42	401,86	0,3965	—31,475	241,525	264,083	0,8387	0,05909	0,4729	0,5796	23458,0
7200	299,29	399,02	0,3937	—31,800	241,200	263,910	0,8375	0,05876	0,4702	0,5762	23622,0
7250	297,18	396,21	0,3910	—32,125	240,875	263,738	0,8364	0,05843	0,4674	0,5729	23786,0
7300	295,08	393,41	0,3883	—32,450	240,550	263,565	0,8353	0,05809	0,4648	0,5697	23950,1
7350	292,99	390,62	0,3855	—32,775	240,225	263,393	0,8341	0,05776	0,4621	0,5664	24114,1
7400	290,90	387,83	0,3828	—33,100	239,900	263,219	0,8330	0,05743	0,4595	0,5632	24278,2
7450	288,84	385,09	0,3800	—33,425	239,575	263,046	0,8319	0,05710	0,4569	0,5599	24442,2
7500	286,79	382,36	0,3773	—33,750	239,250	262,872	0,8308	0,05676	0,4542	0,5567	24606,2
7550	284,75	379,64	0,3746	—34,075	238,925	262,700	0,8296	0,05644	0,4516	0,5535	24770,3
7600	282,72	376,93	0,3720	—34,400	238,600	262,527	0,8285	0,05612	0,4490	0,5503	24934,3
7650	280,69	374,22	0,3693	—34,725	238,275	262,355	0,8274	0,05580	0,4464	0,5471	25098,4
7700	278,69	371,56	0,3667	—35,050	237,950	262,182	0,8262	0,05547	0,4439	0,5440	25262,4

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmäär	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb									
7750	276,70	368,90	0,3640	—35,375	237,625	262,010	0,8251	0,05515	0,4412	0,5408	25426,5
7800	274,71	366,25	0,3614	—35,700	237,300	261,836	0,8240	0,05483	0,4386	0,5377	25590,5
7850	272,74	363,62	0,3588	—36,025	236,975	261,663	0,8229	0,05451	0,4361	0,5345	25754,5
7900	270,78	361,01	0,3563	—36,350	236,650	261,489	0,8217	0,05419	0,4336	0,5314	25918,6
7950	268,83	358,41	0,3537	—36,675	236,325	261,315	0,8206	0,05388	0,4310	0,5283	26082,6
8000	266,89	355,82	0,3512	—37,000	236,000	261,140	0,8195	0,05356	0,4285	0,5252	26246,7
8050	264,97	353,26	0,3486	—37,325	235,675	260,967	0,8183	0,05324	0,4260	0,5221	26410,7
8100	263,06	350,72	0,3461	—37,650	235,350	260,792	0,8172	0,05293	0,4235	0,5191	26574,7
8150	261,16	348,18	0,3436	—37,975	235,025	260,619	0,8161	0,05262	0,4211	0,5161	26738,8
8200	259,26	345,65	0,3411	—38,300	234,700	260,444	0,8149	0,05232	0,4185	0,5130	26902,8
8250	257,38	343,15	0,3386	—38,625	234,375	260,271	0,8138	0,05201	0,4161	0,5100	27066,9
8300	255,51	340,65	0,3362	—38,950	234,050	260,096	0,8127	0,05170	0,4137	0,5070	27230,9
8350	253,65	338,17	0,3337	—39,275	233,725	259,922	0,8116	0,05140	0,4113	0,5040	27395,0
8400	251,79	335,69	0,3312	—39,600	233,400	259,746	0,8104	0,05109	0,4088	0,5010	27559,0
8450	249,96	333,25	0,3288	—39,925	233,075	259,571	0,8093	0,05079	0,4063	0,4981	27723,0
8500	248,13	330,81	0,3265	—40,250	232,750	259,395	0,8082	0,05049	0,4040	0,4952	27887,1
8550	246,32	328,40	0,3241	—40,575	232,425	259,221	0,8071	0,05019	0,4016	0,4922	28051,1
8600	244,52	326,00	0,3217	—40,900	232,100	259,046	0,8059	0,04989	0,3992	0,4893	28215,2
8650	242,73	323,61	0,3193	—41,225	231,775	258,871	0,8048	0,04960	0,3968	0,4864	28379,2
8700	240,94	321,23	0,3170	—41,550	231,450	258,696	0,8037	0,04931	0,3945	0,4834	28543,2
8750	239,17	318,87	0,3146	—41,875	231,125	258,521	0,8025	0,04901	0,3921	0,4805	28707,2
8800	237,40	316,51	0,3123	—42,200	230,800	258,346	0,8014	0,04872	0,3898	0,4777	28871,3
8850	235,65	314,17	0,3101	—42,525	230,475	258,171	0,8003	0,04843	0,3874	0,4749	29035,4
8900	233,91	311,85	0,3078	—42,850	230,150	257,995	0,7992	0,04813	0,3851	0,4720	29199,4
8950	232,18	309,55	0,3054	—43,175	229,825	257,820	0,7980	0,04784	0,3828	0,4692	29363,5

