

# O9. TEMPERATUURI MÕOTMINE OPTILISE PÜROMEETRIGA

© Hans Korge, TÜ, 2007

## 1. Tööülesanne

Optilise püromeetri ehituse ja tööpõhimõttega tutvumine. Hõõguva keha temperatuuri mõõtmine ja tema kiirgavuse temperatuurilise sõltuvuse määramine.

## 2. Katsevahendid

Optiline püromeeter ОППІР-017 (mõõtmispiirkonnad 800 °C – 1400 °C veaga ± 20 °C ja 1200 °C – 2000 °C veaga ± 30 °C), volframlindiga hõõglamp (hõõglindi pindala  $S \approx 1 \text{ cm}^2$ ), ampermeeter, voltmeeter, voolutrafo УТТ-5М (primaarmähise voolud 50 A / 15 A, sekundaarmähise vool 5 A, täpsusklass 0,2 %), autotrafo ЛАТФ-1М, aku.

## 3. Vajalikud eelteadmised

Kõik kehad, kui nende absoluutne temperatuur  $T > 0 \text{ K}$ , kiirgavad elektromagnetlaineid ja seda kiirgust nimetatakse soojuskiirguseks. Kuni 500 °C kuumutatud kehad kiirgavad põhiliselt infrapunases spektriosas, kõrgemal temperatuuril aga ka silmale nähtavat valgust ja ultraviolettkiirgust. Teades, kuidas kiirgus sõltub keha temperatuurist, saab seda kasutada keha temperatuuri mõõtmiseks. Vastavaid mõõteriistu nimetatakse püromeetriteks ja vastavat optika valdkonda – püromeetriaks.

Keha soojuskiirgust iseloomustatakse keha kiirgamisvõimega. Kõige suurem kiirgamisvõime on (absoluutselt) mustal kehal. Mustaks nimetatakse keha, mis täielikult neelab temale langeva soojuskiirguse, tema neelavus on alati  $a_{\text{must}} = 1$  ja ei sõltu langeva kiirguse lainepikkusest ega neelava keha temperatuurist:  $a_{\text{must}} \neq a(\lambda, T)$ . Mainigem, et selliselt määratletud must keha ei pruugi silmale paista sugugi mustana, näiteks Päike või ava kuumutatud õõnsuse seinas, mis on väga heaks musta keha mudeliks.

Antud töös on meile olulised kaks kiirgusega seotud suurust<sup>1</sup>: kiirgavus  $M_e(T)$  ja spektraalne kiirgavus  $m_e(\lambda, T)$  ehk kiirgavus lainepikkuste vahemikus  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ .

**Kiirgavuseks** nimetatakse keha pinnaühikult ajaühikus kõikides suundades kiiratud energiahulka. Kiirgavuse mõõtühikuks on  $1 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

Kiirgavus sõltub ainult keha temperatuurist  $T$  ja antud temperatuuril on maksimaalne kiirgavus mustal kehal. Reaalsete kehade kiirgavus on alati väiksem musta keha kiirgavusest samal temperatuuril.

Et antud temperatuuril  $T$  on kehade (ka musta keha) kiirgamisvõime erinevatel lainepikkustel  $\lambda$  erinev, siis selle jaotuse kirjeldamiseks kasutatakse **spektraalset kiirgavust** ja tema

<sup>1</sup> Optikas jaguneb elektromagnetilise kiirguse mõõtmine radiomeetriaks (kiirguse energia ja selle jaotumise mõõtmine) ning fotomeetriaks (nähtavat kiirgust iseloomustavate suuruste mõõtmine). Vastav materjal “Radiomeetria. Fotomeetria” on optika aineveebis aadressil:

<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efi/loengumaterjalid/opt/optika/foto.pdf>

Radiomeetrilisi ehk energeetilisi suurusi eristatakse analoogilistest fotomeetrilistest suurustest alaindeksi  $e$  lisamisega vastava suuruse tähistusele.

suurus sõltub nii vaadeldavast lainepikkusest kui ka temperatuurist:  $m_e = m_e(\lambda, T)$ .

