5.1.C. SKYSČIŲ KLAMPOS TYRIMAS KAPILIARINIU KLAMPOMAČIU

Darbo tikslas

Nustatyti skysčio klampą.

Darbo užduotys

- Nustatyti tiriamo skysčio kinematinės klampos priklausomybę nuo temperatūros.
- Apskaičiuoti tiriamo skysčio molekulių aktyvacijos energiją.

Teorinės temos

- Skysčiai, jų fizikinės savybės.
- Dinaminė ir kinematinė klampa.
- Skysčių tekėjimas siaurais vamzdeliais.
- Puazeilio ir Hageno dėsnis.
- Klampomačiai, jų veikimo principai.

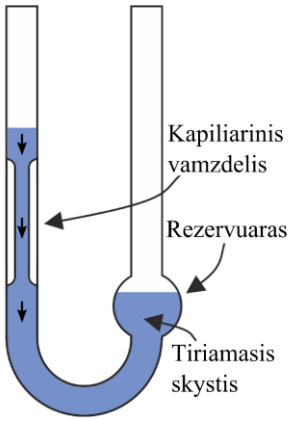
Darbo priemonės ir prietaisai

Kapiliarinis klampomatis su tiriamu skysčiu, sekundmatis, vandens rezervuaras, šildytuvas su termostatu, guminė pompa.

Darbo metodika

Šiame darbe kinematinė skysčio klampa nustatoma kapiliariniu klampomačiu (viskozimetru). Jis tinka tirti skysčiams ir dujoms, kurių klampa yra nuo 10^{-3} iki 10^{2} Pa·s.

Kapiliarinis klampomatis yra pagamintas iš U formos vamzdžio (5.1.C.1 pav.). Vienoje vamzdžio šakoje yra tiriamo skysčio rezervuaras, o kitoje šakoje, aukščiau rezervuaro lygio – kapiliarinis vamzdelis. Vienoje vamzdžio šakoje pakėlus skystį kapiliaru aukštyn, veikiamas sunkio jėgos jis pradės tekėti žemyn. Išmatavus laiką, per kurį skystis prateka kapiliaru, remiantis Puazeilio ir Hageno lygtimi, galima apskaičiuoti skysčio kinematinę klampą. Šią metodiką galima taikyti, kai tenkinamos dvi sąlygos: a) skysčio tankis klampomatyje pastovus, b) skysčio tekėjimas kapiliaru laminarusis, t. y. Reinoldso skaičius *Re* neturi viršyti 2 300.

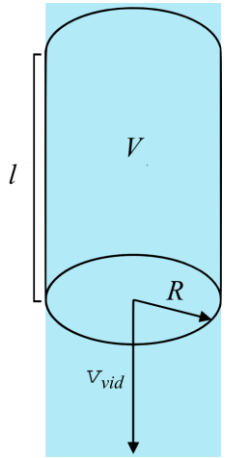


5.1.C.1 pav. Kapiliarinio klampomačio schema

Pagal Puazeilio ir Hageno dėsnį vidutinis laminariojo skysčio tekėjimo kapiliaru greitis v_{vid} yra

$$v_{\text{vid}} = \frac{\Delta p}{\Delta y} \cdot \frac{R^2}{8\eta}, \qquad (5.1.C.1)$$

čia $\Delta p/\Delta y$ – slėgio gradientas, parodantis slėgių skirtumą Δp dviejuose kapiliaro skerspjūviuose skirtinguose aukščiuose (aukščio skirtumas Δy), R – kapiliaro spindulys, η – dinaminė skysčio klampa. Žinant vidutinį skysčio tekėjimo greitį v_{vid}, galima apskaičiuoti per tam tikrą laiko tarpą t kapiliaru pratekėjusį skysčio tūrį V (5.1.C.2 pav.). Per šį laiką skystis kapiliaru nutekės atstumą $l = t \cdot v_{\text{vid}}$. Jei kapiliaro skerspjūvio plotas yra S, tai pratekėjusio skysčio tūris lygus $V = S \cdot l$. Apvalaus kapiliaro, kurio spindulys R, skerspjūvio plotas yra $S = \pi R^2$, todėl pratekėjęs skysčio tūris



5.1.C.2 pav. Pastoviu greičiu kapiliaru pratekančio skysčio tūris

$$V = S \cdot l = \pi R^2 t v_{\text{vid}} . \qquad (5.1.C.2)$$

Įstačius v_{vid} išraišką:

$$V = \frac{\pi R^4 t}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta y} . \qquad (5.1.C.3)$$