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb									
9000	230,45	307,24	0,3032	-43,500	229,500	257,644	0,7969	0,04756	0,3806	0,4664	29527,5
9050	228,74	304,96	0,3009	-43,825	229,175	257,468	0,7958	0,04727	0,3782	0,4625	29691,5
9100	227,05	302,71	0,2987	-44,150	228,850	257,291	0,7946	0,04699	0,3759	0,4607	29855,6
9150	225,37	300,47	0,2965	-44,475	228,525	257,116	0,7935	0,04671	0,3737	0,4580	30019,6
9200	223,68	298,22	0,2942	-44,800	228,200	256,940	0,7924	0,04642	0,3715	0,4552	30183,7
9250	222,01	295,99	0,2921	-45,125	227,875	256,765	0,7913	0,04614	0,3692	0,4525	30347,7
9300	220,35	293,78	0,2899	-45,450	227,550	256,588	0,7901	0,04586	0,3669	0,4498	30511,7
9350	218,69	291,56	0,2877	-45,775	227,225	256,414	0,7890	0,04558	0,3647	0,4470	30675,8
9400	217,06	289,39	0,2856	-46,100	226,900	256,237	0,7879	0,04531	0,3625	0,4443	30839,8
9450	215,44	287,23	0,2835	-46,425	226,575	256,061	0,7867	0,04503	0,3603	0,4416	31003,9
9500	213,82	285,07	0,2813	-46,750	226,250	255,884	0,7856	0,04475	0,3580	0,4388	31167,9
9550	212,22	282,94	0,2792	-47,075	225,925	255,709	0,7845	0,04448	0,3559	0,4362	31332,0
9600	210,62	280,80	0,2771	-47,400	225,600	255,533	0,7833	0,04421	0,3538	0,4336	31496,0
9650	209,02	278,67	0,2750	-47,725	225,275	255,357	0,7822	0,04394	0,3517	0,4309	31660,0
9700	207,44	276,56	0,2730	-48,050	224,950	255,181	0,7811	0,04368	0,3495	0,4283	31824,1
9750	205,86	274,46	0,2708	-48,375	224,625	255,006	0,7800	0,04341	0,3473	0,4257	31988,1
9800	204,30	272,38	0,2688	-48,700	224,300	254,829	0,7788	0,04313	0,3452	0,4230	32152,2
9850	202,75	270,31	0,2667	-49,025	223,975	254,652	0,7777	0,04287	0,3431	0,4204	32316,2
9900	201,21	268,26	0,2647	-49,350	223,650	254,473	0,7766	0,04261	0,3409	0,4178	32480,2
9950	199,68	266,22	0,2627	-49,675	223,325	254,295	0,7754	0,04234	0,3388	0,4152	32644,3
10000	198,16	264,19	0,2606	-50,000	223,000	254,116	0,7743	0,04208	0,3367	0,4127	32808,3
10100	195,14	260,17	0,2567	-50,650	222,350	253,762	0,7721	0,04156	0,3323	0,4075	33136,4
10200	192,16	256,19	0,2528	-51,300	221,700	253,408	0,7698	0,04105	0,3279	0,4026	33464,5
10300	189,22	252,27	0,2490	-51,950	221,050	253,053	0,7675	0,04054	0,3235	0,3976	33792,6
10400	186,31	248,39	0,2451	-52,600	220,400	252,698	0,7653	0,04003	0,3204	0,3926	34120,7