Spektraalse kiirgavuse ühikuks on  $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}}$ . Seos kiirgavuse ja spektraalse kiirgavuse vahel:

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} m_e(\lambda, T) \cdot d\lambda. \quad (1)$$

Jällegi, reaalse keha spektraalne kiirgavus antud lainepikkuse ja temperatuuri korral on alati väiksem, kui mustal kehal.

Musta keha spektraalset kiirgavust kirjeldab Plancki valem:

$$m_{e,\text{must}}(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1}, \quad (2)$$

kus Plancki konstant  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $c$  – valguse kiirus ja Boltzmanni konstant  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

Musta keha spektraalse kiirgavuse graafikud temperatuuridel 1000 K, 1500 K ja 2000 K on esitatud joonisel 1.

Asetades Plancki valemi (2) avaldisse (1), saame pärast integreerimist üle kõigi lainepikkuste  $\lambda$  musta keha kiirgavuse:

$$M_{e,\text{must}}(T) = \int_0^{\infty} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1} \cdot d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4. \quad (3)$$

Valemi (3) tavapärase kuju (4) kannab Stefan-Boltzmanni seaduse nime:

$$M_{e,\text{must}}(T) = \sigma T^4, \quad (4)$$

kus  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$  on Stefan-Boltzmanni konstant.

Musta keha kiirgavus on võrdeline  $T^4$ , järelkult  $T = 1000 \text{ K}$  ja  $T = 2000 \text{ K}$  vastavate kõveratealused pindalad joonisel 1 erinevad  $2^4 = 16$  korda!

Valemist (2) saab leida ka spektraalse kiirgavuse maksimumile vastava lainepikkuse  $\lambda_{\text{max}}$ :

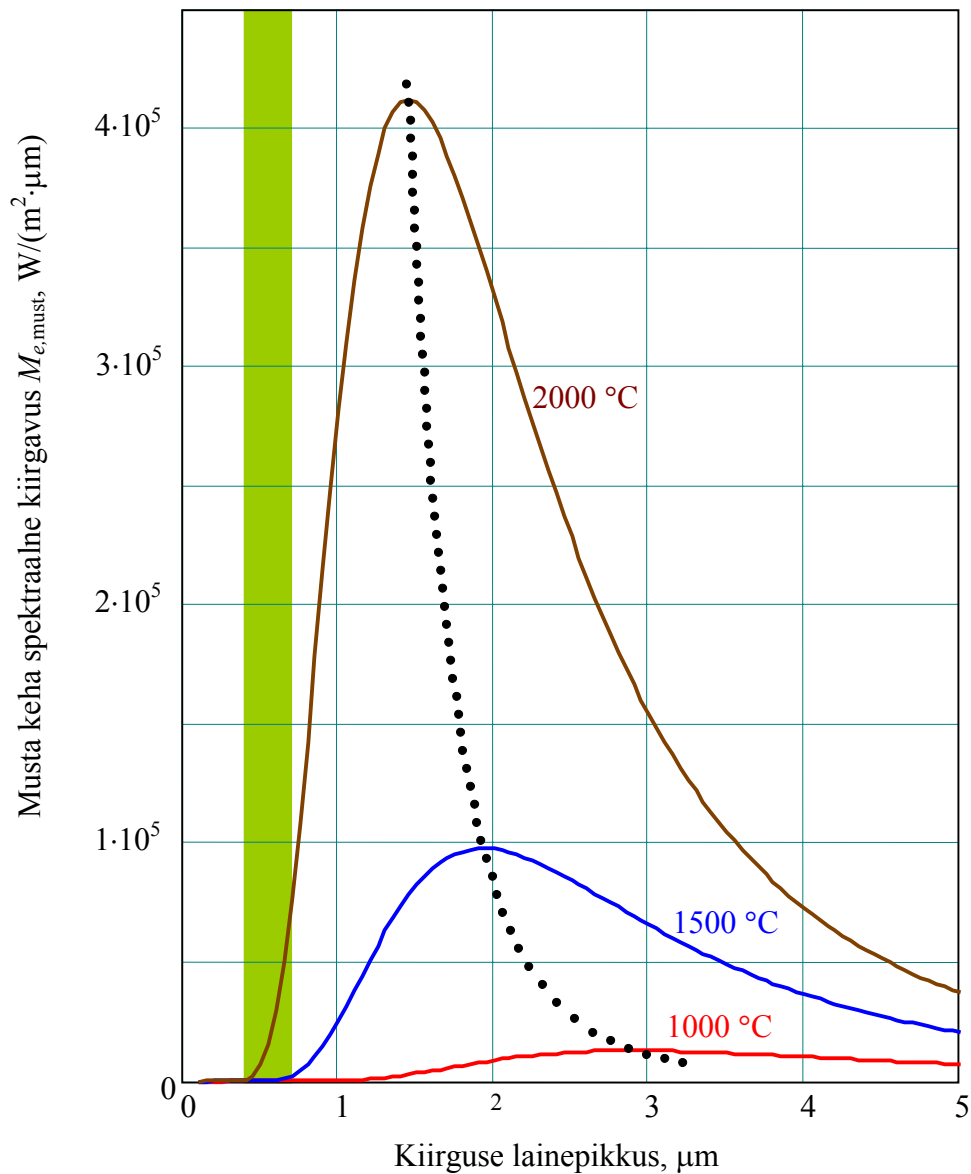
$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b, \quad (5)$$

