

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM II.

(molekulová fyzika a termodynamika)

Seznam úloh:

Úlohy I. cyklus:

1. Měření teplotní roztažnosti.
2. Měření povrchového napětí kapalin a) kapkovou metodou, b) z výstupu v kapiláře (obě metody srovnávací).
3. Měření prostupu tepla – koeficient k .
4. Sluneční záření, solární technologie, skleníkový efekt, účinnost solárních článků. Využití soupravy ISES.
5. Zákony plynů.

Úlohy II. cyklus:

6. Kalorimetrická měření – měření měrné tepelné kapacity kapalin elektrickým kalorimetrem, měření měrného skupenského tepla tání ledu.
7. Měření viskozity kapalin a) kapilárním viskozimetrem b) měření teplotní závislosti viskozity kapalin pomocí Höpplerova viskozimetru popř. Englerova viskozimetru..
8. Vedení tepla – určení teplotního gradientu, určení λ .
9. Hagen-Poiseuilleův zákon, Reynoldsovo číslo.
10. Molární tepla plynů, určení C_p , C_v , R .

Náhradní a volitelné úlohy:

11. Nernstův teorém, určení difúzního potenciálu.
12. Anomálie vody, kontrola základních bodů teploměru.
13. Vlastnosti roztoků – určení Avogadrovy konstanty, změna objemu a teploty při míchání dvou kapalin.
14. Měření viskozity a vlhkosti vzduchu.
15. Úvod do rheologických měření.

LABORATORNÍ ŘÁD

Znalost laboratorního řádu a základních bezpečnostních zásad je nutnou podmínkou pro povolení vstupu do laboratoře. Se zásadami bezpečnosti práce a laboratorním řádem jsou posluchači seznámeni v rámci úvodu do fyzikálního praktika, všechny směrnice jsou trvale vyvěšeny v laboratoři.

Všeobecné zásady:

1. Studenti jsou povinni přicházet do praktika včas a setrvat v laboratoři po celou dobu určenou učebním plánem.

2. Na jednotlivé úlohy je student povinen se řádně připravit – v případě, že student nebude připraven, musí úlohu absolvovat v náhradním termínu.
3. Každý student je povinen absolvovat všechny předepsané úlohy .
4. Student je povinen řídit se pokyny vedoucího praktika, se svěřenými pomůckami a přístroji zacházet opatrně. Škody způsobené hrubou nedbalostí je povinen uhradit.
5. V laboratoři je třeba zachovávat klid a pořádek. Studenti jsou povinni setrvat na svém pracovním místě, je zakázáno svévolně přenášet přístroje a jiné pomůcky.
6. V laboratoři je zakázána konzumace potravin.
7. Studenti jsou povinni dbát předpisů pro bezpečnost a ochranu zdraví v laboratoři, se kterými se seznámí před vstupem do laboratoře. Jedná se především o používání ochranných pomůcek při zahřívání kapalin, dodržení bezpečnostních předpisů při práci se rtuť, opatrnost při manipulaci se skleněnými nádobami, s kyselinami a louhy.
8. Pro práci s elektrickým zařízením budou studenti proškoleni podle ustanovení ČSN 343100, 343080, 343500. Je třeba zvláště dbát těchto zásad: před zapojením elektrického obvodu je třeba si vyžádat souhlas vedoucího praktika, je zakázáno dotýkat se částí pod napětím, jakoukoli manipulaci s pomůckami provádět při vypnutém zdroji, je zakázáno manipulovat s přístroji a zařízením, všechny nepředvídané události hlásit vedoucímu praktika.

Další obecné pokyny:

Součástí praktických cvičení je pečlivá domácí příprava, kterou student provede do pracovního sešitu, který přinese do výuky. Při příchodu do laboratoře převezme pracoviště, podle návodů a přípravy provede praktické cvičení. Výsledky měření student zapisuje do pracovního sešitu, průběžně provádí mezivýpočty a kriticky posuzuje průběh měření. V případě hrubých chyb je třeba měření opakovat. Na základě záznamů v pracovním sešitě student vypracuje protokol o měření. Každý protokol musí obsahovat tyto základní údaje:

- Číslo a přesný název laboratorní práce
- Datum měření, jméno spolupracovníka
- Laboratorní podmínky měření (vlhkost, tlak, teplota v laboratoři)
- Přesné zadání úkolu měření
- Volba a princip měřících metod
- Seznam použitým přístrojů a pomůcek
- Naměřené a vyhodnocené výsledky měření v tabelární a grafické podobě
- Závěr měření – zhodnocení měření z hlediska přesnosti, vhodnosti použité metody, nepředvídané okolnosti, srovnání s tabulkovými hodnotami.

Protokol je třeba zpracovat do následujícího praktika.

Měření základních veličin

Měření objemu kapalin

Objem kapalin určujeme pomocí kalibrovaných válců se stupnicí dělenou obvykle po 1 cm^3 . K měření objemu dále slouží pyknometry – skleněné nádoby se zabroušeným hrdlem a zabroušenou zátkou, která je opatřena kapilárou. Přesný objem pyknometru a teplota, při níž

údaj platí, jsou vyznačeny na pyknometru. Při manipulaci držíme pyknometr za hrdlo, abychom omezili jeho zahřátí. Zátku do pyknometru zasouváme pomalu, abychom omezili možnost rozbití nádoby při prudké změně tlaku. Malá množství kapalin odměřujeme byretou a pipetou. Jejich objem je vyznačen, byreta je navíc opatřena stupnicí a uzavíracím kohoutem.

Měření tlaku

V laboratoři běžně užíváme kapalinové tlakoměry (manometry) ve tvaru U-trubice, které plníme kapalinou o známé hustotě ρ . Manometry jsou vybaveny měřítkem na odečítání poloh hladin v obou ramenech. Pro měření malých tlakových rozdílů se užívá otevřených manometrů, které plníme vodou, pro větší rozdíly tlaků je plníme rtutí, popř. použijeme uzavřených manometrů. Základní rovnici pro kapalinový tlakoměr lze zapsat ve tvaru $p_2 - p_1 = (h_1 - h_2) \rho g$, kde h_1, h_2 jsou výšky hladin kapaliny v jednotlivých ramenech, p_1 a p_2 jsou tlaky působící na hladiny kapaliny.

Pro měření barometrického tlaku slouží rtuťové barometry nebo barometry deformační tzv. aneroidy. Existují různé typy barometrů, všechny jsou založeny na Torricelliho pokuse. Nejčastěji používáme variační (staniční) barometr, který je konstruován tak, že stupnice je vypočtena pro původně společnou hladinu rtuti v trubici i v nádobce (při $b = 0$) a redukována tak, že na ní přímo můžeme odečítat tlak bez toho, aniž bychom odečítali polohu spodní hladiny rtuti v nádobce. Na barometrech odečítáme tlak v torrech s přesností 0,1 torr. Jeden torr je hydrostatický tlak rtuťového sloupce o výšce 1 mm při normálním tíhovém zrychlení a za teploty 0 °C. Za těchto podmínek je výška rtuťového sloupce v milimetrech rovna tlaku v torrech. Při měření za jiné teploty je třeba provést opravu údaje barometru – údaj b odečtený při teplotě t přepočteme na správný barometrický tlak podle vztahu $b_o = b/[1 - (\beta - \alpha)t]$, kde α je součinitel délkové roztažnosti měřítka, β je součinitel objemové roztažnosti rtuti. Platí 1 torr = 133,322 Pa.

Aneroidy jsou vzduchoprázdňné krabice z pružného materiálu, které se deformují vlivem vnějšího barometrického tlaku. Tato deformace je přenášena na pákovou soustavu s ručičkou. Stupnice bývá cejchována opět v torrech vzhledem k hladině moře. Údaj je třeba opravit pro danou nadmořskou výšku.

V současné době se používá barometrů digitálních, jejichž údaj je odečítán na displeji přímo v násobcích Pa popř. barometrů se sondou, které jsou cejchovány v barech.

Měření teploty

Měření teploty těles je založeno na změnách fyzikálních vlastností těles s měnící se teplotou. Podle druhu fyzikální veličiny, která registruje změnu teploty dělíme teploměry na:

- dilatační – teplota se měří na základě délkové nebo objemové roztažnosti látek (kapalinové, kovové teploměry tyčové a bimetalické)
- tlakové – teplota je měřena na základě tlakových změn látky uzavřené v prostoru o konstantním objemu (plynové, párové, kapalinové). Plynové teploměry se nejčastěji plní vodíkem, heliem ap.
- odporové – teplota je určována ze změny elektrického odporu kovů nebo polovodičů; platinový teploměr (-30 °C - + 1000 °C) – závislost R na T je přibližně kvadratická $R = R_o(1 + At + Bt^2)$, kde R, A, B jsou konstanty nezávislé na teplotě. V omezeném oboru teplota je možná lineární aproximace. Pro odpor polovodičů platí $R = A T^\beta e^{-BT}$, kde A, B, β jsou konstanty, T je absolutní teplota. Odporové teploměry s polovodičovým čidlem jsou tzv. termistory – jsou velmi citlivé, měří teplotu s přesností 10^{-3} K, mají malou tepelnou kapacitu (tzn. malou setrvačnost).

- d) termočlánky – základem je termoelektrický jev. Zahříváme-li spoj dvou různých kovů, vzniká mezi nimi potenciálový rozdíl – termoelektrické napětí – jehož velikost závisí na rozdílu teploty spoje a teploty volných konců drátu.
- e) optické pyrometry – měření vysokých teplot, jsou založeny na zákonech záření absolutně černého tělesa. Porovnává se záření vysílané tělesem se zářením svítícího vlákna elektrické žárovky, jehož teplotu známe.
- f) Segerovy jehlance – měření teploty pecí. Je to sada jehlanců ze slitin o různém bodu tání, které vložíme do pece.
- g) digitální teploměry – buď samostatné nebo součástí multimetrů (teplotní sonda).

Digitální teploměr vpichovací měří v rozsahu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 5\%$ odečítané hodnoty. Automaticky je registrována nejnižší a nejvyšší teplota, kterou lze zobrazit pomocí tlačítka MIN/MAX. Hloubka vpichu by měla být volena tak, aby mezi měřenou látkou a hlavou teploměru s citlivou elektronikou zůstal odstup asi 2,5 cm. Kontaktní čidlo je chráněno plastickým obalem, který je třeba před měřením sejmut. Neměřte teplotu těles a zařízení pod napětím. Tlačítko CLEAR slouží k vynulování uložené maximální a minimální hodnoty. Zmáčkne-li MIN/MAX tlačítko jednou, objeví se nejvyšší uložená teplota, zmáčkne-li je podruhé, objeví se nejnižší uložená teplota. Při třetím stisknutí tlačítka ukáže displej aktuální teplotu. Uloženou maximální (minimální) teplotu vymažeme tak, že nejprve zmáčkne tlačítko MIN/MAX a potom tlačítko CLEAR. Použití tlačítka CLEAR během měření nemá žádný vliv na obsah paměti.

V praxi budeme dále používat dvoukanálový digitální teploměr se senzorem osazeným termočlánkem K(NiCr-NiAl). Lze měřit v rozmezí teplot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $0,1^{\circ}/1^{\circ}$, měření je zatíženo chybou 0,3 %. S citlivostí $0,1^{\circ}$ lze měřit jen do teploty $199,9^{\circ}$.

Postup měření:

Nastavíme citlivost, měření ve $^{\circ}\text{C}$, přepínač na ON. Při měření pomocí jedné sondy ji zasuneme do výstupu T1, přepínač dáme do polohy T1. Na displeji je ukázána teplota měřeného vzorku. Současné měření dvou teplot – jednu sondu umístíme do výstupu T1, druhou do výstupu T2. Je-li přepínač v poloze T1, ukazuje teplotu registrovanou první sondou, je-li v poloze T2 teplotu druhé sondy. Rozdíl teplot ukáže displej v případě, že přepínač je v poloze T1-T2. Při zapojení sondy je třeba dbát na správnou polaritu patice.

Široké použití však mají v praxi i nadále klasické kapalinové dilatační teploměry se silnostěnnou kapilárou (stupnice je vyryta přímo na ní) nebo s kapilárou tenkostěnnou (stupnice je vyryta na destičce, která je ke kapiláře připojena, vše je uzavřeno ve skleněném obalu). Tyto teploměry jsou méně přesné. Teploměry plněné rtutí se používají pro měření teplot v intervalu $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ (teplota tuhnutí rtuti) až $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro měření nižších teplot se teploměry plní alkoholem, toluenem, pentanem, pro teploty vyšší je nad rtutí dusík pod tlakem 15 až 20krát větším než atmosférický tlak. Pak lze pomocí rtuti měřit teploty až do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Další typy teploměrů

Kontaktní teploměr – používá se k automatické regulaci teploty např. v termostatech. Do kapiláry teploměru zasahuje posuvný drátek, jehož polohu nastavujeme podle požadované teploty. Tento drátek je vyveden z kapiláry teploměru a druhý drátek je zaveden průtvem do baňky teploměru. Stoupne-li teplota tak, že se rtuťový sloupec dotkne posuvného drátku,

uzavře se elektrický obvod a sepne se relé, které vypne topení termostatu. Po snížení teploty se elektrický obvod rozpojí a relé zapojí opět topení.

Beckmannův teploměr – slouží pro citlivé měření malých teplotních rozdílů. Teplotní rozsah je asi $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, délka příslušné kapiláry je 40 mm, přesnost měření jsou setiny až tisíciný stupně. Lze jím však měřit jen teplotní rozdíly, teplota měřeného předmětu musí být určena jím teploměrem. Teplotní rozsah je nastavitelný v oboru od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Extrémní Sixtův teploměr – slouží pro stanovení minimální a maximální teploty (tzv. maximo-minimální teploměr). Kapilára tvaru U je na obou koncích rozšířena do teploměrných nádobek. Jedna z nádobek je zcela vyplněna teploměrnou kapalinou, která sahá dolů až ke rtuťovému sloupci. Ve druhém rameni je nad rtutí tatáž teploměrná kapalina, ale nevyplňuje celý prostor nádobky. V obou ramenech jsou umístěny posuvné indexy, které jsou posouvány rtutí. Při růstu teploty se posouvá spolu se rtutí také index, když teplota klesne, rtuť klesá, ale index zůstane na místě a zaznamenává tak maximální teplotu. Při snižování teploty se posouvá opět index ve druhém rameni a podobným způsobem zaznamená minimální teplotu. Pro další měření se oba indexy stáhnou magnetem opět k povrchu rtuti.

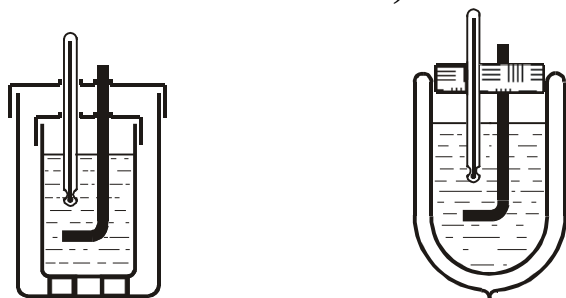
Měření tepla

Teprve v roce 1762 zásluhou fyzika Blacka došlo k rozlišování teploty a tepla. Teplo je považováno za jednu z forem energie a je uváděno v jednotkách joule (starší jednotka kalorie, převodní vztah $1\text{ kcal} = 4186,8\text{ J}$). Pro měření tepla se používají přístroje zvané kalorimetry.

Druhy kalorimetrů:

- směšovací* – je tvořen dvěma plechovými válci, vnitřní je umístěn na korkových podstavcích. Tím je dáno, že vnitřní nádoba je od okolí izolována vrstvou vzduchu.
- Dewarova nádoba* – tepelná izolace je realizována vzduchoprázdnou mezerou mezi skleněnými stěnami. Stěny jsou opatřeny lesklým kovovým nátěrem, aby se minimalizovalo vyzařování tepla.
- elektrický kalorimetr – je opatřen topnou cívkou, která se ponořuje do měřené kapaliny. Každý z kalorimetrů je opatřen víkem, které má otvory pro zasunutí míchačky a teploměru. Vložíme-li do kalorimetru naplněného vodou těleso o vyšší teplotě, ohřeje se nejen voda, ale také vnitřní nádoba kalorimetru, míchačka a teploměr. Toto teplo nelze zanedbat a proto je třeba při všech měřeních stanovit tepelnou kapacitu kalorimetru.

Obr. 1: Průřez kalorimetrem a) směšovacím, b) Dewarovou nádobou



1. Stanovení tepelné kapacity kalorimetru

Pomůcky: kalorimetry, technické váhy, závaží, teploměry, elektrický plotýnkový vaříč, voda

Tepelná kapacita kalorimetru je číselně rovna teplu, kterým se kalorimetr s příslušenstvím ohřeje o 1°C . Tepelnou kapacitu plechového kalorimetru můžeme stanovit výpočtem tak, že hmotnost vnitřní nádoby kalorimetru vynásobíme měrným teplem látky, z níž je kalorimetr zhotoven; podobně určíme tepelnou kapacitu míchačky. Tepelnou kapacitu tlustostěnného rtuťového teploměru můžeme určit na základě skutečnosti, že objemové teplo, tj. teplo potřebné k tomu, aby se 1 m^3 látky ohřál o 1°C , je pro sklo i pro rtuť prakticky stejné a rovné $1,9 \cdot 10^6\text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Tepelná kapacita teploměru je pak rovna součinu objemového tepla a objemu ponořené části teploměru. Označíme-li c_k měrné teplo látky kalorimetru, m_k hmotnost nádoby, c_m měrné teplo míchačky, m_m její hmotnost, c_o objemové teplo teploměru a V objem ponořené části teploměru, je tepelná kapacita kalorimetru

$$K = c_k m_k + c_m m_m + c_o V.$$

U Dewarovy nádoby, elektrického kalorimetru nebo i plechového kalorimetru při použití teploměru s ochrannou trubicí nelze určit tepelnou kapacitu výpočtem, proto určujeme tepelnou kapacitu **experimentálně**.