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	T_k Harmooniline keskmine	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb									
10500	183,45	244,58	0,2414	—53,250	219,750	252,342	0,7630	0,03953	0,3147	0,3876	34448,7
10600	180,61	240,79	0,2377	—53,900	219,100	251,985	0,7608	0,03904	0,3104	0,3828	34776,8
10700	177,82	237,07	0,2339	—54,550	218,450	251,627	0,7585	0,03855	0,3061	0,3775	35104,9
10800	175,06	233,39	0,2303	—55,200	217,800	251,267	0,7563	0,03805	0,3045	0,3732	35433,0
10900	172,34	229,77	0,2267	—55,850	217,150	250,910	0,7540	0,03757	0,3007	0,3685	35761,1
11000	169,59	225,85	0,2232	—56,500	216,500	250,552	0,7517	0,03710	0,2969	0,3638	36089,2

Tabel 38. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetiline tabel
11000 kuni 15000 m.

z m	b		$\frac{b}{B_0}$	t °C	T	$\frac{T}{T_0}$	ρ	$\frac{\rho}{\rho_0}$	γ	z jalgades
	mm	mb								
11000	169,6	225,8	0,223	—56,5	216,5	0,752	0,037	0,297	0,364	36089,2
11100	166,7	222,2	0,219	—56,5	216,5	0,752	0,037	0,292	0,358	36417,2
11200	164,2	218,9	0,216	—56,5	216,5	0,752	0,036	0,288	0,352	36745,3
11300	161,6	215,4	0,213	—56,5	216,5	0,752	0,035	0,283	0,347	37073,4
11400	159,1	212,1	0,209	—56,5	216,5	0,752	0,035	0,279	0,341	37401,5
11500	156,6	208,8	0,206	—56,5	216,5	0,752	0,034	0,274	0,336	37729,6
11600	154,1	205,4	0,203	—56,5	216,5	0,752	0,034	0,270	0,331	38057,7
11700	151,8	202,4	0,200	—56,5	216,5	0,752	0,033	0,266	0,326	38385,7
11800	149,3	199,1	0,197	—56,5	216,5	0,752	0,033	0,262	0,321	38713,8
11900	147,0	196,0	0,193	—56,5	216,5	0,752	0,032	0,257	0,315	39041,9
12000	144,6	192,8	0,190	—56,5	216,5	0,752	0,032	0,253	0,310	39370,0
12100	142,4	189,9	0,187	—56,5	216,5	0,752	0,031	0,249	0,306	39698,1
12200	140,2	186,9	0,185	—56,5	216,5	0,752	0,031	0,246	0,301	40026,2
12300	138,0	184,0	0,182	—56,5	216,5	0,752	0,030	0,242	0,296	40354,2
12400	135,8	181,1	0,179	—56,5	216,5	0,752	0,030	0,238	0,292	40682,3
12500	133,7	178,3	0,176	—56,5	216,5	0,752	0,029	0,234	0,287	41010,4
12600	131,6	175,5	0,173	—56,5	216,5	0,752	0,029	0,231	0,283	41338,5
12700	129,6	172,8	0,171	—56,5	216,5	0,752	0,028	0,227	0,278	41666,6
12800	127,5	170,0	0,168	—56,5	216,5	0,752	0,028	0,223	0,274	41994,7
12900	125,5	167,3	0,165	—56,5	216,5	0,752	0,028	0,220	0,269	42322,7
13000	123,7	164,9	0,163	—56,5	216,5	0,752	0,027	0,217	0,265	42650,8
13100	121,7	162,3	0,160	—56,5	216,5	0,752	0,027	0,213	0,261	42978,9
13200	119,7	159,6	0,158	—56,5	216,5	0,752	0,026	0,210	0,257	43307,0
13300	117,8	157,1	0,155	—56,5	216,5	0,752	0,026	0,206	0,253	43635,1
13400	116,0	154,7	0,153	—56,5	216,5	0,752	0,025	0,203	0,249	43963,2
13500	114,2	152,3	0,150	—56,5	216,5	0,752	0,025	0,200	0,245	44291,2
13600	112,4	149,9	0,148	—56,5	216,5	0,752	0,025	0,197	0,241	44619,3
13700	110,7	147,6	0,146	—56,5	216,5	0,752	0,024	0,194	0,238	44947,4
13800	108,9	145,2	0,143	—56,5	216,5	0,752	0,024	0,191	0,234	45275,5
13900	107,2	142,9	0,141	—56,5	216,5	0,752	0,024	0,188	0,230	45603,6
14000	105,5	140,7	0,139	—56,5	216,5	0,752	0,023	0,185	0,227	45931,7
14100	103,9	138,5	0,137	—56,5	216,5	0,752	0,023	0,182	0,223	46259,7
14200	102,2	136,3	0,135	—56,5	216,5	0,752	0,022	0,179	0,220	46587,8
14300	100,6	134,1	0,132	—56,5	216,5	0,752	0,022	0,176	0,216	46915,9
14400	99,1	132,1	0,130	—56,5	216,5	0,752	0,022	0,174	0,213	47244,0
14500	97,5	130,0	0,128	—56,5	216,5	0,752	0,021	0,171	0,209	47572,1
14600	96,0	128,0	0,126	—56,5	216,5	0,752	0,021	0,168	0,206	47900,2
14700	94,5	126,0	0,124	—56,5	216,5	0,752	0,021	0,166	0,203	48228,2
14800	93,1	124,1	0,123	—56,5	216,5	0,752	0,020	0,163	0,200	48556,3
14900	91,6	122,1	0,121	—56,5	216,5	0,752	0,020	0,160	0,197	48884,4
15000	90,1	120,1	0,119	—56,5	216,5	0,752	0,020	0,158	0,194	49212,5