Iš šios formulės galima išsireikšti dinaminę klampą η:

$$\eta = \frac{\pi R^4 t}{8V} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta y} . \qquad (5.1.C.4)$$

Skystis kapiliaru teka veikiamas tik savo paties hidrostatinio slėgio, kurį sukelia h aukščio skysčio stulpas:

$$\Delta p = h\rho g . \qquad (5.1.C.5)$$

Įstačius šią išraišką į (5.1.C.4) formulę, *dinaminė klampa*:

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8V\Delta y} h\rho g t , \qquad (5.1.C.6)$$

o kinematinė klampa:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi R^4}{8V\Delta y} hgt . \qquad (5.1.C.7)$$

Visi į (5.1.C.6–7) formules įeinantys dydžiai, išskyrus g ir t, yra klampomačio (prietaiso) parametrai – tai jo spindulys R, rezervuaro tūris V, kapiliaro aukštis h. Laisvojo kritimo pagreitis g yra išorinis parametras, lygus 9,8 m/s^2. Šie dydžiai eksperimento metu yra pastovūs. Vienintelis kintamasis, matuojamas šiame eksperimente, yra skysčio pratekėjimo kapiliaru laikas t. Todėl visus pastoviuosius dydžius galima sujungti į vieną skaičių c, vadinamą *klampomačio kanstanta*:

$$\frac{\pi R^4}{8V\Delta y} hg = c , \qquad (5.1.C.8)$$

ir supaprastinti kinematinės klampos formulę:

$$\nu = ct\,. \qquad (5.1.C.9)$$

Konstanta c nurodoma klampomačio techniniame pase. Žinant šią konstantą ir išmatavus skysčio tekėjimo trukmę, galima labai paprastai apskaičiuoti skysčio kinematinę klampą.

Didėjant temperatūrai, dujų ir skysčių klampa mažėja. Šią priklausomybę aprašo Frenkelio klampos modelis, kuriame kinematinė klampa išreiškiama taip:

$$\nu = Ae^{\frac{\varepsilon}{kT}}\,, \qquad (5.1.C.10)$$

čia A – empirinė konstanta, ε – molekulės aktyvacijos energija (mažiausia energija, reikalinga cheminiams ryšiams nutraukti ir reakcijai įvykti), k - Bolcmano konstanta, T - absoliučioji skysčio temperatūra.

Nustatyti molekulės aktyvacijos energiją ε galima grafiniu būdu. Abi (5.1.C.10) lygties pusės logaritmuojamos:

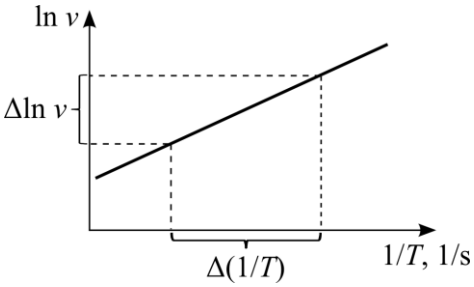
$$\ln\nu = \ln\left(Ae^{\frac{\varepsilon}{kT}}\right) \Rightarrow \ln\nu = \ln A + \ln e^{\frac{\varepsilon}{kT}} \Rightarrow \ln\nu = \ln A + \frac{\varepsilon}{kT}\,. \qquad (5.1.C.11)$$

Tiek kinematinė klampa ν, tiek konstanta A yra tam tikri skaičiai. Kiekvieno skaičiaus logaritmas taip pat yra skaičius. Vadinasi, ln A ir ln ν taip pat bus skaičiai. Galima juos trumpiau pažymėti šitaip: ln $\nu = y$, ln $A = B$. Paskutiniame (5.1.C.11) lygties naryje esantis santykis ε/k taip pat yra skaičius, kurį galima pažymėti D. Šioje lygtyje vienintelis kintamasis yra temperatūra $1/T$; ją galima pažymėti x. Įrašius sutrumpintus pažymėjimus, (5.1.C.11) lygtis atrodo taip:

$$\ln\nu = \ln A + \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{1}{T} \qquad (5.1.C.11)$$

$$\underbrace{\ln\nu}_{y} = \underbrace{\ln A}_{B} + \underbrace{\frac{\varepsilon}{k}}_{D} \cdot \underbrace{\frac{1}{T}}_{x} \qquad (5.1.C.12)$$

Įrašius naujus pažymėjimus, (5.1.C.11) lygtis tapo tiesės – paprasčiausios matematinės funkcijos – lygtimi. Vadinasi, (5.1.C.10) lygtimi aprašomą priklausomybę nubraižius x ašyje atidedant $1/T$, o y ašyje ln ν, ši priklausomybė turėtų būti tiesinė. Tikėtina, kad dėl paklaidų nubraižytas grafikas nebus ideali tiesė, tačiau bendra tendencija turėtų būti akivaizdi. Tokiu atveju šie ne visai tvarkingai išsidėstę taškai *aproksimuojami* tiese. Aktyvacijos energija susijusi su šios tiesės posvyrio koeficientu D.