Do kalorimetru dáme vodu o známé hmotnosti m_1 a teplotě t_1 a přilijeme vodu hmotnosti m_2 a teploty t_2 . Promícháme obsah kalorimetru, počkáme, až se teplota ustálí a odečteme výslednou teplotu t . Z kalorimetrické rovnice

$$(m_1 c + K)(t - t_1) = m_2 c (t_2 - t),$$

v níž $c = 4186,8\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ je měrné teplo vody, vypočítáme tepelnou kapacitu kalorimetru

$$K = \frac{m_2 c (t_2 - t)}{t - t_1} - m_1 c.$$

Jednotkou tepelné kapacity je $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že ve výrazu pro tepelnou kapacitu jsou odečítány dva členy, které se od sebe jen málo liší, je třeba všechna měření provádět velmi pečlivě a přesně, jinak je výsledek zatížen velkou relativní nejistotou.

Při měření postupujeme tak, že nejprve zvážíme prázdný kalorimetr, jeho hmotnost označíme m_k . Pak naplníme kalorimetr asi do jedné třetiny studenou vodou a zvážíme. Získáme hmotnost m_1' . Určíme teplotu t_1 kalorimetru s vodou a přilijeme přibližně stejné množství vody teploty t_2 . Teplotu t_2 volíme alespoň 60°C a změříme ji těsně před nalitím do kalorimetru. Promícháme a změříme výslednou teplotu t v kalorimetru. Kalorimetr nyní opět zvážíme, jeho hmotnost je m_2' . Hmotnost chladnější vody v kalorimetru je $m_1 = m_1' - m_k$, hmotnost teplejší vody $m_2 = m_2' - m_1'$. Takto určené hodnoty dosadíme do vztahu pro výpočet tepelné kapacity. Měření opakujeme dvakrát a jako tepelnou kapacitu bereme průměr obou měření. Výsledky obou měření se nesmí lišit více než o 20%, jinak je měření třeba opakovat znovu.

Oprava kalorimetrických měření.

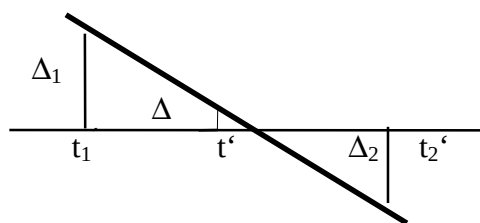
Přesto, že je kalorimetr tepelně izolován od okolí, nastává při měřeních, která trvají delší dobu, výměna tepla s okolím. Chyba, která tím vzniká, je zanedbatelně malá jen tehdy, je-li teplota okolí přibližně uprostřed mezi počáteční a konečnou teplotou kalorimetru. Není-li tomu tak, je třeba změnu výsledné teploty, způsobenou výměnou tepla s okolím, vyloučit početně.

Tepelné ztráty vyloučíme tak, že měření přivádíme ve třech etapách. První etapa probíhá ještě před začátkem vlastního měření. Odečítáme teplotu vody v kalorimetru, a to za stálého

míchání, a zapisujeme do předem připravené tabulky. Provedeme celkem 10 odečtení. Při posledním odečtení v I. etapě vložíme do kalorimetru těleso ze zkoumané látky (u elektrického kalorimetru zapneme proud) a poslední teplotu I etapy zapíšeme současně jako první teplotu ve II. etapě. Ve druhé etapě odečítáme teploty opět po půl minutě tak dlouho, dokud se teplota v kalorimetru zvyšuje (po případě snižuje). Poslední hodnotou v této etapě je nejvyšší (popř. nejnižší) dosažená teplota; tuto hodnotu zapíšeme současně jako první hodnotu ve III. etapě, ve které odečteme opět deset hodnot po půl minutě.

V každé etapě vypočteme střední teplotu. Pro I. a III. etapu vypočteme střední změnu teploty, která nastala za půl minuty, a to postupnou metodou. Protože tepelné ztráty jsou přibližně úměrné rozdílu teploty v kalorimetru a teploty okolí, můžeme pro střední teplotu kalorimetru ve II. etapě vypočítat průměrnou změnu lineární interpolací. Označíme-li střední teplotu v I. etapě t_1' a ve třetí t_2' , průměrné změny teploty způsobené výměnou tepla s okolím analogicky Δ_1 , Δ , Δ_2 , pak podle obr. je průměrná změna teploty ve II. etapě

$$\Delta = \Delta_1 + \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{t_2' - t_1'}(t' - t_1')$$



To je změna teploty za půl minuty. Tuto hodnotu násobíme počtem půlminut, po které trvala II. etapa, a výsledek odečteme od poslední hodnoty ve druhé etapě. Tak dostaneme správnou hodnotu výsledné teploty v kalorimetru.

Příklad měření s plechovým kalorimetrem:

Byl použit teploměr dělený po 0,5 °C. Byly odhadovány desetiny posledního dělení, teplota je zapsána s přesností 0,05 °C. Hodnoty označené v I. a III. etapě jako rozdíl, znamenají vždy rozdíl 6. a 1. hodnoty, 7. a 2. hodnoty atd., každá z hodnot rozdílu tedy znamená změnu za 5.půl minuty (postupná metoda).

I. etapa		II. etapa		III. etapa	
Teplota °C	Rozdíl °C	Teplota °C		Teplota °C	Rozdíl °C
13,30		13,70		19,35	
13,35		14,95		19,30	
13,35		16,05		19,30	
13,40		17,10		19,30	
13,50		18,00		19,30	
13,55	0,25	18,90		19,25	-0,10
13,60	0,25	19,25		19,25	-0,05
13,65	0,30	19,35		19,25	-0,05
13,65	0,25			19,20	-0,10
13,70	0,20			19,20	-0,10

$t_1' = 13,50$	$5\Delta_1 = 0,25$ $\Delta_1 = 0,050$	$t' = 17,16$	$t_2' = 19,27$	$5\Delta_2 = -0,08$ $\Delta_2 = -0,016$
----------------	--	--------------	----------------	--

Změna teploty odpovídající průměrné teplotě ve druhé etapě (za půl minuty) je

$$\Delta = 0,050 + \frac{-0,016 - 0,050}{19,27 - 13,50}(17,16 - 13,50) = 0,008. \text{ Průměrná změna, způsobená výměnou tepla s okolím za půl minuty je tedy } \Delta = 0,008 \text{ °C.}$$

Protože druhá etapa trvala celkem 7 půlminut (první hodnota ve druhé etapě byla

odečtena právě na jejím začátku), je celková oprava $7.0,008\text{ }^{\circ}\text{C} = 0,056\text{ }^{\circ}\text{C} \equiv 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuto hodnotu odečteme od poslední hodnoty ve druhé etapě. Opravená výsledná teplota v kalorimetru je $t = 10,35\text{ }^{\circ}\text{C} - 0,06\text{ }^{\circ}\text{C} = 10,29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zde připomínáme, že jako počáteční teplotu kalorimetru při kalorimetrickém měření bereme poslední hodnotu v první etapě neboli první hodnotu ve druhé etapě. Všechna kalorimetrické měření, kromě měření tepelné kapacity kalorimetru (zde proběhne výměna tepla velmi rychle), budeme provádět ve třech etapách. Opravu stanovíme výpočtem i graficky.

Úlohy I. cyklus

1. Měření teplotní roztažnosti

Rostoucí teplota má za následek zvětšení objemu tělesa. Tato teplotní roztažnost je charakterizována součinitelem objemové roztažnosti $\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}$, kde V_0 je objem měřený při

teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dV je změna objemu v teplotním intervalu dt . Pro tělesa, u kterých převládá jeden rozměr (např. tyč), zavádíme délkovou roztažnost, která je analogicky charakterizována součinitelem délkové roztažnosti $\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt}$, kde l_0 je délka tělesa při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dl značí změnu

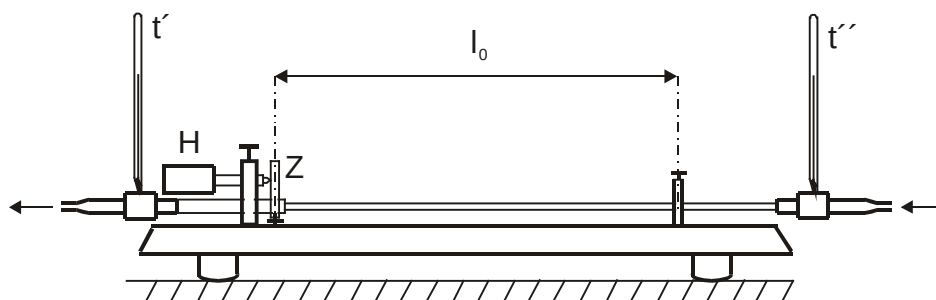
délky tělesa v teplotním intervalu dt . Délku tyče l při teplotě t lze tedy vyjádřit vztahem $l = l_0(1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \dots)$, kde součinitelé $\alpha_2, \alpha_3 \dots$ jsou mnohem menší než α_1 a uplatní se až při vyšších teplotách. Pro menší teplotní rozdíly lze závislost délky tyče na teplotě považovat za lineární $l = l_0(1 + \alpha t)$, kde α je průměrný součinitel délkové roztažnosti v daném teplotním intervalu. Analogicky lze objem v závislosti na teplotě vyjádřit vztahem $V = V_0(1 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \dots)$, pro mnohé kapaliny je v malém teplotním intervalu vliv součinitelů vyšších řádů zanedbat a závislost objemu a teplotě vyjádřit lineárním vztahem $V = V_0(1 + \beta t)$, kde β průměrný součinitel objemové roztažnosti v daném teplotním intervalu. Jednotkou součinitele délkové i objemové roztažnosti je K^{-1} . (Pozor na anomálii vody!) Součinitelé délkové roztažnosti pevných látek a objemové roztažnosti kapalin závisí na druhu dané látky. Roztažnost ideálního plynu je přesně lineární, přičemž součinitel objemové roztažnosti je pro všechny plyny (pokud je lze považovat za ideální) stejný a je roven $\gamma = 0,003661\text{ K}^{-1}$.

1.a Měření součinitele délkové roztažnosti pevných látek

Pomůcky: zařízení pro měření délkové roztažnosti, délkové měřítko, průtokový ohříváč, tyče z různého materiálu

Zařízení pro měření je na obr. 2.

Obr. 2 : Zařízení pro měření délkové roztažnosti látek



Délkovou roztažnost pevných látek měříme pomocí dilatometru, který je sestaven z trubky ze zkoumaného materiálu, kterou proudí voda a číselníkového úchylkoměru, kterým měříme prodloužení. Teplotu proudící vody měříme pomocí teploměrů na začátku a na konci trubky.

Postup měření:

1. Změříme délku trubky mezi oběma ryskami, měření opakujeme desetkrát, vypočteme aritmetický průměr z naměřených hodnot l_0
2. Trubku uchytneme do stojánku, kde na jednom konci ustavíme číselníkový úchylkoměr. Do nástavců trubky dáme teploměry. Trubkou necháme protékat studenou vodou (z vodovodního potrubí), počkáme až se teplota ustálí na nejnižší hodnotě (asi 15 °C) a změříme teplotu t_0 . Používáme-li teploměry dva, je teplota t_0 rovna aritmetickému průměru hodnot obou teploměrů.
3. Odečteme údaj na úchylkoměru – výchylka y_0 , popř. nastavíme při teplotě t_0 výchylku úchylkoměru na nulu ($y_0 = 0$).
4. Pomocí průtokového ohřívače (popř. termostatu) ohříváme vodu proudící trubkou. Pro každou teplotu odečítáme výchylku na úchylkoměru. Výsledky měření zapisujeme do tabulky. Teplotu měníme v rozmezí 15 °C až 60 °C přibližně po 5 °C. Při každém zvýšení hodnoty se musí teplota určitou dobu ustálit.
5. Vypočteme prodloužení pro každou teplotu $\Delta l = y - y_0$ příslušející zvýšení teploty o $t - t_0$.
6. Vypočteme součinitel délkové roztažnosti $\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{t - t_0}$.
7. Vypočteme střední hodnotu $\bar{\alpha}$ a střední chybu měření.
8. Sestrojíme graf závislosti prodloužení Δl na teplotním rozdílu $t - t_0$. Součinitel délkové roztažnosti lze vypočítat pomocí směrnice přímky této závislosti. $k = \frac{\Delta l}{\Delta t}$, součinitel

$\alpha = \frac{k}{l_0}$. Výpočet pomocí naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulce měření,

provedeme pomocí vztahu $\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Sigma \Delta l}{\Sigma (t - t_0)}$. Oba získané výsledky porovnáme.

1.b Měření součinitele roztažnosti kapalin pyknometrem

Pomůcky: pyknometr, destilovaná voda, zkoumaná kapalina (ethanol), laboratorní váhy, popř. digitální váhy, teploměr, filtrační papír

Pomocí této metody určíme relativní součinitel objemové roztažnosti β' , který je dán jako rozdíl mezi objemovou roztažností zkoumané kapaliny a objemovou roztažností skla.

Pyknometr o objemu V (předp., že se s teplotou nemění) naplníme zkoumanou kapalinou o teplotě t_0 a hustotě ρ_0 . Hmotnost kapaliny v pyknometru je $m_0 = V \rho_0$. Při zahřátí pyknometru zvětší kapalina svůj objem a hustota kapaliny se zmenší. Platí $\rho = \rho_0 [1 - \beta'(t - t_0)]$, $m = V \cdot \rho = V \rho_0 [1 - \beta'(t - t_0)] = m_0 [1 - \beta'(t - t_0)]$. Rozdíl hmotností kapaliny v pyknometru $m_0 - m = m_0 \beta' (t - t_0)$. Odtud vyjádříme součinitel objemové roztažnosti kapaliny jako $\beta' = \frac{m_0 - m}{m_0 (t - t_0)}$.

Skutečný součinitel objemové roztažnosti kapaliny získáme po opravě o roztažnost skla $\beta = \beta' + \beta_s$, $\beta_s = 3\alpha$.

Postup měření:

1. Zvážíme prázdný a suchý pyknometr – hmotnost m_1 . Pyknometr naplníme měřenou kapalinou o teplotě t_0 , určíme hmotnost pyknometru s kapalinou m_2 . Hmotnost kapaliny v pyknometru je $m_0 = m_2 - m_1$.
2. Pyknometr vložíme do vodní lázně, vyčkáme vyrovnání teplot (kapalina přestane vytékat kapilárou v zátce pyknometru), určíme teplotu t .
3. Pyknometr vyjmeme, osušíme a po ochlazení na teplotu místnosti zvážíme – hmotnost m_3 . Hmotnost kapaliny v pyknometru je $m = m_3 - m_1$, úbytek hmotnosti $\Delta m = m_0 - m = m_2 - m_3$.
4. Vypočteme součinitel objemové roztažnosti $\beta' = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \frac{1}{t - t_0}$.
5. Měření několikrát opakujeme, vypočteme aritmetický průměr z hodnot β' a jeho střední chybu. Výsledek měření opravíme o roztažnost skla.
6. Výsledek měření porovnáme s tabulkovými hodnotami. Měření provádíme s kapalinami, které vykazují lineární roztažnost, rozdíly teplot pro všechna měření udržujte stejná (30-40 °C).

2. Měření povrchového napětí kapalin

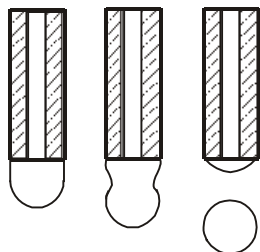
Povrchová vrstva kapaliny má řádově tloušťku asi 10^{-9} m a chová se jako pružná blána. Pomocí síly, která působí na jednotkovou délku okraje povrchu kapaliny, je kolmá k této délce a leží v rovině povrchu kapaliny, je definováno povrchové napětí $\sigma = \frac{dF}{dl}$. Jednotkou je $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$. Povrchové napětí je závislé na teplotě – s rostoucí teplotou klesá, při kritické teplotě je nulové. Pro měření povrchového napětí existuje řada metod – odtrhávací, kapková, z výstupu v kapiláře, stalagmetrem, bublinková, pomocí torzních vah.

2.a Měření povrchového napětí kapkovou metodou

Pomůcky: tlustostěnná zabroušená kapilára, kádinka, stojan, digitální váhy, destilovaná voda, neznámá kapalina

Necháme-li kapalinu volně vytékat z tlustostěnné zabroušené kapiláry, zůstává kapalina lpět na jejím spodním okraji ve tvaru kapky, která se odtrhne v okamžiku, kdy tíha kapky je právě

rovna síle povrchového napětí. Platí rovnice $m g = 2 \pi R \sigma$, kde R je vnější poloměr kapiláry, m hmotnost kapky. Takto určená hodnota povrchového napětí by však byla velmi nepřesná, protože neodkápne celá kapka, ale asi jen 2/3 objemu, zbytek zůstává lpět na spodním okraji kapiláry. Před ukápnutím se kapka zaškrtní, a tím se odtrhne na menším obvodu, než je obvod kapiláry. (Obr. 3)



Obr. 3: Zaškrvení kapky

Platí však, že při použití stejné kapiláry, je zúžení i poměrná část kapky, která zůstane lpět na kapiláře, u různých kapalin, které smáčejí stěny kapiláry, stejná. Označíme-li tedy povrchové napětí jedné kapaliny σ_1 a hmotnost kapky m_1 , pro druhou kapalinu σ_2 a m_2 , dostáváme porovnáním poměr $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{m_1}{m_2}$. Odtud lze neznámé povrchové napětí určit pomocí hmotností

kapek jedné a druhé kapaliny $\sigma_1 = \frac{m_1}{m_2} \sigma_2$. Při měření kapkovou metodou vycházíme z této

rovnice a metodu užíváme pouze jako srovnávací.