Tabel 39. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetriline tabel altimeetri kontrollimiseks ($\varphi = 45^\circ$ N laiust).

Kõrgus m	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures mm	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures		Kõrgus m	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures mm	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures	
		mm	mb			mm	mb
—1000	854,6	856,7	1142,2	2500	560,1	561,5	748,6
—900	844,7	846,7	1128,8	2600	553,1	554,4	739,1
—800	834,9	836,9	1115,8	2700	546,2	547,5	729,9
—700	825,2	827,2	1102,8	2800	539,3	540,6	720,7
—600	815,7	817,7	1090,2	2900	532,5	533,8	711,7
—500	806,2	808,1	1077,4	3000	525,8	527,1	702,7
—400	796,8	798,7	1064,8	3100	519,1	520,4	693,8
—300	787,4	789,3	1052,3	3200	512,6	513,8	685,0
—200	778,2	780,1	1040,0	3300	506,0	507,2	676,2
—100	769,1	771,0	1027,9	3400	499,6	500,8	667,7
0	760,0	761,8	1015,7	3500	493,2	494,4	659,1
100	751,0	752,8	1003,7	3600	486,9	488,1	650,7
200	742,1	743,9	991,8	3700	480,6	481,8	642,3
300	733,4	735,2	980,2	3800	474,4	475,5	633,9
400	724,6	726,3	968,3	3900	468,3	469,4	625,8
500	716,0	717,7	956,9	4000	462,3	463,4	617,8
600	707,5	709,2	945,5	4100	456,3	457,4	609,8
700	699,0	700,7	934,2	4200	450,3	451,4	601,8
800	690,6	692,3	923,0	4300	444,5	445,6	594,1
900	682,3	683,9	911,8	4400	438,6	439,7	586,2
1000	674,1	675,7	900,9	4500	432,9	433,9	578,5
1100	666,0	667,6	890,1	4600	427,2	428,2	570,9
1200	657,9	659,5	879,3	4700	421,6	422,6	563,4
1300	649,9	651,5	868,6	4800	416,0	417,0	556,0
1400	642,0	643,6	858,1	4900	410,5	411,5	548,6
1500	634,2	635,7	847,5	5000	405,1	406,1	541,4
1600	626,4	627,9	837,1	5100	399,7	400,7	534,2
1700	618,8	620,3	827,0	5200	394,4	395,4	527,2
1800	611,2	612,7	816,9	5300	389,1	390,0	520,0
1900	603,7	605,2	806,9	5400	383,9	384,8	513,0
2000	596,2	597,6	796,7	5500	378,7	379,6	506,1
2100	588,9	590,3	787,0	5600	373,6	374,5	499,3
2200	581,6	583,0	777,3	5700	368,6	369,5	492,6
2300	574,3	575,7	767,5	5800	363,6	364,5	486,0
2400	567,2	568,6	758,1	5900	358,7	359,6	479,4