kus konstant  $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . Valem (5) kannab **Wieni nihkeseaduse** nime.

Valemile (5) vastavad  $\lambda_{\text{max}}$  väärtused on näidatud joonisel 1 punktiirjoonega:

– temperatuuri  $T$  tõustes spektraalse kiirgavuse maksimum nihkub lühemate lainepikkuste poole;

– spektraalse kiirgavuse maksimum ise aga on võrdeline  $T^5$ , seega temperatuurile  $T = 2000 \text{ K}$  vastava kõvera tipp on 32 korda kõrgem, kui  $T = 1000 \text{ K}$  vastav tipp.



**Joonis 1.** Musta keha spektraalne kiirgavus Plancki valemi põhjal mõnedel temperatuuridel. Punktiirjoonega on näidatud maksimaalse spektraalse kiirgavuse nihkumine lühemate lainepikkuste poole temperatuuri tõustes, kuid see pole Wieneri nihkeseaduse graafik (vt küsimust 5.10 juhendi lõpus). Rohelise ribaga on näidatud nähtava kiirguse vahemik  $0,4 \mu m - 0,7 \mu m$ .

Kuna reaalsete (mittemustade) kehade neelavus  $a(\lambda, T) < 1$  ja sõltub antud lainepikkusel ka keha temperatuurist, siis nende jaoks nii spektraalse kiirgavuse kui ka kiirgavuse üldkehtivaid analüütilisi valemeid anda ei saa.

Kirchhoffi seaduse kohaselt spektraalsed kiirgavused mittemusta  $m_e(\lambda, T)$  ja musta keha  $m_{e, \text{must}}(\lambda, T)$  jaoks antud temperatuuril  $T$  on seotud mittemusta keha neelavusega  $\epsilon$  kiirgamisvõimete suhtega järgmiselt:

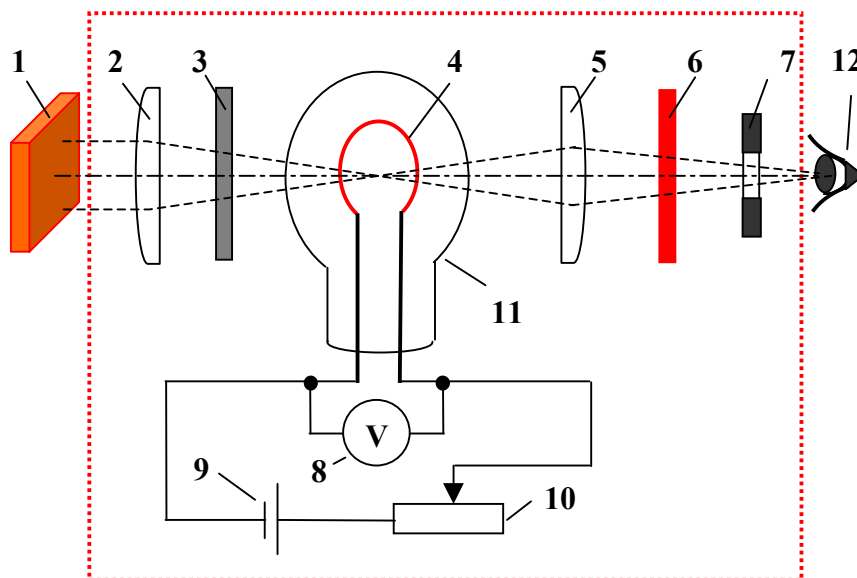
$$\frac{m_e(\lambda, T)}{m_{e, \text{must}}(\lambda, T)} = a(\lambda, T) < 1. \quad (6)$$