Vzhledem k nemožnosti určit hmotnost jedné kapky, necháme vždy odkapat větší počet kapek (50, 100, 200), určíme jejich hmotnost M_1 resp. M_2 a pro povrchové napětí potom máme výraz

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{M_2} \frac{n_2}{n_1} \sigma_2, \text{ kde } n_1 \text{ a } n_2 \text{ jsou odpovídající počty kapek.}$$

Postup měření:

1. Určíme hmotnost suché kádinky – M_0 .
2. Do kádinky necháme zabroušenou kapilárou odkapat n_1 kapek zkoumané kapaliny, určíme hmotnost kádinky s kapalinou – M_1' . Hmotnost kapaliny $M_1 = M_1' - M_0$.
3. Měření opakujeme desetkrát nebo měříme postupnou metodou – vážíme kádinku vždy po přidání n_1 kapek.
4. Kapiláru propláchneme destilovanou vodou a stejné měření provedeme pro destilovanou vodu – určíme hmotnost M_2 celkem n_2 kapek vody. Počty kapek volíme tak, aby se hmotnosti M_1 a M_2 od sebe příliš nelišily.
5. Vyhledáme hodnotu povrchového napětí destilované vody pro danou teplotu a vypočteme povrchové napětí neznámé kapaliny.

$$6. \text{ Střední nejistotu měření určíme pomocí vztahu } \bar{\sigma} = \sigma_1 \sqrt{\left(\frac{\delta M_1}{M_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_2}{M_2}\right)^2}.$$

2.b Měření povrchového napětí kapalin pomocí stalagmometru

Princip metody je stejný jako u kapkové metody, zkoumáme však počet kapek, které se utvoří z daného objemu V zkoumané a srovnávací kapaliny. Vytvoří-li se z objemu V zkoumané kapaliny n_1 kapek o hmotnosti $M_1 = n_1 m_1$, platí $M_1 = \rho_1 V$, odtud $m_1 = \frac{\rho_1 V}{n_1}$. Analogicky pro

srovnávací kapalinu dostaneme $m_2 = \frac{\rho_2 V}{n_2}$. Dosazením do vztahu pro výpočet povrchového

napětí srovnávací metodou máme $\sigma_1 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{n_2}{n_1} \sigma_2$. Při použití této metody není třeba vážit, je nutné určit hustoty kapaliny.

Postup měření:

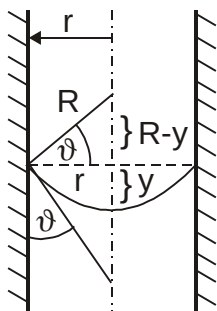
1. Pomocí gumového balónku nasajeme do stalagmometru zkoumanou kapalinu nad rysku Z_1 .
2. Kapalina odkapává do kádinky, počítáme kapky, které se vytvoří dokud hladina neklesne pod spodní rysku Z_2 .
3. Měření několikrát opakujeme.
4. Stalagmetr propláchneme destilovanou vodou a měření zopakujeme pro vodu.
5. Určíme hustoty kapalin nebo je vyhledáme v tabulkách.
6. Vypočteme průměrné hodnoty počtů kapek a jejich střední nejistoty. Vypočteme povrchové napětí. Střední nejistotu výsledku určíme pomocí vztahu

$$\bar{\delta}\sigma_1 = \sigma_1 \sqrt{\left(\frac{\bar{\delta}n_1}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\delta}n_2}{n_2}\right)^2}$$

2.c Měření povrchového napětí kapalin z výstupu v kapiláře

Ponoříme-li kapiláru do kapaliny, která smáčí její stěny, vystoupí kapalina do výšky h nad povrch hladiny. Povrch kapaliny v kapiláře má tvar části kulové plochy o poloměru R . Tlak pod zakřiveným povrchem kapaliny je menší než pod povrchem rovinným. Rozdíl těchto tlaků je vyrovnán hydrostatickým tlakem sloupce kapaliny v kapiláře. Platí $\frac{2\sigma}{R} = h\rho g$, kde σ je povrchové napětí, ρ je hustota kapaliny, R je poloměr kulové plochy ($R > r$).

Obr. 4: Řez kapilárou



Z obr. 4 je vidět, že pro krajový úhel ϑ lze psát $\cos \vartheta = \frac{r}{R}$ a povrchové napětí lze potom vyjádřit pomocí vztahu $\sigma = \frac{r h \rho g}{2 \cos \vartheta}$. Úhel ϑ je pro kapaliny smáčející stěny kapiláry velmi malý ($\vartheta \div 8^\circ \text{C}$) a $\cos \vartheta \div 0,99$. Pro méně přesná měření lze položit $\cos \vartheta = 1$. V případě, kdy má být přesnost měření větší než 1 % nebo kapalina nesmáčí dokonale stěny kapiláry, je třeba $\cos \vartheta$ určit přesněji – změříme hloubku y kulového vrchlíku, který je tvořen hladinou kapaliny v kapiláře. Potom platí $R^2 = (R-y)^2 + r^2$, odtud lze vyjádřit $R = \frac{y^2 + r^2}{2y}$, což po dosazení do výrazu $\cos \vartheta = \frac{r}{R}$ dává $\cos \vartheta = \frac{2ry}{y^2 + r^2}$.

A. Měření nezávislou metodou

Pomůcky: rtuť, kapilára, teploměr, digitální váhy, kádinka, zrcadlové měřítko, Mohrovy vážky

Pomocí rtuti, kterou nasajeme do kapiláry, určíme její vnitřní prostor. Poloměr kapiláry

$r = \sqrt{\frac{V}{\pi l}} = \sqrt{\frac{m}{\rho_r \pi l}}$, kde l je délka rtuťového sloupce, objem $V = \pi r^2 l$ lze určit pomocí

hustoty rtuti a její hmotnosti $V = \frac{m}{\rho_r}$

Postup měření:

1. Pomocí gumového balónku (**nikdy ne ústy**) nasajeme do kapiláry sloupec rtuti asi o délce 40 mm. Kapiláru položíme na vodorovné zrcadlové měřítko a několikrát změříme délku rtuťového sloupce. Odečítáme při různé poloze měřítka a na různých místech kapiláry. Sloupec rtuti posouváme nakloněním kapiláry nebo poklepem.
2. Na digitálních vahách zvážíme podložní sklíčko – hmotnost m_0 a potom na ně vyklepneme rtuť z kapiláry. Zvážíme sklíčko se rtutí – hmotnost m_1 , hmotnost rtuti je $m = m_1 - m_0$.
3. Pro danou teplotu v laboratoři vyhledáme hustotu rtuti ρ_r .
4. Vypočteme poloměr kapiláry r chybu měření $\bar{\delta}r = r \frac{\bar{\delta}l}{2l}$.
5. Určíme hustotu zkoumané kapaliny (např. pomocí Mohrových vážek).
6. Kapalinu nalijeme do širší nádoby se svislými stěnami, svisle do ní ponoříme kapiláru. Pomocí zrcadlového měřítka nebo pomocí katetometru měříme výšku hladiny v kapiláře.

Odečítáme vždy polohu h_0 hladiny v nádobě a polohu menisku h_1 v kapiláře. Výška výstupu je $h = h_1 - h_0$. Měření několikrát opakujeme (měníme hloubku ponoru kapiláry) a vypočteme aritmetický průměr $\bar{h}$ a střední chybu $\bar{\delta}h$.

7. Vypočteme povrchové napětí zkoumané kapaliny a střední chybu výsledku

$$\bar{\delta}\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\bar{\delta}r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\delta}h}{h}\right)^2}.$$

B. Měření srovnávací metodou

Pomůcky: kapilára, odměrný válec, teploměr, katetometr, destilovaná voda, neznámá kapalina

Povrchové napětí zkoumané kapaliny srovnáváme s povrchovým napětím destilované vody (nebo jiné známé kapaliny). V tomto případě není nutné určovat vnitřní poloměr kapiláry a jsou-li navíc srovnatelné i krajové úhly, není třeba určovat ani $\cos \vartheta$. Lze odvodit vztah

$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2}$, kde indexy 1 označují zkoumanou kapalinu, indexy 2 kapalinu srovnávací.

Odtud $\sigma_1 = \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2} \sigma_2$.

Postup měření:

1. Určíme hustoty obou kapalin (např. pomocí Mohrových vážek).
2. Změříme výšky výstupu v kapiláře pomocí katetometru.
3. Povrchové napětí srovnávací kapaliny najdeme pro danou teplotu v tabulkách. Vypočteme hodnotu povrchového napětí zkoumané kapaliny a střední nejistotu výsledku

$$\bar{\delta}\sigma_1 = \sigma_1 \sqrt{\left(\frac{\bar{\delta}h_1}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\delta}h_2}{h_2}\right)^2}.$$

2d. Měření povrchového napětí pomocí soupravy ISES

Pomocí soupravy ISES lze demonstrovat průběh síly při odtrhávání těles různých tvarů od povrchu kapaliny.

Pomůcky: modul siloměr, odměrný válec, různé kapaliny (voda, olej, líh), tělesa různých tvarů (destička, koule atd)

Postup měření:

V programu nastavíme celkový čas měření 2,5 s a vzorkovací frekvenci 200 Hz. Oživíme kanál A, ke kterému jsme připojili modul siloměr. Zobrazovat budeme časovou závislost. Je vhodné nastavit ruční start s akustickým signálem.

Na háček pod silové čidlo zavěšíme těleso dobře upevněné na tenké niti a ponoříme je do kapaliny. Potenciometrem nastavíme siloměr na 0 N (tj. asi do poloviny obrazovky). Teprve potom zaměníme celkový čas měření na 4 s a vzorkovací frekvenci 200 Hz. Odstartujeme a pomalu plynule oddalujeme válec s kapalinou, až se těleso úplně odtrhne.

3. Měření prostupu tepla, koeficient k

Každou látku, resp. materiál lze charakterizovat z hlediska tepelných (izolačních) vlastností jejich tepelnou vodivostí, tepelnou kapacitou a schopností tepelné izolace. Zavádíme tzv. koeficient tepelné vodivosti λ a koeficient tepelné propustnosti k .

Hodnoty koeficientu λ jsou tabelovány - pro běžné materiály viz. tabulka 1.

Tabulka 1.

Materiál	λ (W/m.K)	Materiál	λ(W/m.K)
stříbro	418	cihly	0,28-1,2
hliník	229	sklo	0,6 - 1,0
železo	73	asfalt	0,7
olovo	34,7	dřevo	0,15
led	2,2	skelná vata	0,03 - 0,05
beton	1,5	polystyrén	0,035 - 0,041

K zavedení veličiny k .

Při zavádění veličiny k vycházíme ze vztahu pro výpočet přenosu tepla mezi dvěma tekutinami, které jsou odděleny stěnou (Newtonův vztah) $Q = \lambda S \tau (t_1 - t_2)$, kde λ je součinitel tepelné vodivosti stěny, S je její plocha, τ je doba tepelné výměny, t_1 a t_2 jsou teploty tekutiny - vzduchu uvnitř a vně boxu. Dále zavádíme tok tepla Φ stěnou, který zapisujeme ve tvaru $\Phi = k.S.(t_1 - t_2)$, kde S je plocha stěny, t_1 je teplota vzduchu uvnitř prostoru, t_2 je teplota vzduchu vně prostoru a konstanta úměrnosti je tzv. koeficient k .

Uvedený vztah lze přepsat ve tvaru $\Phi = \frac{\lambda}{d} S (t_1' - t_2')$, kde λ je koeficient tepelné vodivosti, d je tloušťka stěny, S je plocha stěny, t_1' je teplota stěny uvnitř, t_2' je teplota stěny vně prostoru. Odtud $k = \frac{\Phi}{S(t_1 - t_2)}$. Hodnota koeficientu k je pro různé materiály a typy stěn dána

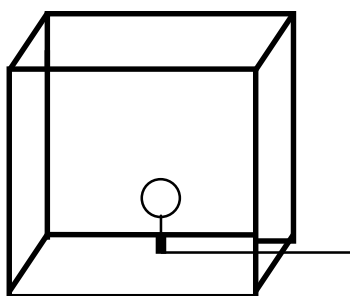
ve stavitelství normativními předpisy, Daná hodnota koeficientu je vztažena k určité tloušťce materiálu. Některé příklady jsou uvedeny v tab. 2.

Tabulka 2:

část stavby	koeficient k (W.m⁻².K⁻¹)
vnější zeď	1,56
Okna	5,2
Střecha	0,8
stropy sklepů	1,02

V podstatě každý dům (stavbu) lze simulovat (pro jednoduchost čtvercovou) krabicí - boxem. Pro konstrukci boxu byl pro své dobré izolační vlastnosti zvolen polystyrén. Zevnitř je box

vyhříván pomocí žárovky.



Při praktické realizaci byly rozměry boxu zvoleny 400x400x400 mm, tloušťka stěn je 20 mm, tloušťka dna a víka 50 mm. Horní deska je vyměnitelná, velikost výměnného okna je 360x360 mm. Uvnitř boxu je umístěna 40 wattová žárovka. Box je vyhříván po dobu asi 40 minut, až je dosaženo teplotního rozdílu uvnitř a vně boxu přibližně 25 °C (lze tak simulovat chladný den, kdy venkovní teplota je -2 °C a uvnitř místnosti je 23 °C). Vrchní stěna boxu může být postupně nahrazována deskami z jiných materiálů (dřevo, sklo, papír apod.) Úkolem je měřit teplotu vzduchu uvnitř boxu, teplotu vnitřní stěny, teplotu vnější stěny a teplotu vně boxu (teplota místnosti, během měření zůstává konstantní).

Koeficient k je možné určit také pomocí výkonu žárovky, potom není nutné měřit teploty stěn. Žárovku zapojíme tak, aby její výkon (měřený wattmetrem) byl regulovatelný. Tím lze předem stanovit teplotu, které má být uvnitř boxu dosaženo. Tato teplota je pro všechny materiály stejná. Výkon žárovky regulujeme tak, až nastane ustálený stav (teplota uvnitř boxu se nemění alespoň po dobu pěti minut). Potom stačí započítat stav wattmetru a teplotu vzduchu uvnitř a vně prostoru. Při výpočtech je třeba mít na zřeteli, že 1/6 energie proniká vyměnitelným oknem, zbývajících 5/6 ostatními stěnami boxu. Krabici je třeba umístit na podložky, aby byl umožněn stejný odvod tepla i dnem boxu.

3.a Určení koeficientu k různých materiálů

Pomůcky: polystyrénový box s vyměnitelnou stěnou, stěny ze skla, dřeva, teploměry digitální, vpichovací, stopky, žárovka 40 W, elektrický vysoušeč vlasů, délkové měřítko

Postup měření:

1. Změříme rozměry boxu, tloušťky jeho stěn, změříme tloušťku materiálu pro vyměnitelnou stěnu. Vypočteme plochu S .
2. Dovnitř boxu umístíme žárovku o výkonu 40 W a nainstalujeme teploměry pro měření teploty uvnitř boxu (vpichovací digitální teploměr) a stěn boxu uvnitř a vně (pomocí teplotní sondy). Odečteme teplotu místnosti.
3. Zapneme žárovku a v pravidelných intervalech (3 až 5 minut) odečítáme hodnoty teploty na všech teploměrech. Měření zapisujeme do vhodné tabulky. Měříme asi 40 minut.
4. Z naměřených hodnot vypočítáme velikost tepelného toku ze vztahu $\Phi = \frac{\lambda}{d} S(t_1' - t_2')$,
kde t_1' a t_2' jsou teploty stěn uvnitř a vně boxu. Hodnotu koeficientu λ pro příslušný materiál vyhledáme v tabulkách.

5. Vypočteme hodnotu koeficientu k ze vztahu $k = \frac{\Phi}{S(t_1 - t_2)}$, kde t_1 je teplota vzduchu uvnitř boxu a t_2 je teplota vzduchu vně boxu (teplota místnosti, během měření zůstává stálá).
6. Měření opakujeme pro různé materiály výměnného okna (polystyrén, dřevo, sklo, popř. papír).
7. Pomocí elektrického vysoušeče vlasů simulujeme rozdílné povětrnostní podmínky (vítr) v okolí zavřeného a otevřeného „okna“. Porovnáme výsledky měření a provedeme diskusi.

4. Solární technologie, skleníkový efekt

Solární panel je typickým příkladem pro využití sluneční energie jakožto obnovitelného energetického zdroje. Přímá přeměna světla na jiné druhy energie je známa již řadu let, nejznámější je přeměna na teplo a na elektrickou energii. Výkon slunečního záření na hranici atmosféry udává solární konstanta. Její hodnota se pohybuje v rozmezí 800-1700 kW.m⁻² v závislosti na zeměpisné šířce, ročním období apod. Na celou zemi dopadá asi 1,8.10¹⁴ kW zářivého toku, který se však při průchodu atmosférou snižuje až 50 % původní velikosti. I tak je to mnohokrát více, než je celková spotřeba energie na Zemi. Hlavním problémem využití sluneční energie je její kumulace, uchovávání a popř. transport na místo spotřeby. Problémem je také nízká účinnost solárních zařízení.

Předložený solární panel se skládá z paralelně řazených hradlových fotočlánků. Hradlové fotoelektrické články pracují na principu vnitřního fotoelektrického jevu a využívají i usměrňujícího účinku rozhraní kov – polovodič. Používaná rozhraní jsou Cu-Cu₂O (kuproxové články), Fe-Se (selenové), polykrystalický křemík, monokrystalický křemík, popř. amorfní křemík. Primární hradlový fotočlánek dává napětí asi 0,2 V až 1 V (společná kovová elektroda je kladný pól), toto napětí je tzv. naprázdno, měříme je voltmetrem přímo na solárním článku. Paralelním řazením primárních článků se dosáhne zvětšení proudového odběru, sériovým řazením zvýšení výstupního napětí. Použitý solární panel dává 0,57 V při odběru 775 mA. Solární kondenzátor slouží k akumulaci sluneční energie, má velkou kapacitu. Elektrody jsou z aktivní uhlíkové vlákniny, je však pouze pro malá napětí. Kondenzátor má kapacitu 10 Faradů při napětí 2,3 V (kapacita zeměkoule je asi 1 F). Pokud budeme solární kondenzátor nabíjet ze solárního článku, nebude překročen nabíjecí proud. Je třeba dát pozor na polaritu. Při rychlonabíjení ze zdroje se nesmí překročit napětí 2,3 V (lze použít např. paralelně připojeného monočlánku). Kondenzátorem lze pohánět solární motorek, rozsvítit žárovku (1,5 V, 50-100 mA).

4.a Studium charakteristik solárního článku

Pomůcky: solární panely, větrníček, kondenzátor, zdroj napětí 12 V, halogenová žárovka, délkové měřítko, voltmetr, ampérmetr, stolní lampa, úhloměr

Postup měření:

1. Studujte závislost napětí solárního článku na vzdálenosti světelného zdroje.
2. Studujte změnu napětí v závislosti na výkonu světelného zdroje.

3. Stanovte úhlovou charakteristiku solárního článku (tj. závislost na směru dopadu světelných paprsků).
4. Určete zkratový proud jako funkci intenzity osvětlení.
5. Studujte uvedené charakteristiky při sériovém a paralelním zapojení solárních panelů.
6. Demonstrujte akumulaci solární energie .

Výsledky měření prezentujte ve formě grafů i analyticky. Proveďte diskusi.