Kõrgus	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures	
		mm	mb
6000	353,8	354,7	472,9
6100	348,9	349,7	466,2
6200	344,2	345,0	460,0
6300	339,5	340,3	453,7
6400	334,8	335,6	447,4
6500	330,2	331,0	441,3
6600	325,6	326,4	435,2
6700	321,1	321,9	429,2
6800	316,7	317,5	423,3
6900	312,2	313,0	417,3
7000	307,9	308,6	411,4
7100	303,6	304,3	405,7
7200	299,3	300,0	400,0
7300	295,1	295,8	394,4
7400	290,9	291,6	388,8
7500	286,8	287,5	383,3
7600	282,7	283,4	377,8
7700	278,7	279,4	372,5
7800	274,7	275,4	367,2
7900	270,8	271,5	362,0

Kõrgus	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures	
		mm	mb
8000	266,9	267,5	356,6
8100	263,1	263,7	351,6
8200	259,3	259,9	346,5
8300	255,5	256,1	341,4
8400	251,8	252,4	336,5
8500	248,1	248,7	331,6
8600	244,5	245,1	326,8
8700	240,9	241,5	322,0
8800	237,4	238,0	317,3
8900	233,9	234,5	312,6
9000	230,5	231,1	308,1
9100	227,1	227,6	303,4
9200	223,7	224,2	298,9
9300	220,4	220,9	294,5
9400	217,1	217,6	290,1
9500	213,8	214,3	285,7
9600	210,6	211,1	281,4
9700	207,4	207,9	277,2
9800	204,3	204,8	273,0
9900	201,2	201,7	268,9
10000	198,2	198,7	264,9

Tabel 40. $+10^{\circ}\text{C}$ isothermilise õhkkonna hüpsomeetriline tabel altimeetri kontrollimiseks ($\varphi=45^{\circ}\text{N}$ laiust).

Kõrgus m	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ juures		Kõrgus m	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda $+15^{\circ}\text{C}$ juures	
	mm	mm	mb		mm	mm	mb
—1000	857,5	859,6	1146,0	2500	562,0	563,4	751,1
—900	847,2	849,3	1132,3	2600	555,3	556,6	742,1
—800	837,1	839,1	1118,7	2700	548,6	549,9	733,2
—700	827,0	829,0	1105,3	2800	542,0	543,3	724,4
—600	817,1	819,1	1092,0	2900	535,6	536,8	715,7
—500	807,3	809,2	1078,9	3000	529,1	530,4	707,1
—400	797,6	799,5	1065,9	3100	522,7	524,0	698,6
—300	788,0	789,9	1053,2	3200	516,5	517,7	690,2
—200	778,6	780,5	1040,5	3300	510,3	511,5	681,9
—100	769,2	771,1	1028,0	3400	504,1	505,4	673,8
0	760,0	761,8	1015,7	3500	498,1	499,3	665,7
100	750,9	752,7	1003,5	3600	492,1	493,3	657,7
200	741,9	743,7	991,5	3700	486,2	487,4	649,8
300	733,0	734,7	979,6	3800	480,4	481,5	642,0
400	724,2	725,9	967,8	3900	474,6	475,8	634,3
500	715,5	717,2	956,2	4000	468,9	470,1	626,7
600	706,9	708,6	944,7	4100	463,3	464,4	619,2
700	698,4	700,1	933,4	4200	457,7	458,8	611,7
800	690,0	691,7	922,2	4300	452,2	453,3	604,4
900	681,8	683,4	911,1	4400	446,8	447,9	597,1
1000	673,6	675,2	900,2	4500	441,5	442,5	590,0
1100	665,5	667,1	889,4	4600	436,2	437,2	582,9
1200	657,5	659,1	878,7	4700	430,9	432,0	575,9
1300	649,6	651,2	868,2	4800	425,8	426,8	569,0
1400	641,8	643,4	857,8	4900	420,6	421,7	562,2
1500	634,1	635,7	847,5	5000	415,6	416,6	555,4
1600	626,5	628,0	837,3	5100	410,6	411,6	548,8
1700	619,0	620,5	827,3	5200	405,7	406,7	542,2
1800	611,6	613,0	817,3	5300	400,8	401,8	535,7
1900	604,2	605,7	807,5	5400	396,0	397,0	529,2
2000	597,0	598,4	797,8	5500	391,3	392,2	522,9
2100	589,8	591,2	788,3	5600	386,6	387,5	516,6
2200	582,7	584,1	778,8	5700	381,9	382,8	510,4
2300	575,7	577,1	769,4	5800	377,3	378,3	504,3
2400	568,8	570,2	760,2	5900	372,8	373,7	498,2