5.1.C.3 pav. Tiesės posvyrio koeficiento apskaičiavimas

Apskaičiuojamas šios tiesės posvyrio koeficientas D: pasirenkama kokia nors tiesės atkarpa y ašyje ir ją atitinkanti atkarpa x ašyje (5.1.C.3 pav.). Apskaičiuojamas šių atkarpų santykis:

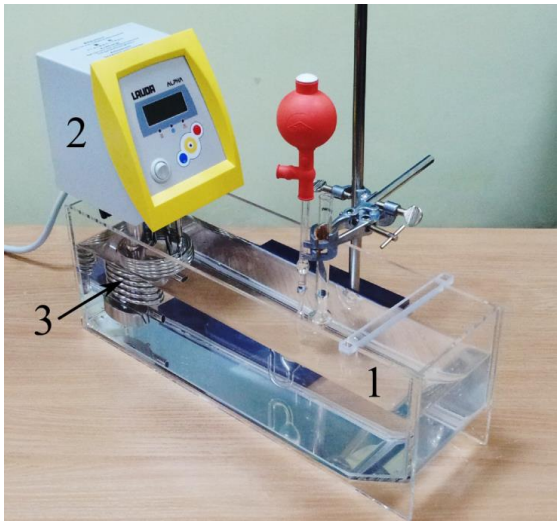
$$D = \frac{\Delta(\ln\nu)}{\Delta(1/T)}\,. \qquad (5.1.b.13)$$

Dydžiu D buvo pažymėtas aktyvacijos energijos ε santykis su Bolcmano konstanta k. Vadinasi:

$$\varepsilon = D \cdot k\,. \qquad (5.1.C.14)$$

Darbo eiga

1. Surenkamas eksperimento stendas (5.1.C.4 pav.).
2. Į indą 1 įpilama tiek distiliuoto vandens, kad jis apsemtų termostato 2 šildymo elementą 3 (5.1.C.4 pav.).
3. Termostato maitinimas įjungiamas nuspaudus mygtuką 1 (5.1.C.5 pav.). Temperatūros reguliavimo mygtukais 6 (5.1.C.5 pav.) nustatoma reikiama temperatūra (pvz., 20 ºC). Termostatui pasiekus nurodytą temperatūrą palaukiama 5 minutes, kad nusistovėtų ir skysčio klampomatyje temperatūra.
4. Nusistovėjus temperatūrai suspaudžiama ant klampomačio vamzdelio užmauta guminė pompa. Tada labai atsargiai spaudžiant ventilį, ant kurio nupiešta rodyklė „↑“, skystis kapiliaru pakeliamas aukštyn.



5.1.C.4 pav. Eksperimento stendas

5. Spaudžiant ventilį, ant kurio nupiešta rodyklė „↓“, sekundmačiu išmatuojama tiriamo skysčio tekėjimo tarp žymų trukmė. Leidžiant skystį žemyn ventilį būtina spausti vienodu stiprumu. Matavimas atliekamas bent tris kartus.
6. Apskaičiuojama vidutinė skysčio tekėjimo trukmė ir pagal (5.1.C.9) formulę – kinematinė skysčio klampa (klampomačio konstanta nurodyta ant prietaiso).
7. Termostato temperatūra didinama toliau (kas 10 ºC iki 80 ºC imtinai). Aukščiau temperatūros nekelti! Būkite atsargūs, nenusiplikykite įkaitusiu vandeniu! Kiekvieną kartą apskaičiuojama vidutinė skysčio tekėjimo trukmė ir kinematinė skysčio klampa.
8. Šildytuvas išjungiamas.
9. Duomenys surašomi į lentelę (1 lentelė):

1 lentelė

t (ºC)	T (K)	t (s)	t_{vid} (s)	ν (m²/s)	$1/T$ (1/K)	ln ν

10. Nubraižomas $\nu = \nu\,(T)$ priklausomybės grafikas.
11. Taip pat nubraižomas ln $\nu = \nu\,(1/T)$ grafikas, o jame esantys taškai aproksimuojami tiese (kaip nurodyta darbo metodikos apraše 3 p.) siekiant surasti skysčio molekulių aktyvacijos energiją.
12. Apskaičiuojamas šios tiesės polinkio koeficientas D.
13. Pagal (5.1.C.14) formulę apskaičiuojama tiriamo skysčio vienos molekulės aktyvacijos energija ε.
14. Palyginus eksperimentiškai apskaičiuotą tiriamo skysčio klampą su žinynuose pateikiamomis įvairių skysčių klampos vertėmis, nustatoma tirto skysčio rūšis.