4.b Charakteristiky solárních článků s použitím soupravy ISES

Školní experimentální systém ISES je univerzální program pro měření - naměřené hodnoty je možné zobrazovat graficky v časových závislostech nebo je lze prezentovat v číselné podobě. Program umožňuje různé možnosti zpracování naměřených dat.

Závislost na osvětlení

Pomůcky: solární články, modul voltmetr, stolní lampa, skleněná deska, polarizační filtr, aj.

Postup práce:

Po spuštění programu vložíme vstupní parametry, nastavíme např. celkový čas měření 1 s a vzorkovací frekvenci 1000 Hz. Oživíme kanál A, ke kterému připojíme modul voltmetr. Voltmetr nastavíme na rozsah 1 V s nulou vlevo. Solární články spojíme do série a připojíme k voltmetru. Stolní lampu umístíme tak, aby žárovka byla ve vzdálenosti 15 až 20 cm od článku a rozsvítíme. Po prvním měření vložíme mezi žárovku a solární článek obyčejné sklo a v programu zvolíme povel „přidej“. Tak postupujeme i při použití jiných filtrů. Vzájemnou vzdálenost solárního článku a žárovky neměníme.

Na obrazovce sledujeme průběh napětí. Provedeme diskusi.

Solární článek reaguje na elektromagnetické vlnění vlnových délek i mimo oblast viditelného světla. Vzhledem k tomu, že sklo nepropouští ultrafialové záření, pozorujeme po vložení skleněné desky mezi solární článek a žárovku úbytek napětí. Podobné vysvětlení platí i pro ostatní filtry (např. barevné sklo absorbuje navíc i některé složky z viditelného světla).

Dále lze pozorovat, že napětí není konstantní, ale periodicky kolísá s frekvencí 100 Hz. Je to opět způsobeno žárovkou, připojenou ke zdroji střídavého napětí.

Zatěžovací charakteristika

Pomůcky: modul voltmetr, modul ampérmetr, solární články, posuvný odpor (trimr) do 100 Ω

Postup práce:

Solární článek se chová jako každý jiný zdroj napětí s reálným vnitřním odporem.

V programu nastavíme celkový čas měření 3 sekundy a vzorkovací frekvenci 500 Hz. Oživíme kanál A, ke kterému připojíme modul voltmetr a kanál B, ke kterému připojíme modul ampérmetr. Zobrazení v prvním a ve druhém grafu ponecháme standardní, tj. v prvním grafu závislost napětí (kanál A) na čase, ve druhém závislost proudu (kanál B) na čase. Ve

třetím grafu zvolíme závislost proudu na napětí. Voltmetr nastavíme na rozsah 1 V s nulou vlevo, ampérmetr na rozsah 100 mA s nulou vlevo.

K solárnímu článku osvětlenému ze vzdálenosti 10 až 15 cm stolní lampou připojíme posuvný odpor, který nastavíme na nejmenší hodnotu. V průběhu tří sekund měření tuto hodnotu pokud možno plynule (ručně) měníme. Ampérmetrem sledujeme proud v obvodu, voltmetrem napětí na zdroji.

5. Základní zákony ideálního plynu

Chování ideálního plynu lze demonstrovat pomocí zařízení firmy PHYWE, které umožňuje sledovat ideální plyn při změnách jeho stavových veličin (V , p , T), v případě použití termostatu lze demonstrovat izobarický a izochorický děj. Pomocí naměřených veličin lze odvodit stavovou rovnici ideálního plynu. Studovaný plyn se nachází ve skleněné trubici, která je připojena ke rtuťovému U-manometru. Měřicí trubice je upevněna na vysoké stativové tyči, manometrem lze pohybovat podél stativu. Změnou výšky manometru lze měnit tlak a objem měřeného plynu (vzduchu). K celému zařízení lze připojit termostat. Při práci je třeba dodržovat bezpečnostní předpisy týkající se práce se rtutí.

5.a Určení závislosti mezi p a V při $T = \text{konst}$ (Boyle-Mariottův zákon)

Pomůcky: zařízení firmy PHYWE „Zákony plynů“, teploměr, délkové měřítko

Objem V uzavřeného množství vzduchu je úměrný odečtené délce l vzduchového sloupce.

$$\text{Platí: } V = V_l + V_k = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot l + V_k = \pi \left(\frac{11,4 \text{ mm}}{2} \right)^2 \cdot l + 1,02 \text{ ml}$$

a

$$\rho = \rho_A + \Delta\rho = \rho_A + \Delta h \cdot 0,1333 \text{ kPa} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

V uvedených vztazích označuje V_l objem vzduchu po spodní hranici nálevkovitého ukončení, V_k množství vzduchu v kyvetě, d vnitřní průměr měřicí trubice, p_A vnější tlak vzduchu, Δh rozdíl výšek rtuťového sloupce, $1 \text{ mm Hg} \approx 0,1333 \text{ kPa}$.

Podle toho, zda hladina rtuti leží výše v zásobníku nebo měřicí trubici, dosazujeme hodnotu Δp s kladným resp. záporným znaménkem. Teplotu T dosazujeme v absolutní teplotní stupnici.

Postup práce:

1. Na barometru v laboratoři odečteme tlak.
2. Změříme teplotu t plynu (vzduchu) v trubici.
3. Pro danou výšku pravého ramene manometru měříme rozdíl hladin rtuti v obou ramenech manometru a výšku vzduchového sloupce. Polohu pravého ramene manometru nastavíme postupně do několika (6ti) poloh.
4. Provedeme výpočet a ověření Boyle-Mariottova zákona.
5. Výsledky uvedeme v početní i grafické formě.

5.b Ověření Gay-Lussacova zákona

Studujeme závislost objemu V na teplotě T při $p = \text{konst.}$ Tuto závislost vyjadřuje zákon Gay-Lussacův, který lze psát ve tvaru $V = V_0(1 + \gamma)$. Součinitel γ je pro všechny plyny přibližně stejný a má hodnotu $0,00366 \text{ K}^{-1}$, tj $\gamma = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$. Součinitel γ nezávisí na teplotě a tlaku. Zavedeme-li v uvedených vztazích absolutní teplotu, lze Gay-Lussacův zákon zapsat ve tvaru $V = \frac{V_0}{T_0} T$, kde T je absolutní teplota (nemůže nabývat záporných hodnot, neboť potom by i objem byl záporný).

Postup práce:

Pro daný rozdíl výšek (např. $\Delta h = 0$) hladin rtuti stanovujeme pro různé teploty odpovídající objemy vzduchu. Při každém měření je třeba posunout zásobník do takové polohy, aby byl zachován předem stanovený rozdíl hladin. Při rostoucí teplotě se objem vzduchu zvětšuje. Teplotu zvyšujeme postupně pomocí oběhového termostatu – zahřátá voda proudící z termostatu ohřívá vzduch uzavřený ve skleněném válci. Teplotu měříme digitálním vpichovacím teploměrem. Měříme pro 6 různých hodnot teploty. Tento proces je popsán rovnicí $V = V_0(1 + \gamma(T - T_0)) = V_0(1 + \gamma \cdot \vartheta)$, kde γ je koeficient objemové roztažnosti plynů ($\gamma = 1/273 \text{ K}^{-1}$). Výsledky měření prezentujeme početně i graficky.

5.c Ověření závislosti tlaku p na teplotě T při $V = \text{konst.}$

Závislost vyjadřuje Amontonův zákon. Provedení pokusu je obdobné jako v případě 5.b, ale nyní je konstantní objem vzduchu a odečítáme příslušné rozdíly výšek Δh . V diagramu vyneseme celkový tlak $p = p_A + \Delta p$ jako funkci T . Pro izochorickou změnu platí $p = p_0(1 + \beta(T - T_0)) = p_0(1 + \beta \cdot \vartheta)$. Koeficient β označuje napětový koeficient plynů (teplotní součinitel rozpínavosti plynů), který je číselně roven $1/273 \text{ K}^{-1}$. Po zavedení absolutní teploty platí $p = \frac{T_0}{T_0} T$. Při stálém objemu je tlak plynu přímo úměrný absolutní teplotě. Obecně u reálných plynů jsou koeficient roztažnosti a koeficient rozpínavosti různé, nejbližší hodnoty jsou pro vodík – základní teploměrná látka.

5.d Stavová rovnice plynů

Stav daného množství plynu je určen třemi parametry – teplotou, tlakem a objemem. Obecný děj, při kterém se současně mění všechny tyto tři veličiny je popsán stavovou rovnicí $\frac{pV}{T} = \text{konst.}$ V celsiově teplotní stupnici lze výraz zapsat ve tvaru $pV = p_0 V_0 (1 + \gamma)$.

Vztah odvodíme následujícím postupem:

Opakujeme pokus 1 při různých teplotách T a vyneseme výsledek $p.V$ v závislosti na T . Dostáváme přímku, která po prodloužení protíná osu teploty při hodnotě $T_0 = 0$ K. Odpovídající analytické vyjádření přímky má tvar $p.V = k.T$. Popisuje stav ideálního plynu, přičemž k je pro dané množství plynu konstantní. Výsledek ověříme výpočtem.

Úlohy II. cyklus

6. Kalorimetrická měření

6.a Měření měrného tepla pevných látek.

Pomůcky: plechový kalorimetr, technické váhy, měřené těleso, elektrický vaříč, teploměry, voda, stopky

U všech kalorimetrických měření stanovíme nejprve výše popsaným způsobem tepelnou kapacitu kalorimetru a provedeme opravu na výměnu tepla s okolím (měření ve třech etapách).

Teplo Q , které je nutno dodat látce o hmotnosti m , aby se její teplota zvýšila o malý přírůstek Δt , je $Q = c m \Delta t$, kde c je měrné teplo dané látky. Odtud měrné teplo $c = \frac{Q}{m \Delta t}$. Jednotkou

měrného tepla v soustavě SI je $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Měrné teplo závisí na teplotě a tlaku, v obvyklém teplotním intervalu se však mění tak nepatrně, že je můžeme považovat za konstantní.

Měrné teplo budeme měřit pomocí směšovacího plechového kalorimetru, jehož tepelnou kapacitu K určíme výpočtem.

Do kalorimetru o tepelné kapacitě K nalijeme vodu o hmotnosti m_1 , jejíž teplota je t_1 . Pak do něj vložíme zkoumané těleso, které jsme ve vodní lázni ohřáli na teplotu t_2 a jehož hmotnost je m_2 . V kalorimetru se ustálí výsledná teplota t . Označíme-li měrné teplo vody c_1 a hledané měrné teplo c_2 , platí kalorimetrická rovnice

$(m_1 c_1 + K)(t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$ a odtud měrné teplo zkoumané látky

$$c_2 = \frac{(m_1 c_1 + K)(t - t_1)}{m_2 (t_2 - t)}.$$

Postup měření:

Stanovíme tepelnou kapacitu kalorimetru výpočtem. Pak zvážíme prázdný suchý kalorimetr (s míchačkou a teploměrem) a jeho hmotnost označíme m_0 . Do kalorimetru nalijeme destilovanou vodu a určíme hmotnost m_1' kalorimetru s vodou. Hmotnost vody v kalorimetru je $m_1 = m_1' - m_0$. Zkoumané těleso vložíme do vodní lázně a ohříváme (nejlépe až na teplotu varu vody). Vodu v kalorimetru promícháváme a po půl minutě odečítáme její teplotu. Při desátém odečtení vložíme do kalorimetru těleso ohřáté na teplotu t_2 a dokončíme měření. Těleso vyjmeme z kalorimetru, osušíme a určíme jeho hmotnost m_2 . Zpracujeme výsledky měření ve třech etapách a určíme opravenou výslednou teplotu t v kalorimetru. Jako teplotu t_1 bereme poslední teplotu v první etapě (neboli první teplotu ve druhé etapě), teplota t_2 je

teplota lázně, v níž jsme ohřívali těleso. Vypočteme měrné teplo zkoumané látky. Při výpočtu dosazujeme za $c_1 = 4186,8 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Výsledek měření porovnáme s tabulkovou hodnotou.

6.b Měření měrného tepla kapalin elektrickým kalorimetrem.

Pomůcky: elektrický kalorimetr, teploměry, voda, stopky, voltmetr, ampérmetr, reostat, vodiče, transformátor 24 V/5 A

Jednoduchý elektrický kalorimetr dostaneme z kalorimetru směšovacího, ponoříme-li do kapaliny v kalorimetru topnou cívku z odporového drátu. Při průchodu elektrického proudu touto cívkou se za dobu τ spotřebuje elektrická energie $W = U I \tau$, kde U je napětí na topné cívce a I proud, který jí prochází. V kalorimetru se celá tato energie přemění na teplo, kterým se ohřeje kapalina v kalorimetru, vnitřní nádoba kalorimetru a příslušenství. Je-li K tepelná kapacita kalorimetru s příslušenstvím, m hmotnost kapaliny v kalorimetru, c její měrné teplo, t_1 počáteční teplota a t_2 výsledná teplota v kalorimetru, platí

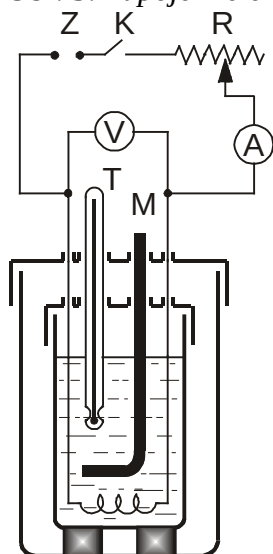
$W = Q = U I \tau = (m c + K)(t_2 - t_1)$ a odtud měrné teplo kapaliny

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{U I \tau}{t_2 - t_1} - K \right).$$

Postup měření:

Experimentálně stanovíme tepelnou kapacitu kalorimetru s míchačkou, teploměrem a topnou cívkou.

Obr. 5: Zapojení elektrického kalorimetru



Zvážíme prázdný kalorimetr s příslušenstvím, jeho hmotnost označíme m_0 . Do kalorimetru nalijeme zkoumanou kapalinu (topná cívka musí být v kapalině ponořena) a určíme hmotnost m_1 . Hmotnost kapaliny v kalorimetru je $m = m_1 - m_0$. Topnou cívku připojíme ke zdroji elektrického napětí (24 V=), přičemž do obvodu zapojíme reostat R, ampérmetr A, voltmetr V. Obvod spojíme (po překontrolování vedoucím praktika) a nastavíme vhodné hodnoty proudu a napětí. Obvod znovu rozpojíme a měříme v půlminutových intervalech teplotu. Na konci první etapy obvod spojíme a v půlminutových intervalech odečítáme teplotu kapaliny za stálého míchání (II. etapa). Současně sledujeme údaj ampérmetru a voltmetru, proud a napětí se během měření nesmí měnit. Když teplota v kalorimetru vzroste o 10 až 20 °C, obvod

rozpojíme a zaznamenáme čas. Druhá etapa měření však ještě pokračuje, neboť od ohřáté cívky se ještě po nějakou dobu ohřívá kapalina v kalorimetru. Poslední hodnotou ve druhé etapě měření je nejvyšší teplota kalorimetru. Pak následuje třetí etapa měření.

Zpracujeme výsledky měření ve třech etapách. Do vztahu pro výpočet měrného tepla dosadíme za t_1 první teplotu ve druhé etapě, za t_2 opravenou poslední teplotu ve druhé etapě, dobu τ po kterou topnou cívkou procházel proud, dosadíme v sekundách. Výsledek měření srovnáme s tabulkovou hodnotou.

6.c Měření měrného skupenského tepla tání ledu

Pomůcky: Dewarova nádoba, teploměry, voda, led, stopky, technické váhy

Měrné skupenské teplo tání je číselně rovné množství tepla, které je nutné dodat jednomu kilogramu pevné látky, ohřáté na teplotu tání, aby se změnila v kapalinu téže teploty. Měříme je v jednotkách J.kg^{-1} . Měrné skupenské teplo tání závisí na teplotě a tlaku. Za normálních podmínek (teplota 0°C , tlak $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) je měrné skupenské teplo tání ledu $l_t = 3,337 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.

Vložíme-li do kalorimetru o tepelné kapacitě K , který obsahuje vodu o hmotnosti m_1 , teplotě t_1 a měrném teple c , led o hmotnosti m_2 , jehož teplota $t_o = 0^\circ\text{C}$ (tj. teplota tání ledu za normálních podmínek), led v kalorimetru nejprve roztaje a vzniklá voda se ohřeje na výslednou teplotu t v kalorimetru. Platí kalorimetrická rovnice

$(m_1 c + K)(t_1 - t) = m_2 c (t - t_o) + m_2 l_t$ a odtud měrné skupenské teplo tání ledu

$$l_t = \frac{(m_1 c + K)(t_1 - t) - m_2 c (t - t_o)}{m_2}.$$

Postup měření:

Nejprve určíme tepelnou kapacitu kalorimetru.

Zvážíme prázdný suchý kalorimetr, jeho hmotnost je m_o . Kalorimetr naplníme asi do dvou třetin vodou, jejíž teplotu volíme 30 až 40°C a určíme hmotnost m_1' . Hmotnost vody v kalorimetru $m_1 = m_1' - m_o$. Měříme opět ve třech etapách. Během první etapy si připravíme přiměřené množství ledu. Roztlučeme led na menší kousky a osušíme filtračním papírem. Při odečtení poslední teploty v první etapě (tj. první teploty ve druhé etapě) vhodíme led do kalorimetru. Teplota v kalorimetru klesá zprvu rychle, pak pomaleji. Obsah kalorimetru stále mícháme a jako poslední hodnotu ve druhé etapě bereme nejnižší teplotu kalorimetru. Množství použitého ledu musí být voleno tak, aby teplota v kalorimetru klesla alespoň o 15°C (pod teplotu místnosti), ale přitom aby neklesla až na 0°C . Je-li ledu příliš mnoho, ochladí se obsah kalorimetru na 0°C a další tání ledu by mohlo nastat jen výměnou tepla s okolím. Skupenské teplo tání ledu v tomto případě nelze určit a měření je třeba opakovat s menším množstvím ledu, popř. s vyšší počáteční teplotou vody nebo větším množstvím vody.

Po skončení třetí etapy měření zvážíme znovu kalorimetr, jeho hmotnost je m_2' . Hmotnost ledu, který roztál v kalorimetru je tedy $m_2 = m_2' - m_1'$. Do vztahu pro výpočet měrného skupenského tepla dosazujeme za teplotu t_1 poslední teplotu v první etapě (neboli první

teplotu ve druhé etapě), jako teplotu t opravenou poslední teplotu ve druhé etapě. Teplota $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, neboť závislost bodu tání na barometrickém tlaku je mnohem menší než u bodu varu. Měření je zatíženo chybou související s tím, že led při vhazování do kalorimetru není dokonale suchý, ve hmotnosti m_2 je tedy obsaženo určité procento vody.