Kõrgus	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures	
		mm	mb
6000	368,3	369,2	492,3
6100	363,9	364,8	486,4
6200	359,6	360,4	480,5
6300	355,2	356,1	474,8
6400	351,0	351,8	469,1
6500	346,8	347,6	463,4
6600	342,6	343,4	457,9
6700	338,5	339,3	452,4
6800	334,4	335,2	446,9
6900	330,4	331,2	441,6
7000	326,5	327,2	436,3
7100	322,5	323,3	431,0
7200	318,7	319,4	425,9
7300	314,8	315,6	420,8
7400	311,1	311,8	415,7
7500	307,3	308,1	410,7
7600	303,6	304,4	405,8
7700	300,0	300,7	400,9
7800	296,4	297,1	396,1
7900	292,8	293,5	391,4

Kõrgus	Baromeet- riline rõ- humine elavhõb. 0°C juures	Baromeetriline lu- gem elavhõbeda +15°C juures	
		mm	mb
8000	289,3	290,0	386,7
8100	285,9	286,5	382,0
8200	282,4	283,1	377,4
8300	279,0	279,7	372,9
8400	275,7	276,4	368,4
8500	272,4	273,0	364,0
8600	269,1	269,8	359,7
8700	265,9	266,5	355,3
8800	262,7	263,3	351,1
8900	259,5	260,2	346,9
9000	256,4	257,0	342,7
9100	253,3	254,0	338,6
9200	250,3	250,9	334,5
9300	247,3	247,9	330,5
9400	244,3	244,9	326,5
9500	241,4	242,0	322,6
9600	238,5	239,1	318,7
9700	235,6	236,2	314,9
9800	232,8	233,4	311,1
9900	230,0	230,6	307,4
10000	227,3	227,8	303,7

Tabel 41. 0° C isothermilise õhkkonna hüpsomeetriline tabel altimeetri kontrollimiseks.

Kõrgus m	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõbeda 0°C juures taanda- tult $\varphi=45^\circ$ juurde	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõb. +15°C juures vastavalt meie geograafi- lisele laiusele	Kõrgus m	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõbeda 0°C juures taanda- tult $\varphi=45^\circ$ juurde	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõb. +15°C juures vastavalt meie geograafi- lisele laiusele
0	760	760,9			
100	750,54	751,4	3600	484,08	484,7
200	741,19	742,1	3700	478,05	478,6
300	731,96	732,8	3800	472,09	472,7
400	722,84	723,7	3900	466,22	466,8
500	713,84	714,7	4000	460,42	461,0
600	704,95	705,8	4100	454,68	455,2
700	696,17	697,0	4200	449,02	449,6
800	687,50	688,3	4300	443,43	444,0
900	678,94	679,8	4400	437,91	438,4
1000	670,49	671,3	4500	432,46	433,0
1100	662,14	662,9	4600	427,07	427,6
1200	653,90	654,7	4700	421,75	422,3
1300	645,75	646,5	4800	416,50	417,0
1400	637,71	638,5	4900	411,32	411,8
1500	629,77	630,5	5000	406,19	406,7
1600	621,92	622,7	5100	401,14	401,6
1700	614,18	614,9	5200	396,14	396,6
1800	606,53	607,3	5300	391,21	391,7
1900	598,98	609,7	5400	386,34	386,8
2000	591,53	592,2	5500	381,53	382,0
2100	584,15	584,8	5600	376,78	377,2
2200	576,88	577,6	5700	372,08	372,5
2300	569,69	570,4	5800	367,45	367,9
2400	562,60	563,3	5900	362,88	363,3
2500	555,59	556,3	6000	358,36	358,8
2600	548,67	549,3	6100	353,90	354,3
2700	541,84	542,5	6200	349,49	349,9
2800	535,09	535,7	6300	345,14	345,6
2900	528,43	529,1	6400	340,84	341,2
3000	521,85	522,5	6500	336,60	337,0
3100	515,35	516,0	6600	332,41	332,8
3200	508,93	509,5	6700	328,27	328,7
3300	502,62	503,2	6800	324,18	324,6
3400	496,36	497,0	6900	320,14	320,5
3500	490,18	490,8	7000	316,16	316,5

