

22. Skysčio klamos koeficiento priklausomybės nuo temperatūros tyrimas krentančio rutuliuko viskozimetru

Užduotis

1. Sukalibruoti krentančio rutuliuko viskozimetra.
2. Viskozimetru ištirti skysčio klamos koeficiento priklausomybę nuo temperatūros ir rasti skysčio molekulių aktyvacijos energiją.

Pagrindiniai teoriniai klausimai

1. Skysčių klampa ir klamos jėga.
2. Skysčių klamos koeficiento priklausomybė nuo temperatūros.
3. Puazeilio formulė.

Tyrimo metodika

Skysčiams, kaip ir dujoms, būdinga klampa – savybė priešintis vienos skysčio dalies judėjimui kitos atžvilgiu arba kūno judėjimui skystyje. Dėl molekulių tarpusavio sąveikos greitesni skysčio sluoksniai spartina lėtesnius, o šie lėtina greitesnius. Kietajam kūnui judant skystyje, klampa pasireiškia kaip skysčio vidinė trintis, stabdanti kūno judėjimą. Niutonas nustatė, kad klamos jėga F tarp dviejų skysčio sluoksnių yra tiesiai proporcinga tų sluoksnių greičių skirtumo gradientui $\delta v / \delta x$, sluoksnių lietimosi plotui S ir priklauso nuo medžiagos savybių:

$$F = \eta \frac{\delta v}{\delta x} S. \quad (1)$$

Čia dydis η priklauso nuo skysčio prigimties ir vadinamas dinaminio klamos koeficientu, arba tiesiog dinamine klampa. Vadinasi, dinaminė klampa skaitine verte lygi vidinės trinties jėgai, kuri veikia skysčio sluoksnių lietimosi ploto vienetą, kai greičio gradientas tarp jų lygus vienetui.

Skysčių bei dujų klampą galima apibūdinti ir kinetine klampa ν , kuri lygi dinaminei klampai, padalytai iš skysčio tankio ρ , bei dinaminei klampai atvirkščiu dydžiu φ , vadinamu takumu:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{1}{\varphi \rho}. \quad (2)$$

Skysčio klampa yra matuojama viskozimetru. Jame yra sudarytos sąlygos tiriama skysčiu užpildytame vamzdyje tolygiai leistis žemyn kietakūniam rutuliukui. Tūrio V rutuliuką veikia sunkio jėga

$$F_s = \rho V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad (3)$$

kur r ir ρ yra rutuliuko spindulys ir medžiagos tankis, o g - laisvojo kritimo pagreitis.

Panardintą skystyje rutuliuką veikia ir keliančioji jėga, kuri pagal Archimedo dėsnį lygi rutuliuko išstumto skysčio, kurio tankis ρ_v , svoriui:

$$F_A = \rho_v V = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_v g. \quad (4)$$

Jei rutuliukas skystyje juda greičiu v , tai jį veikia pasipriešinimo jėga, kurios dydį nusako Stokso dėsnis:

$$F = 6\pi\eta r v. \quad (5)$$

Rutuliukui judant pastoviu greičiu jo sunkio jėgą kompensuoja Archimedo ir pasipriešinimo jėgos:

$$F + F_A = F_s. \quad (6)$$

Irašę (3), (4) ir (5) į (6) randame dinaminės klampos koeficientą:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \rho_v)g}{9v}. \quad (7)$$

Reikia atsižvelgti į tai, kad pasipriešinimo jėga priklauso ne tik nuo rutuliuko spindulio r , bet ir nuo vamzdelio, kuriame jis turi leistis, matmenų. Siauresniame vamzdyje skystis sunkiau apteka rutuliuką. Eksperimentiškai nustatyta, kad rutuliukui leidžiantis vamzdeliu, kurio spindulys R , klampos jėga bus $1 + 2,4r/R$ karto didesnė nei leidžiantis vamzdeliu neribojamame skystyje. Atsižvelgus į šį dėsnį,

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \rho_v)g}{9v(1 + 2,4r/R)}. \quad (8)$$

Čia greitis $v = s/t$, s – vamzdelio ilgis, o t – rutuliuko judėjimo jame laikas.

Komerciniai viskozimetrai, kaip ir šiam darbui atlikti skirtas prietaisas, turi standartizuotus rutuliukus ir vamzdelius, todėl visus (8) lygtyje esančius pastovius dydžius galima apjungti į vieną taip vadinamą aparatūrinę konstantą K . Tada klampos išraiška supaprastėja:

$$\eta = Kt(\rho_1 - \rho_2). \quad (9)$$

Laboratorijoje esančiam prietaisui t yra rutuliuko leidimosi trukmė, išmatuota $s=100$ mm ilgio vamzdelio atkarpoje.