7. Měření viskozity kapalin

Pohybují-li se dvě sousední vrstvy kapaliny, vzdálené od sebe o dy , různými rychlostmi v a $v+dv$, pak mezi nimi vzniká následkem vnitřního tření tečné napětí, které je přímo úměrné vzdálenosti dy sousedních vrstev, přičemž vzdálenost měříme kolmo ke směru rychlosti. Tečné napětí

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}.$$

Konstanta úměrnosti η vyjadřuje vlastnosti kapaliny a nazývá se dynamická viskozita. Jednotkou dynamické viskozity je N.s.m^{-2} ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$). V praxi se často ještě používá jednotka desetkrát menší, tzv. poise.

Při mnoha měřeních je snazší určovat tzv. kinematickou viskozitu ν , která je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty dané látky při téže teplotě

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Jednotkou kinematické viskozity je $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$. V praxi se ještě setkáme s jednotkou 10^4 krát menší, která má název stok. Pro kinematickou viskozitu olejů se v praxi používá jednotka Englerův stupeň. Pro převod kinematické viskozity z Englerových stupňů na jednotky soustavy SI lze použít Vogelova vztahu

$$\nu = \frac{E}{10^6} 7,6^{(1 - 1/E3)} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}.$$

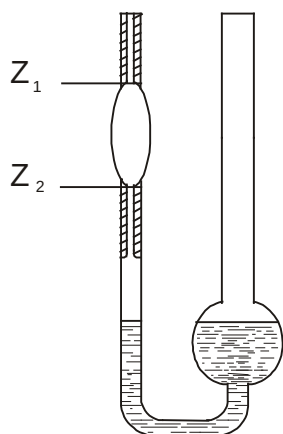
Viskozita značně závisí na teplotě. U kapalin s rostoucí teplotou rychle klesá, u plynů roste přímo úměrně s odmocninou z absolutní teploty.

Viskozitu měříme přístroji, které se nazývají viskozimetry. Dělíme je na tři základní skupiny: výtokové, rotační a tělískové.

7.a Měření viskozity kapalin kapilárními viskozimetry

Pomůcky: kapilární viskozimetr, automatické digitální stopky, destilovaná voda, etylalkohol, gumový balónek, teploměr

Obr. 6: Kapilární viskozimetr



Kapilární viskozimetry patří mezi viskozimetry výtokové. Jsou založeny na Poisseuillově vztahu, podle něhož při ustáleném laminárním proudění kapaliny o viskozitě η proteče za dobu τ trubici délky l a poloměru r objem

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\tau}{l} \cdot p$$

kde p je rozdíl tlaků na koncích trubice.

U kapilárních viskozimetrů vytéká kapalina vlivem vlastní tíhy, rozdíl tlaků p je tedy rovný hydrostatickému tlaku kapaliny, $p = h \rho g$. Pro výpočet dynamické viskozity pak dostáváme vztah

$$\eta = \frac{1}{V} \frac{\pi r^4}{8l} \tau h \rho g.$$

Stanovení délky a poloměru kapiláry i proteklého objemu by bylo obtížné, výška h sloupce kapaliny se během měření mění, měření viskozity nezávislou metodou by tedy bylo obtížné a nepřesné. Proto budeme měřit srovnávací metodou. Určíme dobu τ_1 , za kterou proteče kapilárou objem V zkoumané kapaliny, jejíž viskozitu η_1 měříme, a dobu τ_2 , za kterou proteče toutéž kapilárou stejný objem srovnávací kapaliny, jejíž viskozitu η_2 známe. Jsou-li ρ_1 , ρ_2 hustoty kapalin, pak za předpokladu, že počáteční rozdíl hladin h je u obou kapalin stejný, platí pro poměr viskozit

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2}$$

a viskozita zkoumané kapaliny

$$\eta_1 = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2} \eta_2$$

Nejjednodušším přístrojem k měření viskozity je Ostwaldův viskozimetr. Do širšího ramene trubice nalijeme měřenou kapalinu a hadičkou nasazenou na užší rameno trubice ji nasajeme nad horní značku Z_1 . Měříme dobu, za kterou kapalina proteče od horní značky Z_1 k dolní značce Z_2 .

Postup měření:

Ostwaldův viskozimetr upevníme do stojanu tak, aby kapilára byla ve svislé poloze. Do viskozimetru nalijeme zkoumanou kapalinu a zapojíme elektronický měřič doby průtoku. Nasáváme kapalinu tak dlouho, až se rozsvítí obě indikační diody polohy kapalinového sloupce (tj. až nad horní značku). Vytékající sloupec kapaliny automaticky při projití horní značkou spustí elektronické stopky, při průchodu polohou Z_2 se stopky automaticky zastaví. Měříme dobu τ_1 průtoku několikrát za sebou. Opakovaně měříme také teplotu kapaliny;

teplota se během měření nesmí měnit, neboť závislost viskozity na teplotě je velmi výrazná. Dobu průtoku měříme nejméně desetkrát. Jako srovnávací kapalinu použijeme destilovanou vodu. Při výměně kapalin viskozimetr důkladně vyčistíme, srovnávací kapalinou nejprve propláchneme a pak naplníme. Měření zapíšeme do vhodných tabulek, vypočteme pro každou kapalinu aritmetický průměr dob průtoku, stanovíme nejistoty měření. Hustoty měřené i srovnávací kapaliny určíme pomocí Mohrových vážek. Za předpokladu, že hustoty jsou změřeny se zanedbatelně malou chybou, vypočteme střední nejistotu výsledku podle vztahu

$$\delta\eta_1 = \eta_1 \sqrt{\left(\frac{\delta\tau_1}{\tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right)^2}.$$

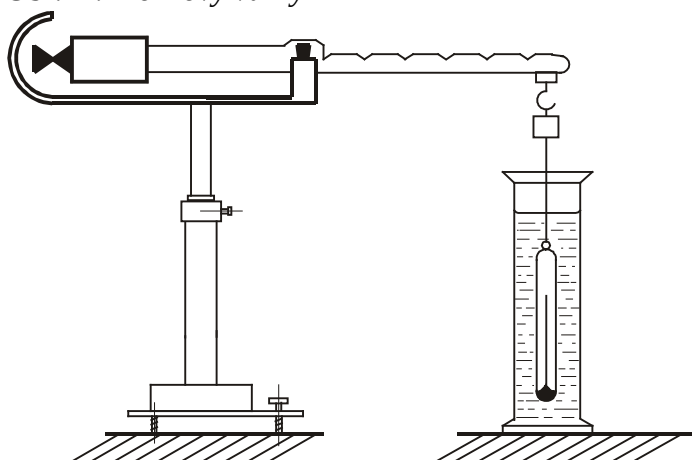
Viskozitu srovnávací kapaliny vyhledáme v tabulkách.

7.b Měření hustoty kapalin Mohrovými vážkami.

Pomůcky: Mohrovy vážky s příslušenstvím, kádinky, teploměr, měřené kapaliny

Měření hustoty kapalin Mohrovými-Westphalovými vážkami je založeno na metodě ponorného tělíska. Mohrovy vážky jsou nerovnoramenné pákové váhy.

Obr. 7 : Mohrovy vážky



Na konci delšího ramene je zavěšeno skleněné tělísko (obvykle je to teploměr, který umožní okamžité určení teploty zkoumané kapaliny), rameno od tělíska k ose je rozděleno na 10 dílků. Je-li tělísko zavěšeno, jsou váhy v rovnováze. Ponoříme-li tělísko do kapaliny, rovnováha se poruší, neboť na tělísko působí vztlačová síla, jejíž velikost je přímo úměrná hustotě kapaliny. Rovnováhu obnovíme pomocí jezdců, které klademe na rozdělené rameno. Hmotnost jezdců je volena tak, že ponoříme-li tělísko do destilované vody o teplotě 4 °C, vyrovná se vztlačová síla největším jezdcem, zavěšeným přímo nad tělísko (10. dílek). Hmotnost jezdce je tedy rovna hmotnosti destilované vody (o teplotě 4 °C) stejného objemu, jako je objem tělíska. Hustota vody při této teplotě je $\rho_1 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$. Vyrovnáme-li při ponoření tělíska do jiné kapaliny vztlačovou sílu zavěšením jezdce na n-tý dílek ramene, je hustota této kapaliny $\rho = n.100 \text{ kg.m}^{-3}$. K pohodlnému a přesnějšímu vyvažování slouží další dva jezdcí, jejichž hmotnost je 10krát a 100krát menší než hmotnost základního jezdce. Hustotu kapaliny můžeme určit s přesností 1 kg.m^{-3} .

Postup měření:

Váhy vyjmeme ze skříňky a jejich podstavec zasuneme do bajonetového držáku na horní desce skříňky. Nasadíme vahadlo a na jeho delší rameno zavěsíme skleněné tělísko. Stavěcím šroubem nastavíme nulovou polohu. Tělísko ponoříme do měřené kapaliny tak, aby bylo zcela ponořeno a nedotýkalo se stěn nádoby. Pomocí jezdců obnovíme rovnováhu a zapíšeme hustotu ρ kapaliny. Změříme teplotu kapaliny.

Při přesnějším měření je třeba provést kontrolu Mohrových vážek. Tuto kontrolu provedeme změřením hustoty destilované vody. Je-li při ponoření tělíska do destilované vody změřena její hustota ρ_1' , pak vážky jsou správné, shoduje-li se tato hustota s hodnotou udávanou pro danou teplotu tabulkami. Jestliže se hustota ρ_1' liší od správné hustoty ρ_1 , vypočteme správnou hustotu ρ měřené kapaliny ze vztahu $\rho = \frac{\rho_1}{\rho'} \rho'$. Při měření se nesmí teplota zkoumané kapaliny lišit od teploty vody více než o 4 °C, jinak by se projevila změna objemu tělíska.

7.c Měření teplotní závislosti viskozity kapalin Englerovým viskozimetrem.

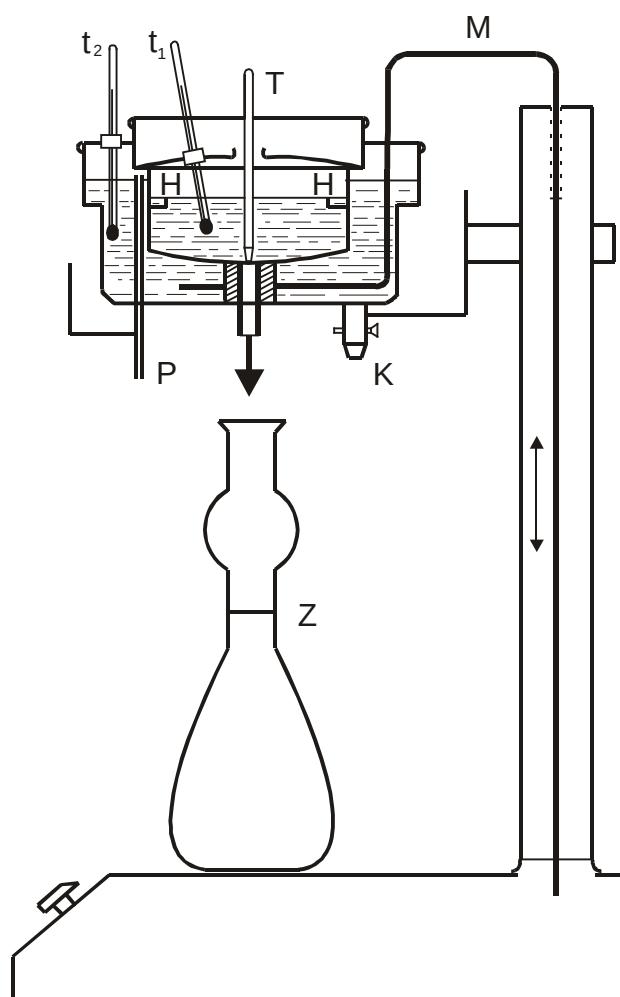
Pomůcky: Englerův viskozimetr, destilovaná voda, měřená kapalina(směs glycerínu a vody), teploměry, stopky

Englerův viskozimetr patří mezi výtokové viskozimetry a v praxi se velmi často používá pro měření kinematické viskozity olejů nebo jiných kapalin s velkou viskozitou. Englerovým viskozimetrem určíme kinematickou viskozitu kapaliny v Englerových stupních jako poměr doby T výtoku zkoumané kapaliny k době výtoku T_0 stejného objemu (200 cm³) destilované vody teploty 20 °C, $E = T/T_0$.

Na jednotky soustavy SI ji převedeme buď pomocí tabulek nebo výpočtem podle Vogelova vztahu. Při viskozitách větších než 7 °E můžeme použít přibližného vztahu

$$\nu = \frac{E}{10^6} \cdot 7,6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Obr. 8: Englerův viskozimetr



Základní součástí Englerova viskozimetru je nádobka uvnitř pozlacená, v jejímž dnu je výtoková trubice délky 20 mm; trubice má mírně kuželový tvar a její vnitřní průměr se zužuje z 2,9 mm na 2,8 mm. Trubice je shora uzavřena dřevěnou tyčinkou T. Nádobka je obklopena lázní, kterou lze elektrickým topením zahřát na žádanou teplotu. Kapalinu, jejíž viskozitu měříme, nalijeme do vnitřní nádoby tak, aby její hladina dosahovala ke třem hrotům, které jsou umístěny na stěnách nádoby. Vnitřní nádoba je opatřena teploměrem t_1 , pro měření teploty lázně slouží teploměr t_2 . Lázeň je promíchávána míchačkou. Výška hladiny lázně je omezena přepadovou trubicí, kapalinu z lázně vypouštíme kohoutem na spodu nádoby. K viskozimetru přísluší Englerova baňka, na níž je měřený objem vyznačen ryskou. Englerovým viskozimetrem budeme měřit závislost viskozity na teplotě. K měření je nutné vybrat kapalinu, jejíž viskozita je i při vyšších teplotách větší než viskozita destilované vody při teplotě 20°C , neboť doba výtoku kapaliny T musí být větší než doba T_0 výtoku vody.

Postup měření:

Po uzavření vypouštěcího kohoutu nalijeme do vnější nádoby vodu asi 1 cm pod okraj přepadové trubice. Otvor vnitřní nádoby uzavřeme dřevěnou tyčinkou a nalijeme do ní destilovanou vodu tak, aby její hladina procházela třemi hroty. Polohu viskozimetru korigujeme stavěcími šrouby. Vnitřní nádobu uzavřeme víkem a zasuneme teploměry t_1 a t_2 . Pomocí elektrického topení nastavíme teplotu lázně na 20°C a za stálého míchání vyčkáme,

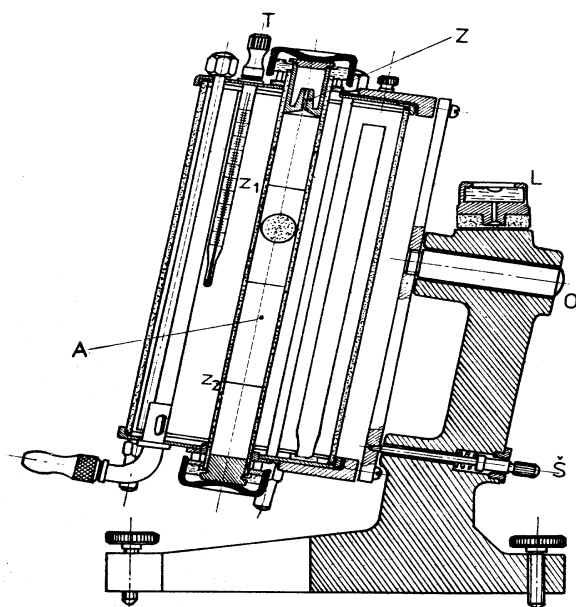
až se na tuto teplotu ohřeje voda ve vnitřní nádobce. Nyní otevřeme tyčinkou otvor ve dnu nádoby a současně spustíme stopky. Měříme dobu, za kterou nateče voda do Englerovy baňky po vyznačenou rysku. Tato doba má být 50 až 52s. Měření opakujeme třikrát a jako správnou hodnotu doby T_0 vezmeme aritmetický průměr těchto tří dob, zaokrouhlený na 0,1 s.

Vnitřní nádobku potom vysušíme a naplníme zkoumanou kapalinou. Měříme dobu výtoku zkoumané kapaliny nejdříve při teplotě 20 °C, pak teplotu postupně zvyšujeme po 5 °C. Teplota lázně a zkoumané kapaliny se nesmí vzájemně lišit o více než 0,5 °C. Teplotu zkoumané kapaliny odečítáme vždy na začátku měření, na změny teploty během výtoku kapaliny nebereme zřetel. Měření provedeme pro nejméně pět různých teplot, pro každou teplotu změříme dobu výtoku T , vypočteme viskozitu v Englerových stupních a převedeme na jednotky $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Sestavíme tabulku a sestojíme graf závislosti viskozity na teplotě kapaliny.

7.d Měření viskozity kapalin Höpplerovým viskozimetrem.

Pomůcky: Höpplerův viskozimetr, termostat, stopky, teploměr

Obr. 9: Höpplerův viskozimetr



Höpplerův viskozimetr patří mezi nejpřesnější viskozimetry. Je to tělíkový viskozimetr, není však založen na Stokesově zákonu. Hlavní částí tohoto přístroje je skleněná válcová trubice, na vnitřní ploše broušená, která svírá se svislým směrem úhel 10°. Trubice je naplněna zkoumanou kapalinou a uzavřena dutou zátkou. Trubice je obklopena vodní lázní s elektrickým ohřevem (možnost propojení na termostat). Přístroj nastavujeme do správné polohy stavěcími šrouby pomocí libely. Měření viskozity spočívá v měření doby pádu skleněné nebo kovové kuličky mezi dvěma značkami z_1 a z_2 na broušené trubici. Dynamickou viskozitu zkoumané kapaliny počítáme podle jednoduchého vztahu

$$\eta = \tau(\rho_1 - \rho_2) K \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

kde τ je změřená doba pádu, ρ_1 je hustota kuličky, ρ_2 je hustota zkoumané kapaliny, K je tzv. konstanta kuličky.