Kõrgus m	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõbeda 0°C juures taanda- tult $\varphi=45^\circ$ juurde	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõb. +15°C juures vastavalt meie geograafi- lisele laiusele
7100	312,22	312,6
7200	308,33	308,7
7300	304,49	304,8
7400	300,70	301,1
7500	296,96	297,3
7600	293,26	293,6
7700	289,61	290,0
7800	286,00	286,3
7900	282,44	282,8
8000	278,92	279,3
8100	275,45	275,8
8200	272,02	272,3
8300	268,63	269,0
8400	265,29	265,6
8500	261,99	262,3

Kõrgus m	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõbeda 0°C juures taanda- tult $\varphi=45^\circ$ juurde	Baromeetril. rõ- humine mm Hg elavhõb. +15°C juures vastavalt meie geograafi- lisele laiusele
8600	258,72	259,0
8700	255,50	255,8
8800	252,32	252,6
8900	249,18	249,5
9000	246,07	246,4
9100	243,01	243,3
9200	239,99	240,3
9300	237,00	237,3
9400	234,05	234,3
9500	231,13	231,4
9600	228,25	228,5
9700	225,41	225,7
9800	222,61	222,9
9900	219,83	220,1
10000	217,10	217,4

Sisukord.

	Lk.
Eessõna	XIII
Tarvitatud kirjandust	XIV
Saateks	XV
Õhkkonna ulatus ja koosseis	1
Õhkkonna jaotus kõrgussihis	4
Troposfääri temperatuur	7
Termodünaamiline temperatuuri-astmik	13
Gaastermomeetrid	20
Vedeliktermomeetrid	22
Termomeetrite kompareerimine (tareerimine)	27
Elektrilised takistustermomeetrid	29
Metallide joonpaisumise ja vedelikkude rõhumise mõjul töötavad termomeetrid	32
Termograafid	35
Temperatuuri-mõõteriistade näitamise hiline mine muutuva temperatuuriga kesk- konnas ja päikese kiirgamise mõju mõõteriistadele	40
Rahvusvaheline temperatuuri-astmik	48
Õhusamba keskmise temperatuuri määramine	49
Õhkkonna rõhumine	58
Aine erikaalu muutuvus olenevalt temperatuurist, geograafilisest laiusest ja kõr- gusest	63
Elavhõbebaromeetri lugemi korrigeerimine	67
Elavhõbeda kapillaarsest depressioonist tingitud korrektsioon	69
Elavhõbeda-auru ja tühikusse sattunud õhu rõhumisest tingitud korrektsioon	70
Raskustungi muutusest tingitud korrektsioon	71
Koha kõrgusest merepinnalt tingitud korrektsioon	73
Aneroidbaromeeter	73
Barograaf	74
Aneroidsete mõõteriistade lugemi korrigeerimine	76
Õhkkonna rõhumise mõõtmine millibaarides	85
Baromeetrilise rõhumise ümberarvutus rõhumisele kilogrammides ühe-ruutmeetri- lisele pindalale	86
Õhu erimaht ja erikaal	89
Gaaside karakterlik ehk Clapeyron'i võrrand	91
Õhu erikaalu ja erimahu arvutluse võrrandid	93
Õhu niiskus	95
Õhu niiskuse jaotus õhkkonnas ja selle niiskuse mõju õhu erikaalule	101

Õhu tihedus	105
Korrapärased õhkkonnad	107
Homogeenne (ühtlane) õhkkond	109
Isotermiline õhkkond	111
Baromeetiline kõrgusaste	118
Baromeetrilise rõhumise taandamine merepinna kõrgusele	120
Polütroopne õhkkond	122
Rahvusvaheline standardne õhkkond	128
Standardse õhkkonna õhu erikaalu ja tiheduse ligikaudsed arvutusvõrrandid	134
Õhkkonna rõhumise mõjul töötavad kõrgusemõõteriistad	135
Altimeetri instrumentaalne viga ja selle määramine	138
Altimeetri lugemi korrigeerimine vastavalt vaba õhkkonna temperatuurilisele seisukorrale	146
Lennukõrguse korrigeerimine vastavalt lennusuunas esinevale õhkkonna baromeetrilisele rõhumisele ja maakoha kõrgusele	153
Variomeetrid	156

T A B E L I D.