Seepärast reaalseste kehade temperatuuri on püromeetritega otstarbekas mõõta fikseeritud lainepikkusel  $\lambda = \text{const}$ , kuid selle lainepikkuse jaoks peab olema eelnevalt välja selgitatud keha aine neelavuse sõltuvus temperatuurist  $a_\lambda(T)$ .

## 4. Töö käik

### 4.1. Püromeeter. Püromeetria alused

Käesolevas töös kasutatakse hõõguva keha temperatuuri mõõtmiseks “kaduva niidiga” püromeetrit.



**Joonis 2.** Püromeetri optiline ja elektriline skeem: 2 – objektiiv, 3 – nõrgendav valgusfilter, 4 – püromeetrilise lambi hõõgniit, 5 – okulaar, 6 – monokromaatiline (punane 650 nm) valgusfilter, 7 – diafragma, 8 – voltmeeter, 9 – akumulaator, 10 – reostaat, 11 – püromeetriline lamp. 1 – uuritav objekt (kiirgav keha), 12 – silm.

Püromeetri ehitus on toodud joonisel 2. Püromeetri osaks on pikksilm (objektiiv 2 ja okulaar 5), mille okulaari fokaaltasandis asub püromeetrilise lambi 11 hõõgniit 4. Voltmeetriga 8 mõõdetakse hõõgniidile rakendatud pinget, reostaadiga 10 reguleeritakse lampi läbiva voolu tugevust. Lambi toiteallikaks on aku 9.

Püromeetrid kaliibritakse musta keha abil. Selleks vaadeldakse läbi püromeetri pikksilma kindla temperatuurini kuumutatud musta keha ja reguleeritakse pikksilma objektiivi, et keha pinna terav kujutis tekiks püromeetri lambi hõõgniidi tasandis. Seejärel reguleeritakse

hõõgniidi heledust reostaadi 10 abil seni, kuni see saab võrdseks musta keha heledusega<sup>2</sup>. Selle tunnuseks on hõõgniidi nähtamatuks muutumine musta keha kujutise taustal e “hõõgniidi kadumine”. On selge, et hõõgniidi ühtesulamine uuritava keha kujutisega toimub ainult ühel kindlal hõõglambile rakendatud pingel, mis sõltub otseselt uuritava keha heledusest ja seega ka temperatuurist. Järelikult võib voltmeetri skaalale kanda pinge asemel musta keha temperatuuri. Kaliibrimiseks korraldatakse kirjeldatud võtet musta keha erinevate temperatuuride korral.

Selliselt kaliibritud püromeetriga saab määrata mistahes teise musta keha temperatuuri.

Mõõtes mittemusta keha temperatuuri kaduva niidiga püromeetri abil, määrame me tegelikult sellise musta keha temperatuuri, mille heledus on sama suur kui antud kehal. Seda temperatuuri nimetatakse uuritava keha **heledustemperatuuriks**.

Et laias lainepikkuste vahemikus uuritava keha ja püromeetri hõõgniidi heleduste võrdsustamine võib raskusi valmistada, siis tehakse mõõtmisi fikseeritud lainepikkusel. Selleks kasutatakse püromeetris filtrit 6, mis laseb valgust läbi kitsas lainepikkuste vahemikus 650 nm ümbruses ja me võime lugeda, et  $\lambda = 650$  nm. Olles mõõtnud uuritava keha heledustemperatuuri  $T_\lambda$  antud lainepikkusel, saab leida keha tõelise temperatuuri, kui on teada uuritava keha neelavuse sõltuvus temperatuurist  $a_\lambda(T_\lambda)$  lainepikkusel 650 nm.