K přístroji je dodávána sada kuliček, jejichž hustoty ρ_1 a konstanty K (v jednotkách $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) jsou pro daný přístroj uvedeny ve zkušebním listě. Ve zkušebním listě dodávaném s přístrojem je rovněž uvedeno, jaká může být minimální doba pádu dané kuličky mezi značkami v trubici; při rychlejším pohybu by již proudění kapaliny kolem kuličky nebylo laminární. U jednotlivých kuliček je rovněž uveden rozsah viskozit, pro něž je kulička vhodná.

Postup měření:

Vybereme kuličku podle předem odhadnuté viskozity zkoumané kapaliny. Vnitřní trubici viskozimetru naplníme zkoumanou kapalinou., vložíme do ní kuličku a trubici uzavřeme. Přebytká kapalina vyteče otvorem v zátce. V trubici nesmí být vzduchové bublinky. Nyní připojíme vodní lázeň k termostatu. Stavěcími šrouby ustavíme viskozimetr do správné polohy. Zvolenou teplotu pro měření nastavíme na termostatu. Vodní lázeň musíme udržovat na zvolené teplotě několik minut, aby se prohřála kapalina i ve vnitřní trubici. Kapalinu ve vnitřní trubici promícháváme pomocí kuličky; uvolníme-li polohovací šroub, můžeme celým přístrojem otočit kolem osy a kulička se tedy může v trubici pohybovat oběma směry. Při promíchávání současně kontrolujeme, zda doba pádu kuličky mezi značkami není menší než minimální dovolená doba. Teplotu ve vnitřní trubici kontrolujeme rovněž pomocí doby pádu kuličky: při ustálení teploty je doba pádu konstantní. Při vlastním měření doby τ zachytíme přístroj šroubem v pevné poloze a vypneme termostat, aby nedocházelo k otřesům. Pro danou teplotu měříme dobu pádu kuličky pětkrát a vypočteme nejistotu měření. Potom teplotu zvyšujeme asi po 5ti stupních, pro každou teplotu měříme dobu pádu kuličky alespoň dvakrát. Sestrojíme graf závislosti viskozity na teplotě. Hustotu ρ_2 stanovíme některou z metod měření hustoty nebo vyhledáme v tabulkách. Hustota musí být stanovena velmi přesně, jinak bychom znehodnotili jinak přesné měření.

Charakteristika kuliček:

č.	hmotnost (g)	hustota při 20 °C (g.cm ⁻³)	kuličková konstanta K (mPa.s.cm ³ .g ⁻¹)	rozsah měření viskozity (mPa.s)	minimální doba pádu (s)
1	4,6028	2,227	0,019402	0,6-5	60
2	4,45151	2,225	0,073394	3-30	30
3	16,0565	8,143	0,128775	25-250	30
4	14,3948	8,138	1,18675	250-2500	30
5	9,9068	7,694	10,5025	2500-25000	30

Pro měření bude zařízení připraveno. Budete měřit teplotní závislost viskozity čistého glycerínu v intervalu 20 - 45 °C.

Upozornění:

Náplň viskozimetru nevyměňujte !!! Viskozimetr nerozšroubávejte, nevyjímejte kuličku !

Konkrétní provedení:

- A.** Viskozimetr postavte na místo měření a pomocí libely upravte vodorovnou polohu.
- B.** Změřte několikrát (alespoň 3x) viskozitu při teplotě místnosti (bez zapnutého termostatu). Dobu pádu odměřujte přesně na stopkách. Při otáčení viskozimetru dejte pozor na zamotání hadic!
- C.** Zapněte oběhový termostat na č. 3 a pomocí vertexu nastavte vypínací teplotu cca 25 °C. Povolte horní zátku měřicí trubice viskozimetru, aby nedošlo uvnitř ke zvýšení tlaku. Vyčkejte na ustálení teploty (červená kontrolka termostatu nesvítí) a lehce utáhněte horní zátku viskozimetru. Odečtěte na teploměru v termostatu přesnou hodnotu teploty měření a znovu minimálně 3x změřte dobu pádu kuličky mezi krajními ryskami.
- D.** Bod 3 opakujte pro teploty 30,35,40 a 45 °C.

Pro výpočet použijte následující údaje:

hustota glycerínu při 20 °C : $\rho_{20} = 1260 \text{ kg.m}^{-3}$

součinitel objemové roztažnosti glycerínu $\gamma = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

hustota glycerínu při teplotě T : $\rho_T = \rho_{20} (1 - \gamma(T - 20 \text{ °C}))$

použitá kulička č. 4

Pro každou průměrnou hodnotu vypočtete směrodatnou odchylku výběru (SE- standard error) a závislost včetně znázornění SE (svíslá úsečka nahoru a dolů od naměřeného průměru) vyneste do grafu jako závislost viskozity na teplotě.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{n(n-1)}}, \text{ kde } n \dots \text{počet měření}$$

x_i naměřená hodnota

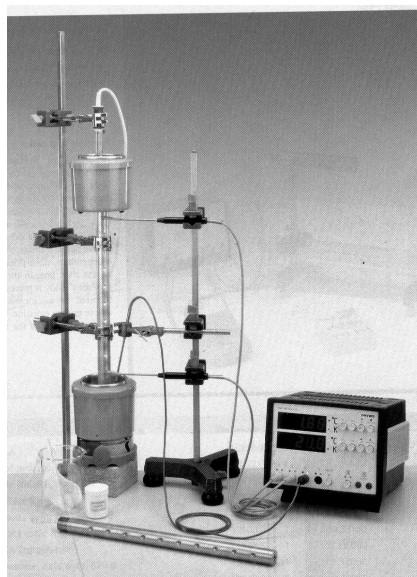
x aritmetický průměr hodnot

8. Vedení tepla – určení teplotního gradientu, určení λ

Nejprve je třeba určit tepelnou kapacitu kalorimetru směšovací metodou. Viz. skriptum str. 17. Měřit začínáme od teploty 0 °C, ve vodě by neměly být žádné kostky ledu, měření trvá asi 30 minut.

Sestavíme aparaturu. Dbáme na správný kontakt tyče a kalorimetru. Vodu zahříváme v horním kalorimetru a udržujeme ji stále na bodu varu. Teplotu vody ve spodním kalorimetru udržujeme na hodnotě 0 °C, neustále promícháváme. Když dosáhneme konstantního teplotního gradientu, vyjme z dolního kalorimetru led a měříme teplotu v tyči.

Obr. 10: Měření koeficientu λ



Teorie:

Konduktce tepla v tyči, jejíž konce jsou udržovány na nestejně teplotě, je dána vztahem $\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$, kde λ je koeficient tepelné vodivosti, S je průřez tyče, $\frac{\partial T}{\partial x}$ je teplotní gradient. Rozložení teploty závisí na místě a čase podle rovnice $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, kde ρ je hustota materiálu, c je měrná tepelná kapacita.

Jsou-li dva konce kovové tyče délky l udržovány na dvou rozdílných teplotách T_1 a T_2 , potom ve stacionárním stavu je

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0. \text{ Máme } T(x) = \frac{T_2 - T_1}{l} \cdot x + T_1.$$

Energetický příspěvek okolí a od tepelného zdroje je počítán pomocí růstu teploty $\Delta \vartheta$ studené vody v kalorimetru $\Delta Q = (c_v \cdot m_v + C) \cdot \Delta \vartheta$, $\Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_o$, kde index o označuje teplotu v čase T

$$= 0. \text{ Množství tepla určíme jako } \frac{dQ_{\text{tyče}}}{dt} = \frac{dQ_{\text{celk}}}{dt} - \frac{dQ_{\text{okolí}}}{dt}.$$

Pokyny pro měření:

- Do spodního kalorimetru dávejte vždy ledovou vodu, vodu v horním kalorimetru udržujte na bodu varu.
- Od počátku varu vyčkejte asi 5 minut a potom změřte teploty T_1 až T_{10} na deseti místech na tyči. Vyneste závislost teploty na místě měření. Naměřené body by měly přibližně ležet na přímce. Jestliže tomu tak není, nebylo dosud dosaženo stacionárního stavu a měření je třeba opakovat.
- Změřte vzdálenost l obou krajních míst měření.
- Změřte kolmý průřez tyče A .
- Ze spodního kalorimetru vyjměte kousky ledu. Za stálého míchání měřte nárůst teploty ΔT ve spodním kalorimetru za pevně zvolený časový interval (např. po 3 minutách) Δt . Pokus ukončete vypnutím ponorného vaříče. Určete hmotnost m vody ve spodním kalorimetru.

Vyhodnocení:

1. Z naměřených hodnot vypočítejte teplotní gradient $grad(T) = \frac{T_{10} - T_1}{l}$
2. Vypočítejte tok tepla, který prochází kolmým řezem A tyče pomocí odměřeného zvýšení teploty ΔT ve spodním kalorimetru za dobu Δt , pomocí vztahu $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(c \cdot m + C) \cdot \Delta T}{\Delta t}$, kde c je měrná tepelná kapacita vody $c = 4,19 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, hmotnost m vody určíme vážením. C je tepelná kapacita kalorimetru, kterou určíme na počátku měření. Při malých nárocích na přesnost měření ji můžeme dokonce zanedbat.

3. Koeficient tepelné vodivosti λ určíme podle vztahu $\lambda = \frac{\frac{\Delta Q}{\Delta t}}{A \cdot grad(T)}$

9. Hagen-Poiseuilleův zákon, Reynoldsovo číslo

Laminární proudění trubicemi popisuje Hagen-Poiseuilleův zákon (aplikace krevní oběh, vodovodní potrubí). Zákon lze zapsat ve tvaru

$$I = \frac{\Delta p \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot l \cdot \eta}, \text{ kde } I \text{ je velikost proudu (v m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{), } \Delta p \text{ je rozdíl tlaků (v Pa), } r \text{ je vnitřní}$$

poloměr trubice (kapiláry) (v m), l je délka trubice (v m), η je viskozita (v Pa.s).

Proudění tekutiny v trubici je způsobeno rozdílem tlaků na obou jejích koncích. Křivka vyjadřující závislost proteklého objemu na rozdílu tlaků je určena vlastnostmi tekutiny a profilem trubice. Při pomalém toku (malý objem) je proudění laminární, při rychlém proudění se stává turbulentním. Rychlost toku narůstá směrem ke středu trubice. Je-li konečné střížné napětí τ úměrné gradientu rychlosti dv/dx , hovoříme o Newtonovské tekutině

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \text{ kde konstanta úměrnosti } \eta \text{ je tzv. viskozita (v daném případě ji považujeme za}$$

konstantní, i když závisí na teplotě a mnoha jiných faktorech). Při vyšších rychlostech se stává proudění vody turbulentní. Ideální Newtonovskou kapalinou je glycerol, má však velkou viskozitu, proto je výhodné používat při pokusech směs vody a glycerolu.

Předpokládejme válec tekutiny o poloměru ρ v trubici o poloměru r a délky l . Při ustáleném proudění je síla F vyvolaná rozdílem tlaků $\Delta p = p_2 - p_1$, neboli $F_p = \pi \rho^2 \Delta p$ v rovnováze se silou působící nad válcem jako důsledek střížného napětí $F_\tau = 2\pi \rho \cdot l \cdot \tau = 2\pi \rho \cdot l \cdot \eta \cdot \frac{dv}{dx}$.

Porovnáním obou vztahů máme

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\rho \Delta p}{2\eta l}.$$

Integrací a po dosazení hraniční podmínky $v(r) = 0$ dostáváme rozdělení rychlosti na kolmém průřezu trubice

$$v(\rho) = \frac{r^2 - \rho^2}{4\eta} \frac{\Delta p}{l}.$$

Objem kapaliny, která proteče trubicí za čas t je roven

$$V = \int_0^r v(\rho) \cdot t \cdot 2\pi\rho \, d\rho = \frac{\pi \Delta p r^4}{8\eta l} t.$$

Odtud Hagen-Poiseuilleův zákon $V = \frac{\pi \Delta p}{8\eta l} r^4 t$.

Výška vody h určuje rozdíl tlaků v kapiláře $\Delta p = \rho_l \cdot g \cdot h$, kde ρ_l je hustota kapaliny a g gravitační zrychlení. Z grafu závislosti objemu V (v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) na tlaku lze vyčíst, zda je proudění

laminární či turbulentní. Pro laminární proudění platí pro odpor $R = \frac{\Delta p}{V} = \frac{8\eta l}{\pi r^4} = \text{konst.}$ U

laminárního proudění, kdy je odpor konstantní, se chová stejně jako ohmický odpor (paralelní a sériové spojování odporů). Spojíme-li dvě kapiláry o poloměrech r_1 a r_2 do série, objemový tok V je v obou stejný a proudový odpor R_1 a R_2 se sčítá $R_c = R_1 + R_2$. Pro praktická měření musí být poloměry kapilár přibližně stejné, neboť při větším rozdílu bude u širší kapiláry odpor jen ztěžší měřitelný kvůli závislosti r^4 .

Spojíme-li dvě kapiláry paralelně, bude pro celkový objemový tok platit $V = V_1 + V_2$ a pro

celkový odpor máme

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

9.a Ověření Hagen-Poiseuilleova zákona

Pomůcky: nádoba s výtokovým otvorem, kapiláry, spojovací hadice, destilovaná voda, laboratorní váhy, kádinka, posuvné měřítko, teploměr

Postup měření:

1. Změřte objemový průtok kapaliny jako funkci rozdílu tlaků, přičemž použijete kapiláry o různém vnitřním průměru. Kapilára je uchycena ve vodorovné poloze, rozdíl tlaků podél kapiláry je určen pomocí výšky kapalinového sloupce. Objemový průtok určujeme pro různé výšky nádoby s kapalinou a zvážení množství vyteké kapaliny za krátký časový interval. Hladina kapaliny v nádobě se snižuje, tím je do měření vnášena systematická chyba. Pro malá množství vytékající kapaliny ji však můžeme zanedbat. Pokud není možno měnit výšku nádoby s vytékající kapalinou, měníme výšku kapiláry.
2. Určete viskozitu roztoku voda-glycerín při využití lineární části charakteristické křivky závislosti
3. Určete proudový odpor kapilár spojených sériově a paralelně.

V bodech 2 a 3 postupujeme obdobně jako v bodě 1.

10. Molární tepla plynů

Teplo je transportováno k plynu ve skleněné nádobě prostřednictvím krátké proudové vlny v odporovém drátu. Měříme C_V popř. C_p pomocí změny tlaku popř. objemu.

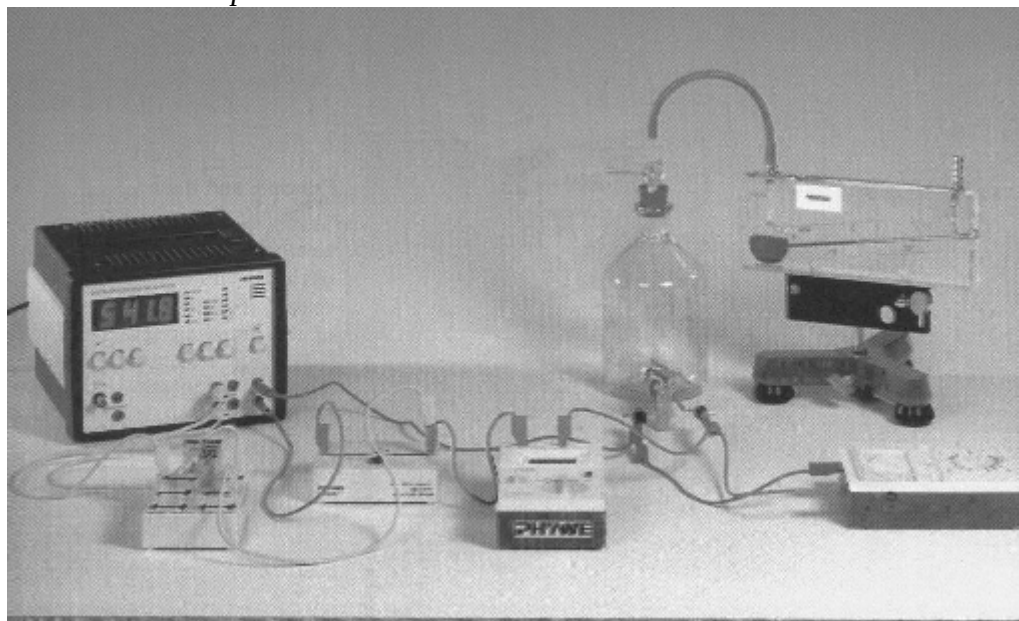
Sestavíme aparaturu, pro zahřívání používáme 2 chrom-niklové dráty o průměru 0,1 mm a délce asi 15 cm spojené paralelně (schéma osmičky prostřednictvím pomocného panelu). Používáme zdroj o napětí 5 V.

Časový indikátor spustíme při zapnutí systému zahřívání. Proudová vlna musí být co nejkratší (méně než 0,5 s). Současně měříme proud a napětí při zahřívání.

Přesný manometr připojíme k nádobě s plynem a určíme C_V . Pro určení C_p měříme změnu objemu vzduchu ve stříkačce. Před prvním měřením je třeba stříkačku vyčistit pomocí alkoholu a vysušit.

Stříkačku upevníme do stojanu směrem svisle dolů, abychom minimalizovali statické tření. Abychom udrželi píst v určité poloze, vytvoříme malý tlak pomocí druhé stříkačky. Lze také použít jen jednu stříkačku a potřebný podtlak vytvořit opakovaným posouváním pístu a prací s regulačními trojcestnými ventily. Vyvažovací elektrodu ve tvaru destičky připevníme k pístu pomocí oboustranné lepicí pásky. Pootočením elektrody minimalizujeme tření mezi pístem a stěnami stříkačky. Na barometru odečteme barometrický tlak, jehož hodnotu opravíme (zmenšíme) o korekci 14 hPa.

Obr. 11: Měřicí aparatura



Teorie

Molární tepelná kapacita látky je definována pomocí vztahu $C = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$, kde n je počet molů.

Rozlišujeme tepelnou kapacitu při stálém objemu a při stálém tlaku. Z I. věty termodynamiky $dQ = dU_i + pdV$, kde U_i je vnitřní energie, platí

$$C_V = \frac{1}{n} \frac{dU_i}{dT}$$

$$C_p = \frac{1}{n} \left(\frac{dU_i}{dT} + p \frac{dV}{dT} \right)$$

Použijeme-li stavovou rovnici ideálního plynu $pV = nRT$ dostaneme, že pro všechny plyny platí $C_p - C_V = R$.