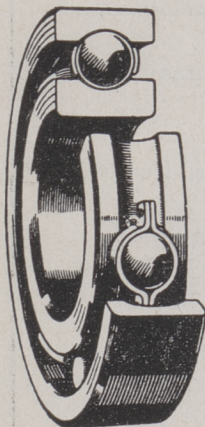
Tabel 30. Korrektsioonid $\Delta b'''$ elavhõbebaromeetri lugemi taandamiseks elavhõbeda 0°C juurde	158
Tabel 31. Elavhõbebaromeetri kapillaarne depressioon mm Hg	159
Tabel 32. Elavhõbebaromeetri kapillaarne depressioon mm Hg firma R. Fuess'i andmeil	160
Tabel 33. Korrektsioonid $\Delta b'$ baromeetrilise lugemi taandamiseks 45° geograafilisele laiusle	161
Tabel 34. Küllastatud veeauru rõhumine e_0 mm Hg 45° geograafilisel laiusel elavhõbeda temperatuuril 0°C	162
Tabel 35. Veeauru küllastusrõhk e_0 mm Hg (allpool 0°C — jää kohal). Vee mass q_0 ühes kantmeetris grammides	163
Tabel 36. Baromeetrilised kõrgusastmed vastavalt baromeetrilisele rõhumisele (mb või mm Hg) ja õhu temperatuurile	164
Tabel 37. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetiline tabel — 1000 kuni 11 000 m	170
Tabel 38. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetiline tabel 11 000 kuni 15 000 m	180
Tabel 39. Rahvusvahelise standardse õhkkonna hüpsomeetiline tabel altimeetri kontrollimiseks ($\varphi = 45^\circ \text{N}$ laiust)	181
Tabel 40. $+10^\circ \text{C}$ isotermilise õhkkonna hüpsomeetiline tabel altimeetri kontrollimiseks ($\varphi = 45^\circ \text{N}$ laiust)	183
Tabel 41. 0°C isotermilise õhkkonna hüpsomeetiline tabel altimeetri kontrollimiseks	185



SKF

evib terves maailmas kuulsust oma tarvitajaskonna rahulolu ärateenimises ja hoiab seda au kõrgel, seda mitte mängu panes. SKF uurib seepärast terves maailmas igal tööstusalal laagriprobleeme ja omab rahvusvahelist inseneride teenistust, mis müüki ja kõigi saadetiste töökindlust jälgib, et kogutud kogemuste põhjal kogu tarvitajaskonnale tippsaavutist pakuda tootega, mis on varustatud märgiga

SKF



Rootsi kuullaagrid

PEAESINDUS JA LADU:

LINKE & MARTINSON

Vene tänav 11

TALLINN

Telefonid: 432-86
432-58

VEDRUDETEHAS JA MEHAANIKATÖÖSTUS

H. FEIERBACH & Ko.

Tallinn, Jaama tn. nr. 10, tel. 304-04

Mitmesuguseid vedrusid: autodele, tekstiil- ja teistele vabrikutele jne. jne.

Koonus-hammasrattaid: otse- ja spiraalhammas- tega.

Silinder-hammasrattaid: otse- ja spiraalhammas- tega.

Tigu-ülekandeid.

Raua, terase, malmi, vase hõõveldus, freesimine, treimine ja stoosimine.

Uute autokerele valmistamine ja plekitööd.

Automontaaž ja masinaehitus.

Sepa- ja tugevjõupressi-tööd.

Spindlid, võlvid jne. jne. jne.

Tehniline nõuanne, kalkulatsioon, tööd joonise ja eeskuju järgi.



TLÜ AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00383882 2