Lähtudes Plancki valemist (2) ja valemist (6), saab näidata, et keha tõeline temperatuur  $T$  on seotud mõõdetud heledustemperatuuriga  $T_\lambda$  fikseeritud lainepikkusel  $\lambda$  järgmiselt:

$$T = \frac{T_\lambda}{1 + \frac{k \lambda}{hc} T_\lambda \ln a_\lambda(T_\lambda)} \quad (7)$$

Kuna käesolevas töös mõõdetakse volframlindi temperatuuri, siis all olevas tabelis on antud volframi neelavuse  $a_\lambda(t_\lambda)$  väärtused püromeetri näitude  $t_\lambda$  jaoks lainepikkusel  $\lambda = 650$  nm.

**Tabel 1.**

$t_\lambda, ^\circ\text{C}$	800	900	1200	1500	1800	2000	2200	2500
$a_\lambda(t_\lambda)$	0,460	0,457	0,450	0,443	0,437	0,432	0,429	0,423

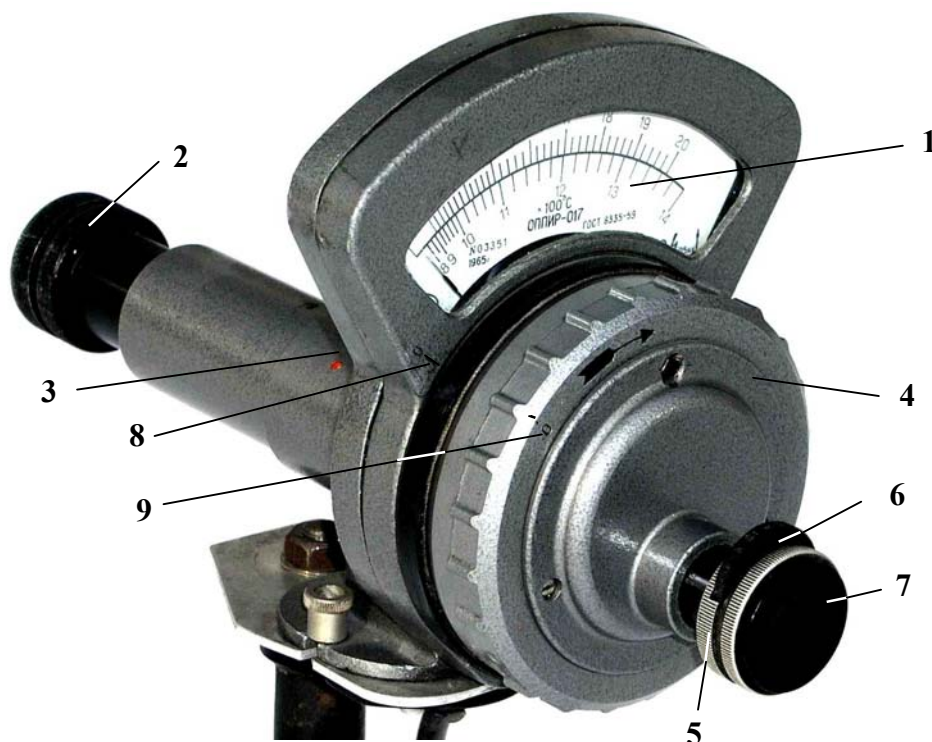
## 4.2. Eksperiment

Temperatuuri mõõtmiseks kasutame antud töös optilist püromeetrit ОППИР-017. Püromeetri foto on toodud joonisel 3, tema ehitus ja tööpõhimõte on selgitatud punktis 4.1.

### 4.2.1. Eksperimendi käik

1. Enne mõõtmiste juurde asumist kontrollime, **kas püromeetri pööratava rõnga nullmärk 9 ühtib aparaaadi korpusel oleva nullmärgiga 8**. Kui ei ühti, siis keerame rõngast 9 vastupäeva kuni märkide ühtimiseni. Seda teeme ka töö lõppedes. See asend lühistab mõõteriista ja toimib arretiirina.

<sup>2</sup> Heleduse ja kirkuse kohta vaata jällegi õppematerjali “Radiomeetria. Fotomeetria”.