Literatūra

1. J. Butrimaitė, A. Dementjev, G. Dikčius, R. Gadonas, J. Jasevičiūtė, V. Karenauskaitė, V. Sirutkaitis, V. Smilgevičius. Fizika biomedicinos ir fizinių mokslų studentams, 1 dalis, vadovėlis, Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2003, 212 p. ISBN 9986-19-595-9. El. vadovėlis: ISBN 978-9955-33-538-2.

1 priedas

„Lauda Alpha“ imersinio termostato priekinis skydelis

1 – įjungimo mygtukas.
2 – temperatūros valdymo keturių segmentų LED ekranas.
3 – šildytuvo indikacinis geltonos spalvos šviesos diodas.
4 – aušintuvo indikacinis mėlynos spalvos šviesos diodas.
5 – klaidos signalo indikacinis raudonos spalvos mirksintis šviesos diodas.
6 – meniu pasirinkimo ir įvesties mygtukai.
7 – šildytuvas.
8 – temperatūros matavimo zondas.
9 – siurblio sukuriamo vakuumo reduktorius.
10 – siurblio korpusas.

5.1.C.5 pav. Vandens šildytuvas ir termostatas

2 priedas

Klampos matavimas kapiliariniu klampomačiu

Ant vieno klampomačio vamzdelio užmauta guminė pompa, kurioje įmontuoti du ventiliai (5.1.C.6 pav.). Spaudžiant ventilį, ant kurio nupiešta rodyklė „↑“, skystis kyla vamzdeliu aukštyn. Spaudžiant ventilį su rodykle „↓“, skystis suteka atgal į pagrindinį rezervuarą.

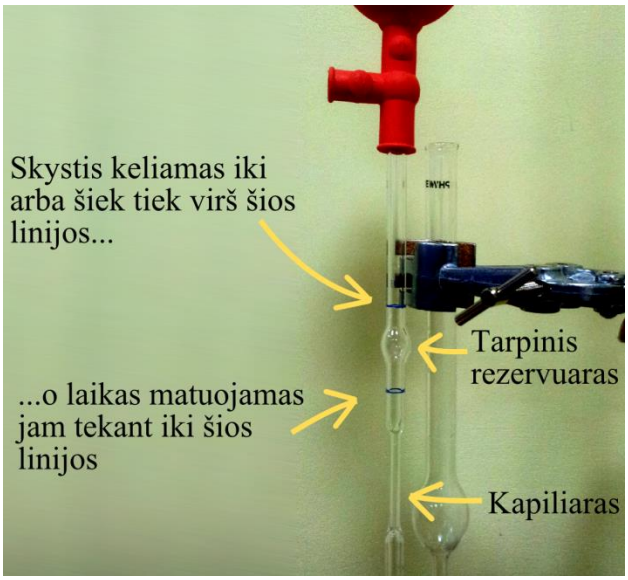
Keliant skystį aukštyn, ventilį spausti reikia labai atsargiai, kad nesusidarytų oro burbuliukų. Eksperimentas esant burbuliukams bus netikslus ir jį teks kartoti! Jei burbuliukų vis dėlto atsirado, jie susprogs ir išnyks nuleisti į tarpinį rezervuarą, esantį po pompa. Leidžiant skystį žemyn, atitinkamą ventilį visą laiką reikia spausti vienodu stiprumu, kad skysčio tekėjimas nė akimirkai nebūtų sutrikdytas.

Virš tarpinio rezervuaro ir po juo yra dvi mėlyna spalva pažymėtos linijos (5.1.C.7 pav.). Skystis keliamas iki arba šiek tiek virš viršutinės linijos, o laikas matuojamas skysčiui tekant tiksliai nuo viršutinės iki apatinės linijos.

Jei skystis nekyla aukštyn, vadinasi, vamzdelyje neužtenka oro slėgio. Ventilis atleidžiamas, spustelima pompa ir tuomet bandymas kartojamas.

Laboratorijoje naudojamo **klampomačio konstanta $c = 6{,}5\cdot10^{-8}$ m²/s²**.

5.1.C.6 pav. Klampomačio pompos ventiliai



5.1.C.7 pav. Skysčio tekėjimo matavimo ribiniai žymenys ant klampomačio