Skysčių klampos koeficiento priklausomybė nuo temperatūros aprašoma eksponentine funkcija:

$$\eta = Ae^{\frac{E_A}{kT}}; \quad (10)$$

čia A – konstanta, k – Boltzmann'o konstanta, o E_A – energija, kurią reikia suteikti molekulei, kad ji peršoktų į kitą pusiausvyros padėtį, vadinama aktyvacijos energija. Ordinačių ašyje atidėję $\ln(\eta)$, o abscisių – $1/T$, gausime tiesę, kurios krypties koeficientas

$$\frac{\ln \eta_2 - \ln \eta_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{E_A}{k}; \quad (11)$$

čia η_1 ir η_2 – klamos koeficientų vertės atitinkamai T_1 ir T_2 temperatūrose. Taigi, aktyvacijos energija,

$$E_A = k \frac{\ln \eta_2 - \ln \eta_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (12)$$

Tyrimo eiga

Darbui atlikti reikalingos priemonės parodytos 1 paveiksle. Reguliuojamame termostate, vamzdeliais sujungtame su apverčiamu viskozimetru (klampomačiu), nuolatos cirkuliuoja vanduo. Jo temperatūra matuojama termometru. Vamzdelyje judantis rutuliukas yra pagamintas iš borosilikatinio stiklo, kurio tankis $\rho_1 = 2,221 \text{ g/cm}^3$, o jo skersmuo $2r = 15,815 \text{ mm}$ yra itin tiksliai parinktas kruopščiai šlifuojant. Apverčiant viskozimetrą galime pakartoti matavimus tame pačiame vamzdelyje neišimdami iš jo rutuliuko, taip išvengiant jo mechaninių pažeidimų.

Pradedant eksperimentą vandens lygis termostato vonelėje turi būti apie 2 cm virš kaitinimo spiralės, viskozimetro didysis cilindras turi būti pilnas vandens, o mažasis cilindras taip pat pilnas tiriamo skysčio ir jame neturi būti oro burbuliukų. Vandeni leidžiama papildyti tik dėstytojui padedant. Prieš tai reikia patikrinti, ar viskozimetras yra tinkamai pastatytas. Ant viskozimetro stovo yra gulsčiukas, o viskozimetro padėtį galima reguliuoti keičiant atraminių kojelių aukštį. Pakeitus viskozimetro vandens rezervuaro padėtį būtina jį užfiksuoti.



1 pav. Skysčio klamos matavimo laboratoriniai reikmenys.

Viskozimetro kalibravimą atlikite 20°C ar 25°C temperatūroje. Skysčio klamos koeficiento priklausomybės nuo temperatūros matavimus atlikite temperatūrą keisdami kas 5°C intervale nuo 20°C iki 50°C . Kiekviename temperatūroje rutuliuko kritimo trukmes laikmačiu išmatuokite ne mažiau 3 kartų. Nustatę vidutinę kritimo trukmę, pagal (12) formulę apskaičiuokite vandens klamos koeficientą, kad aparatūros vandens tankis $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$. Atlikę matavimus skirtingose temperatūrose nubrėžkite priklausomybę $\ln \eta = f(T^{-1})$, iš kurios pagal (12) formulę raskite molinę aktyvacijos energiją.

Darbo eiga:

Viskozimetro kalibravimas:

1. **Išitikinkite, kad vanduo kaitintuvo inde pilnai apsemia metalinę šildymo spirale.** Įjunkite vandens kaitintuvą ir nustatykite 20°C ar 25°C temperatūrą ir palaukite kol temperatūra nusistovės.
2. Apverskite viskozimetrą ir leiskite rutuliukui laisvai kristi tiriamame skystyje. Įsidėmėkite rutuliuko vieną tašką (pavyzdžiui, sutampantį su rutuliuko viršutiniu tašku) ir stebėkite kiek laiko šis taškas slinks tarp dviejų ant vamzdelio pažymėtų brūkšnelių ($l=10$ cm). Eksperimentą kartokite mažiausiai 3–5 kartus, kad kiek įmanoma tiksliau nustatytumėte rutuliuko leidimosi trukmę ir galėtumėte įvertinti matavimų paklaidas.
3. Naudodami išraišką (9) ir vandens klampos vertę 20°C ar 25°C temperatūroje (atitinkamai 1 mPa·s ar 0,89 mPa·s) nustatykite viskozimetro konstantos K vertę.

Skysčio klampos koeficiento priklausomybę nuo temperatūros tyrimas

4. Padidinkite vandens temperatūrą 5°C ir kartokite 2 punktą. Kiekvienai temperatūrai, pagal (9) išraišką, apskaičiuokite skysčio klampos koeficientą η . Eksperimento duomenis rašykite į lentelę:

<i>Temperatūra, T (°C)</i>	<i>Trukmė, t (s)</i>	<i>η (mPa·s)</i>
<i>Pradinė skysčio temperatūra</i>		
<i>Pradinė $T+n \times 5^\circ\text{C}$ (kur $n=1,2,3\dots$)</i>		
...	...	

5. Nubraižykite grafiką abscisių ašyje atidėdami temperatūrą T (°C), ordinačių – klampos koeficiento η vertes.
6. Raskite aktyvacijos energiją. Nubraižykite grafiką abscisių ašyje atidėdami temperatūrą $1/T$ (K^{-1}), ordinačių – klampos koeficiento natūrinio logaritmo $\ln \eta$ vertes. Pagal (12) išraišką apskaičiuokite aktyvacijos energijos vertę.
7. Suformuluokite darbo išvadas.

Literatūra:

1. A. Medešis „Mechanika, molekulinė fizika, elektra ir magnetizmas. Fizikos praktikumas.“, Vilnius, *Vilniaus universiteto leidykla*, 2000, 353 p.
2. J. Kaladė, V. Mickevičius, D. Grabauskas, „Termodinamika ir statistinė fizika“, Vilnius, *Mokslas*, 1982, 380 p.