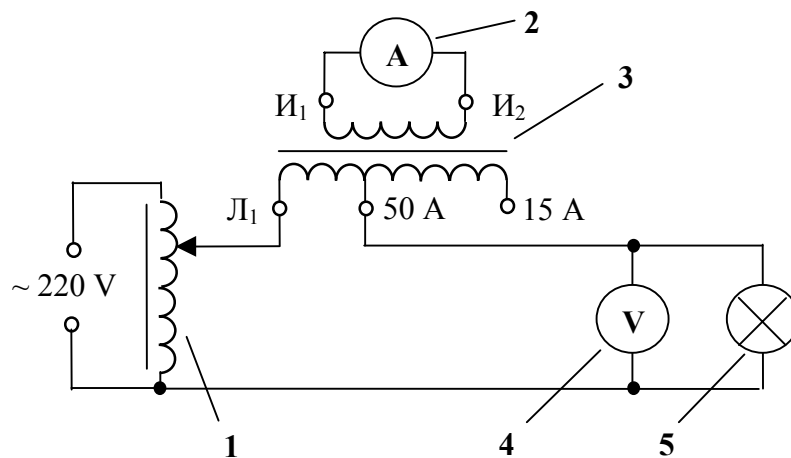


**Joonis 3.** Püromeeter OPIIP-017: 1 – skaala, 2 – objektiiv objekti teravustamiseks, 3 – nõrgendava filtri ettekeeramise (mõõtepiirkonna vahetuse) surunupp jääb skaala korpuse taha ja paistab ainult kõrgemat temperatuuripiirkonda märkiv punane täpp, 4 – püromeetrilise lambi hõõgniidi temperatuuri reguleeriva reostaadi pööramise rõngas, 5 – okulaar hõõgniidi teravustamiseks, 6 – punase filtri hoidja, 7 – diafragma, 8 – nullmärk korpusel, 9 – nullmärk pöörataval rõngal.

2. Kontrollime mõõteriista nullseisu. Kui osuti pole nullis, siis viime ta sinna korrektorkruvi pööramisega skaala 1 tagaküljel.
3. Ühendame püromeetri lambi juhtmed akumulaatoriga jälgides polaarsust. Püromeetri plussjuhe ühendatakse aku plussklemmiga ja miinusjuhe – miinusklemmiga. Pöörame rõngast 4 päripäeva ja jälgime läbi okulaari ka hõõgniiti<sup>3</sup>. Tumepunaselt hõõguva niidi korral peab näit olema  $\approx 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teravustame okulaari 5 abil lambi hõõgniidi ja keerame filtrihooldja seibi 6 abil ette punase filtri, mis laseb läbi valgust 650 nm juures.
4. Püromeetril on kaks skaalat: alumine – temperatuuride mõõtmiseks vahemikus  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ülemine – kõrgemate temperatuuride ( $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mõõtmiseks. Kõrgemate temperatuuride mõõtmiseks tuleb püromeetri objektiivi läbinud valguse teele asetada nõrgendav filter 3 (joonis 2). Selleks tuleb püromeetri skaala tagakülje juures korpusel asuv nupp 3 alla suruda ja tema valge täpp pöörata kohakuti punase täpiga korpusel. Madalamate temperatuuride mõõtmisel peab nupu 3 valge täpp olema kohakuti korpuse sinise täpiga.

<sup>3</sup> Mõnikord kaldub osuti algul vasakule kuni piirajani ja alles pärast niidi temperatuuri piisavat tõusu jõuab skaala töötava osa sisse.

5. Uuritavaks objektiks on volframлиндига 400 W hõõglamp (edaspidi lintlamp), mis on paigutatud metallkesta. Kestas on ava vaatluste teostamiseks. Lambi toitmiseks tuleb koostada skeem vastavalt joonisele 4.



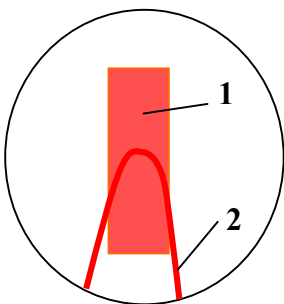
**Joonis 4.** Lintlambi toiteahela skeem: 1 – autotransformaator ЛАТФ-1М, 2 – ampermeeter, 3 – voolutrafo УТТ-5М, 4 – voltmeeter, 5 – uuritav lintlamp.