Z uvedených vztahů plyne, že C_V závisí pouze na změně vnitřní energie, kterou lze vypočítat pomocí počtu i stupňů volnosti molekuly v souladu s kinetickou energií $U_i = \frac{1}{2} i k A T n$, kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta a $A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ je Avogadrova konstanta.

Po dosazení $R = k \cdot A$ dostaneme $C_V = \frac{i}{2} R$ a $C_p = \frac{i+2}{2} R$. Počet stupňů volnosti molekuly je dán její strukturou.

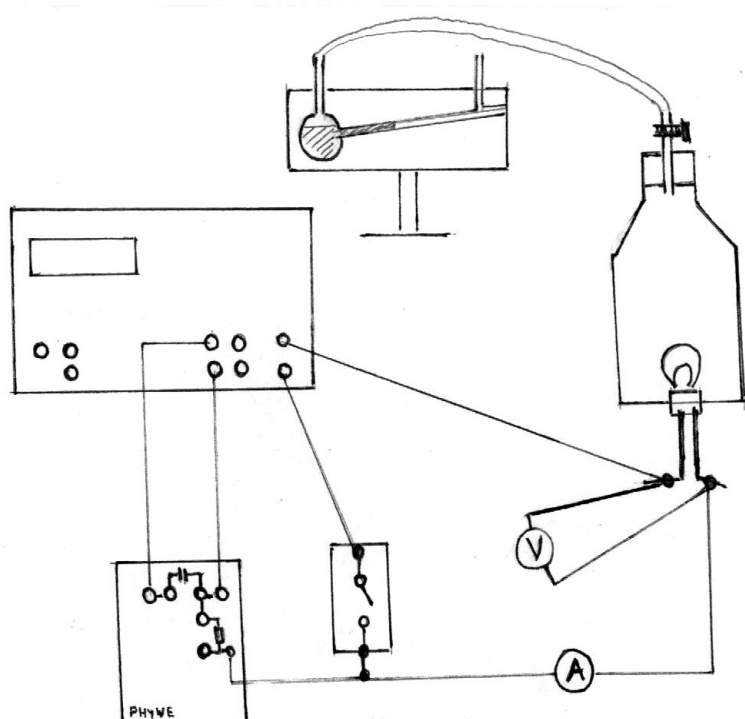
Všechny atomy nebo molekuly v plynu mají tři translační stupně volnosti. Dvouatomové molekuly mají navíc dva rotační stupně volnosti pro dvě osy s největším momentem setrvačnosti, tříatomové molekuly mají tři rotační stupně volnosti. Vzduch je tvořen z asi 20% kyslíkem a 80% dusíkem. Proto $i_{\text{vzduchu}} = 5$, $C_V = 2,5 R = 20,8 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, $C_p = 3,5 R = 29,1 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

10.a Určení C_V, C_p

Určení C_V :

Aparaturu zapojíme podle naznačeného schématu. (obr. 12)

Obr. 12: Schéma zapojení



Nárůst teploty ΔT vede ke zvýšení tlaku Δp za konstantního objemu. K nepatrné změně objemu dojde během odečítání tlaku, což musí být zahrnuto do výpočtu. Ze stavové rovnice ideálního plynu dostáváme pro naše měření

$$\Delta T = \frac{p}{nR} \Delta V + \frac{V}{nR} \Delta p = \frac{T}{pV} (p \Delta V + V \Delta p)$$

$$C_p = \frac{pV}{nT} \frac{UI \Delta t - p \Delta V}{p \Delta V + V \Delta p}$$

Stoupající tlaková trubice má poloměr $r = 2$ mm. Změna výšky $\Delta l = 1$ cm odpovídá změně tlaku $\Delta p = 0,147$ hPa, takže $\Delta V = a \Delta p$, $a = \frac{\pi r^2}{0,147} \text{ hPa} \cdot \text{cm}^{-1} = 0,855 \text{ cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1}$. Odtud

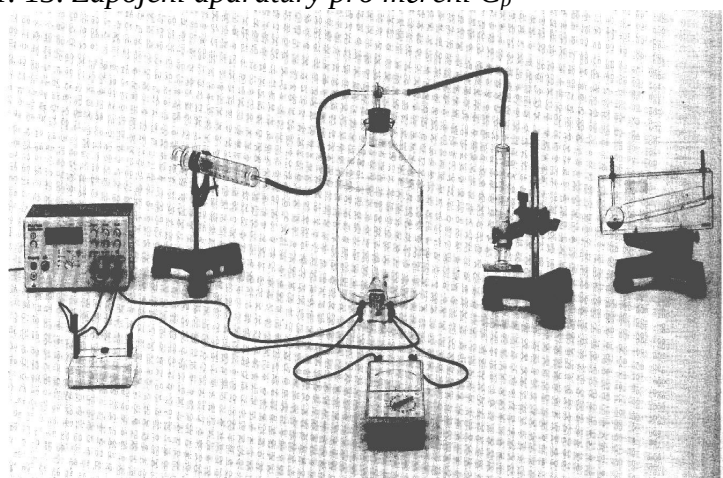
$$C_v = \frac{pV}{nT} \frac{UI \Delta t - ap \Delta p}{(ap + V) \Delta p} = \frac{p_o V_o}{T_o} \left[\frac{UI \Delta t}{(ap + V) \Delta p} - \frac{ap}{ap + V} \right].$$

Objem skleněné nádoby, kterou používáme pro měření, je 5,5 litru.

Měření C_p :

Aparaturu pro měření upravíme tak, že místo přesného manometru připojíme k láhvi přes trojcestný ventil dvojici injekčních stříkaček (nebo jen stříkačku 1, v tomto případě necháme ventil v hrdlu láhve jako v případě 1). Jedna je vodorovná s podložkou, druhá kolmá k podložce (viz. obr. 13.).

Obr. 13: Zapojení aparatury pro měření C_p



Energie předaná plynu je $\Delta Q = U \cdot I \cdot \Delta t$. Nárůst teploty ΔT vede ke zvětšení objemu ΔV za konstantního tlaku p . Ze stavové rovnice ideálního plynu dostaneme $\Delta V = \frac{nR}{p} \Delta T = \frac{V}{T} \Delta T$ a

$$\text{dále } C_p = \frac{1}{n} \frac{VUI \Delta t}{T \Delta V}.$$

Objem V_o jednoho molu plynu za normálního tlaku $p_o = 1013$ hPa a $T_o = 273,2$ K je $V_o = 22,144 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$. Odchylky tlaku p od normálního tlaku p_o a teploty T od normální teploty T_o jsou třeba určit pro výpočet správné hodnoty molárního objemu $V_{mol} = \frac{p_o T}{p T_o} V_o$. Počet molů

v objemu V je potom $n = \frac{V}{V_{mol}}$. Po dosazení dostáváme $C_p = \frac{p_o V_o}{T_o} \frac{UI}{p} \frac{\Delta t}{\Delta V}$, kde p = atmosférický tlak (tlak pístu ve stříkačce).

Např. lze nastavit zařízení tak, že hodnota napětí $U = 4,9$ V, proudu $I = 0,41$ A, $p = 1000$ hPa – 14 hPa. Výsledky měření vyneseme do grafu závislosti změny objemu ΔV na době zahřívání Δt a vypočítáme hodnotu C_p .

Hodnoty C_p a C_v získané měřením jsou o málo větší než vychází na základě teoretických výpočtů. Rozdíl molárních kapacit dává hodnotu $R = C_p - C_v$.

Měření s digitálním čítačem:

Zařízení je schopno měřit čas, frekvenci, počet impulsů. K dispozici je přímý kontakt pro připojení Geiger-Müllerova počítáče. Stopky lze ovládat i ručně a použít je k měření mezičasů. Stopky mohou být ovládány pomocí elektrických kontaktů nebo optickou závorou (různý typ triggerů).

Přístroj je připraven k měření asi 1 sekundu po zapnutí. Nachází se ve funkci „TIME“ (ruční stopky). Na displeji se objeví údaj 0,000 a jednotka 's'.

Ovládací prvky:

START - zahájení měření všech typů

STOP – ukončení měření. Při zapnutí čítače nebo při změně činnosti je automaticky volen stav „STOP“

RESET – ukazatel je nastaven na nulu. Toto tlačítko použijeme vždy, je-li překročen měřicí rozsah (zobrazí se „----“)

BNC zdířka – přímé zapojení trubice Geiger – Müllerova počítáče

Dvojice zdířek EINGANG/INPUT – pro přivedení analyzovaných elektrických signálů, napěťový rozsah $U_{ss} = 0,1 \dots 10$ V (v rozsahu frekvencí < 100 Hz 1 V min), rozsah frekvencí $f = 0,1$ Hz ... 1 Mhz

DISPLAY - při stisknutí tlačítka je právě změřený údaj uložen aniž by bylo přerušeno právě probíhající měření. Opětovné stisknutí tlačítka obnoví aktuální měřený údaj. Kromě toho lze pomocí tohoto tlačítka před a po měření manuálně nastavit rozsah a ostatní funkce. Použijeme-li tlačítko ke změně rozsahu, nově zobrazený údaj je zaokrouhlen.

FUNKTION – pro výběr druhu měření. Aktuální druh měření je indikován svítící diodou.

TRIGGER – volba druhu ovládání pro časovač

Dvojice zdířek START/STOP – pro start popř. start a stop časovače. Ovládání je pomocí TTL impulsů (např. světelné závory) nebo sepnutím a rozpojením kontaktů.

Dvojice zdířek STOP – zastavení časovače, jestliže byl spuštěn spínacím obvodem zapojeným do zdířek 9

Dvojice zdířek 5V/1A – zdroj stejnosměrného napětí pro napájení TTL přístrojů (světelných závor apod.).

Reproduktor – zapnutí a vypnutí vestavěného reproduktoru

Digitální ukazatel – 4místný LED displej

Měření času

Závorou ovládané stopky (TIMER) – pro aktivaci funkce TIMER opakovaně stiskneme tlačítko FUNKTION až svítící dioda indikuje nastavení této funkce. Tlačítkem TRIGGER zvolíme podmínky spouštění – rozsvítí se červená dioda. Schémata odpovídají vstupujícím informacím z obvodů zapojených k 9 a 10. V prvních čtyřech případech není třeba připojovat

světelnou závoru a timer lze ovládat otevřením a uzavřením oddělených spínacích obvodů nebo uzavřením kontaktního můstku. TIMER představuje aditivní stopky – měřené časy jsou kontinuálně sčítány.

Realizace měření času :

- připojení řídicího obvodu ke zdírkám START/STOP popř. STOP
- aktivizace TIMER pomocí tlačítka FUNKTION
- nastavení spouštění tlačítkem TRIGGER
- tlačítkem DISPLAY nastavit rozsah (ms nebo s)
- nastavit pohotovost pro měření stisknutím START (1) – svítí START-LED
- v okamžiku kdy nastane zvolený způsob spouštění, začíná měření

Při běžícím měření mají tlačítka 2, 3, 6 následující význam:

STOP: měření je přerušeno, aktuálně změřený čas je na displeji

START: bylo-li měření ukončeno tlačítkem STOP nebo podmínkou TRIGGER, je měřidlo tlačítkem START uvedeno znovu do pohotovosti. Je-li dosaženo podmínky pro spouštění (TRIGGER), začíná nové měření od hodnoty zobrazené na displeji.

DISPLAY: aktuální údaj na displeji je zmrazen, START-LED bliká, na pozadí měření pokračuje dokud není ukončeno STOP tlačítkem nebo podmínkou triggeru. V tomto případě zůstává zmrazený údaj zachován, TOR/GATE-LED pohasne. Nové stlačení DISPLAY zobrazí ukáže hodnotu, která byla naměřena při ukončení měření.

RESET: ukazatel je nastaven na nulu. Před novým měřením je třeba stisknout RESET znovu jen tehdy, nemá-li být prováděno aditivní měření.

Ruční stopky (TIME)

Po zapnutí přístroje je aktivována právě tato činnost. Stopky se ovládají tlačítka 1, 2, 3, 6. Stopky zapneme tlačítkem START (1), svítící diody nad tímto tlačítkem na TOR/GATE-LED ukazují, že stopky běží. Při běžících hodinách mají tlačítka 2, 3, 6 tuto funkci:

STOP: hodiny se zastaví, čas lze odečíst na displeji, diody START a TOR/GATE zhasnou. Jestliže zmáčkne STOP pokud je aktivní funkce hold (tlačítko DISPLAY), zhasne jen TOR/GATE-LED, zatímco START-LED bliká a ukazuje, že momentálně viditelný údaj je ten, který byl předtím zmrazen. Stlačení DISPLAY obnoví údaj, který byl aktuální při stisknutí tlačítka STOP. START-LED zhasne.

DISPLAY: mezičas z doby stisknutí tlačítka je zobrazen na displeji, hodiny běží dále, svítí dioda TOR/GATE. START-LED bliká, protože je aktivní funkce hold. Opětovné stisknutí DISPLAY obnoví aktuální běžící časový údaj na displeji.

RESET: ukazatel je nastaven na nulu a hodiny zastaveny

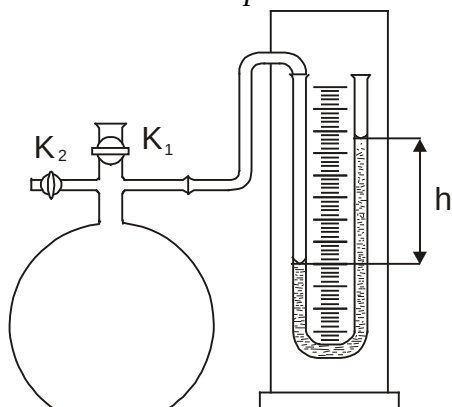
Hodiny pracují v aditivním režimu, tzn. po startu tlačítkem (1) běží čas od údaje na displeji. Je-li to nutné, je třeba tlačítkem (3) údaj nejprve vynulovat.

Nastavení rozsahu: Při zapnutí čítače je měřicí rozsah 0,000 až 9,999 s. Při překročení této hodnoty dojde automaticky k přepnutí na rozsah 0,00 ... 99,99 s atd. S pomocí tlačítka DISPLAY lze před měřením rozsah nastavit ručně.

10.b Měření Poissonovy konstanty metodou Clémenta-Desormese

Pomůcky: aparatura pro měření Poissonovy konstanty, manometr, gumový balónek

Obr. 14: Zařízení pro měření Poissonovy konstanty



Metoda vychází z adiabatického děje v plynu. Pro měření je použito zařízení podle obr. 14, které je tvořeno velkou skleněnou nádobou (10 až 30 litrů) opatřenou dvěma kohouty a spojenou s vodním manometrem. Je-li kohout K_1 otevřen, je tlak vzduchu v nádobě roven barometrickému tlaku – výška hladin v manometru je v obou ramenech stejná. Zvýšíme-li pomocí balónku připojenému ke kohoutu K_2 tlak v nádobě na hodnotu p_1 (kohout K_1 uzavřeme), bude rozdíl hladin v manometru h_1 . Tlak $p_1 = b + h_1 \rho g$, kde b je barometrický tlak a $h_1 \rho g$ je hydrostatický tlak vodního sloupce. Rozdíl hladin měříme při uzavřených kohoutech. Nyní rychle otevřeme a zavřeme kohout K_1 . Při otevření kohoutu klesne tlak v nádobě na barometrický tlak b , objem plynu se zvětší na V_2 . Předpokládáme, že děj je adiabatický (teploty se nestáčí vyrovnat), lze psát Poissonovu rovnici $p_1 V_1^\kappa = b V_2^\kappa$.

Při adiabatickém ději klesne teplota vzduchu v nádobě, která se však po určité době opět vyrovná s teplotou okolí, tlak se zvýší na hodnotu p_2 . Hladiny vody v manometru, které se při otevření kohoutu vyrovnaly, budou nyní ve vzdálenosti h_2 a tlak $p_2 = b + h_2 \rho g$. Dále platí $p_1 V_1 = p_2 V_2$, neboť teplota na začátku i na konci děje je stejná – děj izotermický. Úpravou

obou vztahů máme $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa = \frac{p_1}{b} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^\kappa$. Rovnici logaritmuje $\log p_1 - \log b = \kappa(\log p_1 -$

$\log p_2)$ a odtud vyjádříme Poissonovu konstantu $\kappa = \frac{\log p_1 - \log b}{\log p_1 - \log p_2}$. Jsou-li přetlaky $h_1 \rho g$,

$h_2 \rho g$ malé vzhledem k barometrickému tlaku, můžeme pro výpočet použít přibližného

vztahu $\kappa = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \left(1 + \frac{h_2 \rho g}{b}\right)$. Tento vztah lze použít do rozdílu hladin asi 30 cm.

Postup měření:

1. Připravíme si měřicí zařízení, kohout K_1 uzavřeme, K_2 otevřeme a pomocí gumového balónku zvýšíme tlak vzduchu v nádobě. Kohout K_2 uzavřeme.
2. Po vyrovnání teploty vzduchu s okolím odečteme rozdíl hladin h_1 ve vodním manometru.
3. Kohout K_1 rychle otevřeme a zavřeme – vzduch v nádobě se ochladil, hladiny v manometru jsou ve stejné výši. Teplota se vyrovnává s teplotou okolí – tlak roste, hladiny se rozestupují. Po ustálení hladin v manometru odečteme rozdíl hladin h_2 .
4. V tabulkách vyhledáme hustotu vody pro teplotu v laboratoři, na rtuťovém barometru odečteme tlak vzduchu.
5. Měření několikrát opakujeme a vždy vypočteme hodnotu Poissonovy konstanty κ :

U měření s největším rozdílem hladin h_1 použijeme pro výpočet Poissonovy konstanty oba vztahy (pomocí logaritmů i zjednodušený výraz). Pokud se oba výsledky od sebe liší jen v rámci pozorovacích chyb, lze používat zjednodušeného vztahu pro ostatní výpočty. V opačném případě je nutno pro všechny měření počítat pomocí logaritmů.

6. Vypočteme aritmetický průměr naměřených hodnot a střední nejistotu výsledku. Hodnota Poissonovy konstanty pro vzduch je 1,4. Naměřená hodnota bývá vlivem systematických chyb (děj není přesně adiabatický, netěsnost kohoutů apod.) menší.