Pinge muutmine lintlambil toimub autotrafo ЛАТФ-1М abil (lambi maksimaalne lubatav pinge on 7,5 V!).

Et lintlampi läbiv vool on väga suur, kasutatakse voolu mõõtmiseks voolutrafo УТТ-5М koos ampermeetriga. Voolutrafo ülekandeteguri saab leida primaar- ja sekundaarvoolu suhtest (tegelik vool on ampermeetri näidust kas  $50 \text{ A} / 5 \text{ A} = 10$  või  $15 \text{ A} / 5 \text{ A} = 3$  korda suurem).

**Et uuritav lintlamp on võimas nähtava ja infrapunase kiirguse allikas, siis tuleb hoiduda täisvõimsusel töötava lambi hõõglindi otsesest vaatamisest!**

6. Kui lintlampi toiteskeem on juhendaja poolt kontrollitud, siis paneme lambi nõrgalt hõõguma ja suuname püromeetri tema lindile nii, et püromeetri hõõgniidi ülemine kaareosa satuks võimalikult lambi lindi keskele (joonis 5). Et meil püromeetri hõõgniit oli juba okulaariga 6 teravustatud, siis okulaari me ei puutu. Teravustamist aga vajab läbi püromeetri paistev uuritava lambi lint ja seda teeme püromeetri objektiiviga 2 nihutamisega.



**Joonis 5.** Püromeetri vaateväljas peavad teravalt paistma nii uuritav objekt 1 (lintlampi hõõguv lint) kui ka püromeetrilise lambi hõõgniit 2. Viimase tipp peab asuma võimalikult lindi 1 keskmel ja hõõgniidi heledus tuleb reguleerida samaks lindi heledusega nii, et niit “kaoks” lindi taustal ja alles siis võime kirja panna püromeetri näidu.

7. Kui ettevalmistused tehtud, asume mõõtmiste juurde. Volframlindi temperatuuri mõõdame vahemikus 900 °C – 2000 °C ligikaudse sammuga 100 °C koos lambi pingega ja vooluga ning paneme need andmed kirja vastavasse tabelisse. Mõõtmistemperatuuri valime esmalt püromeetrit, siis reguleerime autotrafoga lintlambi pinget selliseks, et lindi heledus oleks enam-vähem võrdne püromeetri hõõgniidi tipu heledusega ja ootame 1 – 2 minutit, et lintlambi soojusrežiim stabiliseeruks. Seejärel mõõdame püromeetriga lindi temperatuuri võimalikult täpselt. Lintlambi iga režiimi korral teeme seda kolm korda, keerates vahepeal püromeetri “paigast” ära. Arvutusteks kasutada keskmisi väärtusi.

#### 4.2.2. Mõõtmistulemuste töötlemine

Stefan-Boltzmanni seaduse (4) näol on meil teada musta keha kiirgavuse temperatuuriline sõltuvus. Reaalsete kehade kiirgavuse sõltuvust keha tõelisest temperatuurist võib kirjeldada valemiga

$$M_e = B \cdot T^n. \quad (8)$$

Käesoleva töö ülesandeks ongi hõõguva keha kiirgavuse temperatuurilise sõltuvuse määramine, s.t leida tehtud mõõtmiste alusel valemis (8) olevate suuruste  $B$  ja  $n$  keskmised väärtused ning võrrelda neid Stefan-Boltzmanni valemi analoogiliste suurustega.

Arvutused on soovitatav teha tarkvara paketiga MathCAD.

#### Arvutuste etapid:

1. Valemi (7) abil arvutame mõõdetud heledustemperatuuridest  $T_\lambda$  nõutavad tõelised temperatuurid  $T$ . Tõeliste temperatuuride leidmiseks vajalikud volframi neelavuste väärtused saab leida tabeli 1 alusel, kui kasutada lähendusvalemit. Lähendada võib lineaarse sirgema, kuid ruutpolünoom annab parema lähenduse (vaata “Volframi neelamisvõime” aineveebi FKEF.01.036 rubriigis “Abimaterjalid”: <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/fmalused36/>). Soovitatav on kohe algusest peale kõikjal üle minna Celsiuse kraadidelt absoluutsetele temperatuuridele. Õige arvutamise korral peavad tõelised temperatuurid tulema 50 K – 200 K võrra suuremad kui mõõdetud heledustemperatuurid.

2. Edasi eeldame, et kõrgel temperatuuril eraldub praktiliselt kogu lintlambi poolt tarbitav elektriline võimsus kiirgusena, s.t

$$P = U \cdot I = S \cdot M_e = S \cdot B \cdot T^n,$$

kus lambi lindi pindala  $S \approx 1 \text{ cm}^2$ ,  $U$  ja  $I$  – lintlambi pingega ja vool.

Logaritmides viimast valemist saame lineaarse seose tarbitava võimsuse  $P$  ja meid huvitavate suuruste  $B$  ja  $n$  vahel:

$$\ln P = \ln(S \cdot B) + n \ln T. \quad (9)$$

3. Valemist (9) saame sirge tõusu  $n$ , tõusu standardhälbe ja A-tüüpi määramatuse. Võrdleme valemit (8) jaoks saadud astmenäitajat Stefan-Boltzmanni valemi astmenäitajaga. Kas need suurused kattuvad määramatuse piires?
4. Valemi (9) vabaliikmest  $\ln(S \cdot B)$  arvutame suuruse  $B$ , nuputame välja **tema ühiku**. Võrdleme katsest leitud suurust  $B$  Stefan-Boltzmanni konstandiga  $\sigma$ . Suuruse  $B$  määramatust ei tarvitse hinnata, sest lindi pindala  $S$  on antud ligikaudu, ilma määramatusega.



5. Lõpuks esitame katsest saadud andmetega volframi kiirgavuse temperatuurilise sõltuvuse valemi (8).

## 5. Küsimused ja ülesanded

1. Kui suur on 1 nm, 1  $\mu\text{m}$ ? Mitu nanomeetrit on ühes mikromeetris ja vastupidi? Töös kasutatav punane filter laseb läbi valgust lainepikkusega 650 nm. Mitu mikromeetrit see on?
2. Millistes lainepikkuste vahemikus on nähtav elektromagnetlainetus? Kuidas muutub valguse värvus lainepikkuse muutudes?
3. Millist elektromagnetlainetust nimetatakse ultravioletseks ja millist infrapunaseks?
4. Milliseid kehi nimetatakse (absoluutselt) mustadeks?
5. Mida nimetatakse kiirgavuseks ja mida spektraalseks kiirgavuseks? Kuidas nad teineteisega seotud on? Millistes ühikutes neid mõõdetakse?
6. Mis on kiirgavuse ja spektraalse kiirgavuse vasteteks fotomeetrias? Millistes ühikutes neid suurusi mõõdetakse?
7. Millist suurust mõõdetakse steradianides? Kui suur on 1 sr?
8. Mida tähendavad kirkus ja heledus? Millised on nende mõõtühikud?
9. Päike on üsna hea musta keha näide pinnatemperatuuriga  $\approx 6000\text{ K}$ . Millisele lainepikkusele vastab tema spektraalse kiirgavuse maksimum? Kas see maksimum asub nähtava valguse piirkonnas?
10. Joonise 1 allkirjas on väidetud, et punktiirjoon pole Wieneri nihkeseaduse graafik, kuigi ta näitab spektraalse kiirgavuse maksimumi nihkumist lühemate lainete poole keha temperatuuri tõstmisel. Milline oleks Wieneri nihkeseaduse graafik ja mille poolest mainitud punktiirjoon erineb Wieneri nihkeseaduse graafikust? Eksiarvamuste vältimiseks olgu öeldud, et see joon pole kantud graafikule "umbropsu", vaid on täpselt välja arvutatud musta keha kiirguse valemite põhjal.
11. Selgitage püromeetri ehitust ja optilise püromeetria põhimõtet.
12. Milliseid raskusi võib mõõtmistel tekkida, kui mitte kasutada püromeetri punast filtrit?
13. Miks tuleb püromeetriga mõõtes keha heledustemperatuur väiksem keha tõelisest temperatuurist?
14. Kuidas on seotud elektromagnetlainetuse lainepikkus ja sagedus? Inimese silm on kõige tundlikum nähtava valguse rohelises spektriosas, lainepikkuse 550 nm ümbruses. Kui suur on selle valguse sagedus?