ÚLOHY NÁHRADNÍ A VOLITELNÉ

11. Nernstův teorém, difúzní potenciál

Rozdíl potenciálů se objeví na rozhraní dvou roztoků o rozdílné koncentraci. Velikost závisí na poměru koncentrací a počtu procházejících kationtů a aniontů. Rozdíl potenciálů lze stanovit pro různé elektrolyty jako funkci poměru koncentrací přes membránu z celofánu nebo selektivní permeabilní membránu.

Úkoly:

1. Měření difúzního potenciálu jako funkce gradientu koncentrace elektrolytu pomocí celofánové membrány.
2. Měření potenciálu jako funkce gradientu koncentrace elektrolytu přes selektivní permeabilní membránu.
3. Určení počtu transportovaných částic.

Návod:

Je vhodné připravit si dostatečné množství zásobních roztoků (1 litr) , neboť množství roztoku potřebné pro jedno měření je 100 ml.

Roztoky:

0,1 N HCl - dejte 1 díl HCl do 1000 ml destilované vody.

0,01 N HCl - doplňte 100 ml 0,1 N HCl 1000 ml destilované vody

0,001 N HCl - doplňte 100 ml 0,01 N HCl 1000 ml destilované vody

1 N NaCl – rozpustíme 58,4 g NaCl v 1000 ml destilované vody
 1N KCl – rozpustíme 74,6 g KCl v 1000 ml destilované vody

Během pokusů uchovávejte referenční elektrody z chloridu stříbrného v kádince s roztokem 1 N KCl

1. Natáhněte navlhčenou celofánovou blánu přes otvor pokusné trubice bez závitů a nechte ji uschnout. Druhou část trubice nasadte nahoru, prostrčte šroubky přes blánu a obě části k sobě pevně přitáhněte. Proveďte následující měření:

0,05 N HCl a 0,02 N HCl

Dejte 50 ml resp. 20 ml 0,1 N HCl do 100 ml destilované vody.

0,005 N HCl a 0,002 N HCl

Doplňte 50 ml resp. 20 ml roztoku 0,01N HCl 100 ml destilované vody.

Obě části měřicí trubice pokud možno současně naplňte asi 90-100 ml uvedenými roztoky. Měřte asymetrický potenciál na elektrodách v kádince s 1 N KCl a hodnoty dosaďte do příslušného vztahu. Ponořte osušené elektrody do měřeného roztoku asi na 15 sekund a určete difúzní potenciál, použitím elektrody připojené k zemníci zdířce multimetru pro malé koncentrace. Vraťte elektrody do kádinky a zkontrolujte asymetrický potenciál. Obě měření dvakrát zopakujte v intervalu asi 2 minut. Změřte teplotu roztoků.

Když vyměníte měřené koncentrace, měřicí trubici nejprve propláchněte destilovanou vodou, pokud změníte ionty (výměna HCl za NaCl nebo KCl), vyměňte i celofánovou blánu.

První série měření je prováděna s HCl roztoky o různé koncentraci. Jedna strana obsahuje stále asi 100 ml 0,001 N HCl roztoku, na druhé straně postupně použijeme roztoky 0,1 N, 0,05 N, 0,02 N, 0,01 N, 0,005 N, 0,002 N – difúzní potenciál určujeme pro 6 rozdílů koncentrací.

Měříme difúzní potenciály NaCl a KCl jen pro jednu koncentraci, neboť potenciály jsou mnohem menší než pro HCl.

2. Vystříhnete přibližně kruhový tvar ($d = 6$ cm) permeabilní membrány pro kationty a umístěte ji na velký otvor jedné poloviny měřicí trubice. Druhou část trubice na ni položte a obě části pevně sešroubujte.

Měřené roztoky: 0,01 N KCl (1 ml 1 N KCl dáme do 100 ml destilované vody)
 0,001 N KCl (10 ml 0,01 N KCl do 100 ml)

Trubici naplňte měřeným roztokem - použijte přesně 90 ml roztoku 0,001 N. Umístěte magnetické míchadlo do části trubice, která obsahuje 0,001 N KCl.

Určete antisymetrické potenciály na elektrodách v kádince s 1 N KCl a srovnajte je s vypočítanou hodnotou. Osušené elektrody dejte do měřeného roztoku (zapojíme do zemníci zdířky 0,01 N KCl) a měříme membránový potenciál (několik minut počkáme, až se hodnota ustálí ≥ 50 mV).

Přidejte malá množství 1 N KCl (asi 5 porcí 0,1 ml, poté 3 porce 0,2 ml a nakonec 5 porcí 1 ml) do části trubice s magnetickou míchačkou pomocí pipety a míchejte magnetem asi 30 sekund.

Měřte membránový potenciál jako funkci koncentračního gradientu.. Opětovně ověřte asymetrii potenciálu.

Stejným způsobem lze měření provést pomocí NaCl nebo HCl. Pokud je látka vyměněna, musí být vložena nová membrána.

Používejte vždy membrány, které jsou propustné pro kationty v destilované vodě.

Teorie

Rozdíly potenciálů vznikají jak mezi kovovou elektrodou a roztokem a mezi dvěma roztoky, Potenciál na elektrodě: Chemický potenciál kovů nebo (kovových) iontů v roztoku je dán následující rovnicí

$$\text{Kov } \mu' = \mu^{\circ} + RT \ln a'$$

$$\text{Ionty } \mu = \mu^{\circ} + RT \ln a$$

kde μ° , μ' je standardní chemický potenciál, R univerzální plynová konstanta, T absolutní teplota, a aktivita kovu, a' aktivita iontů. Pro čisté kovy je $a = 1$. Aktivita iontů je určena pomocí koncentrace c : $a = f \cdot c$.

V tabulce 1 jsou uvedeny koeficienty aktivity f pro různé roztoky a koncentrace.

Proti transferu iontů z kovové mřížky do roztoku působí výsledný rozdíl potenciálů $\Delta\phi = \phi - \phi'$ mezi roztokem a kovem. Je-li v náboj iontů a F Faradayova konstanta, je pro

chemickou rovnováhu $\Delta\phi = \frac{\mu - \mu'}{v \cdot F}$ a po dosazení $\Delta\phi = \Delta\phi^{\circ} + \frac{R \cdot T}{v \cdot F} \ln \frac{a}{a'}$, kde

$$\Delta\phi^{\circ} = \frac{\mu^{\circ} - \mu'}{v \cdot F} \text{ je standardní potenciál pro } a' = 1 \text{ a } a = 1 \text{ mol/l.}$$

Rovnice pro $\Delta\phi$ je identická s Nernstovým teorémem, která obsahuje koncentraci c místo poměru a/a' .

Pouze rozdíl mezi dvěma potenciály na elektrodách může být změřen jako potenciál U .

$$U = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$$

$$\text{Pro } v_1 = v_2 \text{ a } a'_1 = a'_2 \text{ je } U = \Delta\phi_1^{\circ} - \Delta\phi_2^{\circ} + \frac{R \cdot T}{v \cdot F} \ln \frac{a_2}{a_1}.$$

V kádince s 1 N KCl musí být potenciál mezi chloridovanými stříbrnými elektrodami nulový (antisymetrický potenciál).

Difúzní potenciál

Jsou-li dva roztoky o různé koncentraci odděleny pórovitou stěnou nebo permeabilní membránou, difundují ionty z roztoku o větší koncentraci do méně koncentrovaného roztoku. Kationty a anionty elektrolytu mají většinou rozdílné rychlosti, rychlejší ionty difundují dříve, oddělení nábojů se projeví jako potenciálový rozdíl (difúzní potenciál), který brzdí rychlé ionty a urychluje pomalé.

Počet transportovaných iontů je vypočítán pomocí rychlosti kationtů a aniontů v_+ , v_- .

$$:t_{\pm} = \frac{v_+}{v_+ - v_-} \text{ a udává jaká část aniontů a kationtů se účastní proudového toku elektrolytem}$$

(viz tabulka 2). Ve všech případech $t_+ + t_- = 1$.

Difúzní potenciál se vypočítá podle podobného vztahu jako v předchozím případě. Pro elektrolyt s rozdílnými koncentracemi c_1 a c_2 , stejným chemickým standardním potenciálem

μ^0 na obou stranách přepážky a rozdílnými aktivitami a_1 a a_2 je difúzní potenciál

$$\Delta\phi_D = (t_- - t_+) \cdot \frac{RT}{vF} \ln \frac{a_2}{a_1}.$$

Znaménko potenciálu závisí na tom, které ionty mají vyšší rychlost. Pro membránu, která je permeabilní jen pro kationty je $t_- = 0$ a

$$\Delta\phi_D = -\frac{RT}{vF} \ln \frac{a_2}{a_1}$$

Pokud jsou počty kationtů a aniontů přibližně stejné (např. u KCl), vzniká jen malá difúzní potenciál. Takové roztoky používáme, abychom zabránili skokům potenciálů na měřicích elektrodách. Chloridované stříbrné elektrody jsou ponořeny do roztoku AgCl a 3 N KCl, dochází jen k nepatrným potenciálovým skokům na protilehlých stranách, takže potenciál měřený mezi elektrodami je stejný jako difúzní potenciál.

Jsou-li roztoky různých koncentrací odděleny celofánovou blanou, která je propustná jak pro kationty, tak i pro anionty, mění se poměr koncentrací a tím i difúzní potenciál působením difúze. Potenciál, který lze vypočítat z počátečních koncentrací je ten, který lze naměřit jen bezprostředně po naplnění trubice roztokem. Oproti tomu koncentrační gradient je udržován přes polopropustnou permeabilní membránu, neboť po ustavení potenciálu prochází je jeden druh iontů.

Difúze iontů a proud během měření potenciálu má vliv na hodnotu snímaného potenciálu. Potenciál poklesne viditelně během 15 sekund měření, zejména jeli velký koncentrační gradient. Jestliže hodnota kolísá o více než 5 mV vzhledem k první hodnotě, měření nezahrneme do výsledků.

Měříme difúzní potenciál jako funkci poměru koncentrací, nebo jako poměr aktivit vypočítaných podle tabulky 1. Naměřenými hodnotami proložíme regresní přímku ve tvaru $y = A \cdot \ln x + B$, určíme standardní odchylku. (Na osu y nanášíme $\Delta\phi$ v mV, na osu x poměr koncentrací c_2/c_1 nebo aktivit a_2/a_1). Např. pro poměr aktivit 10:1 je odpovídající difúzní potenciál $\Delta\phi_D = A \cdot \ln 10 = 38,7 \pm 0,9$ mV, kde $A = -16,8$ mV. Člen B zahrnuje asymetrický potenciál na elektrodách.

$$\text{Ze vztahu pro } \Delta\phi_D \text{ lze odvodit } t_{\pm} = \frac{1}{2} \left(1 \mp A \cdot \frac{vF}{RT} \right).$$

Je-li teplota roztoku $T = 294$ K máme $t_+ = 0,832 \pm 0,08$, $t_- = 0,168 \pm 0,08$. Pro poměr koncentrací $c_2/c_1 = 1$ N/0,001 N při teplotě $T = 295$ K, měření s NaCl a KCl dává následující difúzní potenciály:

NaCl: $\Delta\phi_D = 28,0$ mV

KCl: $\Delta\phi_D = 0,5$ mV

Odtud počty transportovaných iontů

NaCl: $t_+ = 0,42$, $t_- = 0,58$

KCl: $t_+ = 0,50$, $t_- = 0,50$

Koncentraci c_2 změníme přidáním roztoku 1 N KCl. V tomto případě $c_2 = \frac{c_o V_o + c_x V_x}{V_o + V_x}$, kde

$c_o = 0,001$ N počáteční koncentrace

$V_o = 90$ ml

$c_x = 1$ N koncentrace přidávaného roztoku

V_x = celkový přidávaný objem

Semilogaritmická stupnice potenciálu v závislosti na poměru koncentrací ukazuje lineární závislost. Měřený potenciál mění znaménko, protože koncentrace v části trubice s počátečním roztokem 0,001 N se zvyšuje přidáním 1 N KCl během měření.

Počítáme-li s koeficienty aktivity, regresní přímka $y = A \ln x + B$ dává $A = -24,8 \text{ mV}$ se standardní odchylkou $s = 0,3 \text{ mV}$. Pro membránu propustnou pro kationty platí $A = -\frac{RT}{F}$.

Při $T = 296 \text{ K}$ vychází $A = -25,5 \text{ mV}$. Hodnota je stejná pro všechny jednovalenční elektrolyty.

Pro aktivitu 10:1 je difúzní potenciál $\Delta\phi_D = 58,7 \text{ mV}$.

Tabulka 1:

$c \text{ mol/l}$	HCl	NaCl	N KCl
0,001	0,9656	0,9659	0,9652
0,002	0,9521	0,9531	0,9520
0,005	0,9285	0,9296	0,9274
0,01	0,9043	0,9059	0,9022
0,02	0,8755	0,8767	0,8706
0,05	0,8304	0,8285	0,8182
0,1	0,7964	0,7858	0,7707
0,2	0,7667	0,7414	0,7200
0,5	0,7571	0,6885	0,6552
1,0	0,8090	0,6644	0,611

Tabulka 2: Transport při 18°C a $c = 0,1 \text{ mol/l}$

	HCl	NaCl	KCl
t_+	0,828	0,383	0,492
t_-	0,172	0,617	0,508

12. Anomálie vody, kontrola základních bodů teploměru

U všech běžných látek všech skupenství se při zvyšování teploty objem látky zvětšuje, při snižování teploty zmenšuje. Výjimku tvoří právě voda, jejíž objem se při zahřívání v intervalu teplot od 0°C do 4°C zmenšuje, roste její hustota. Teprve zvýší-li se její teplota nad 4°C , začne se její objem zvětšovat (hustota klesá). Tento jev je tzv. anomálie vody. Anomální chování vody má velký význam v přírodě. Ověření anomálního chování vody je možné pomocí velmi jednoduchých pomůcek. Budeme studovat objemový diagram anomálie vody a teplotní diagram ochlazované vody.

12.a Studium anomálie vody

Pomůcky: zkumavka, zátka s kapilárou, destilovaná voda, led, kádinka, vaříč, teploměr, milimetrové měřítko, stojan

Postup měření:

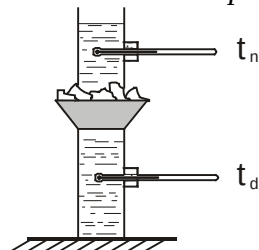
1. Zkumavku naplníme až po okraj destilovanou vodou, uzavřeme ji zátkou opatřenou kapilárou. Ve zkumavce nesmí být vzduchové bubliny.
2. Odečteme výšku vodního sloupce v kapiláře. Není-li kapilára opatřena stupnicí, dodatečně k ní přichytíme vhodnou stupnici jinou.
3. Zkumavku vložíme do vodní lázně s ledem o teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odečteme výšku vody v kapiláře.
4. Postupně zahříváme vodní lázeň a odečítáme polohy vodního sloupce. Výška vody v kapiláře indikuje velikost objemu vody - voda nejprve svůj objem zmenšuje a při určité teplotě se její objem začne opět zvyšovat.
5. Na základě naměřených hodnot sestojíme diagram závislosti objemu vody na teplotě.
6. Roztažnost skla kompenzujeme pomocí rtuti, kterou nalijeme do zkumavky (1/13 objemu zkumavky). Tím vyloučíme chybu měření, která vede k vyšší hodnotě teploty vody pro minimální objem. (Pro běžná měření není třeba rtuť použít).

12.b Stanovení teplotního diagramu ochlazované vody

Pomůcky: zařízení pro stanovení teplotního diagramu, dva shodné teploměry, voda, destilovaná voda, led, chlorid sodný

Postup měření:

Obr.15: Zařízení pro stanovení teplotního diagramu vody



Teplotní diagram ochlazované vody určíme pomocí zařízení na obr. 15. Skládá se ze skleněného válce se dvěma otvory pro teploměr, ve střední části je miska pro umístění chladicí směsi. Do válce nalijeme destilovanou vodu, do otvorů upevníme teploměry. Do misky umístíme chladicí směs, která je tvořena směsí ledu a chloridu sodného (kuchyňská sůl). Teplota směsi je až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Počáteční teplota destilované vody by měla být asi $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. Podle popisu připravíme měřící zařízení.
2. Ve dvouminutových intervalech odečítáme teplotu vody v horní a v dolní části válce. Válcem nehýbeme, vodu nemícháme.
3. Sestojíme grafy závislosti teploty vody na čase pro horní a dolní teploměr. Při správně provedeném pokusu se voda v horní nádobě může ochladit až na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota v dolní části válce se ustálí asi na $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotu odečítáme nejméně po dobu 40 minut.

12.c Kontrola základních bodů teploměru

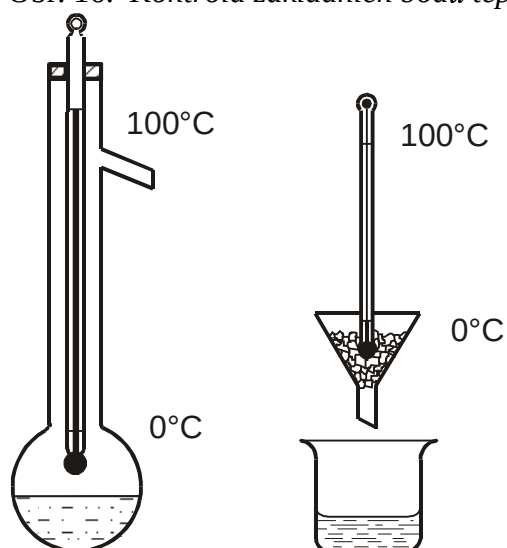
Základními body teploměru je teplota rovnovážného stavu ledu a vody za normálního tlaku = bod mrazu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota rovnovážného stavu vody a nasycených vodních par opět za normálního tlaku = teplota varu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kontrola bodu mrazu: teploměr ponoříme do směsi roztlučeného ledu a destilované vody (celý rtuťový sloupec musí být ponořený). Správná hodnota teploměru by měla být $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opravu na změnu teploty tání ledu v závislosti na barometrickém tlaku není třeba provádět, je zanedbatelně malá. Ukazuje-li teploměr hodnotu t_m' , pak oprava bodu mrazu Δt_m , kterou musíme přičíst k údajům teploměru, abychom dostali správnou teplotu, je $\Delta t_m = -t_m'$. Teploměr musí být ve směsi ponořen alespoň 30 minut.

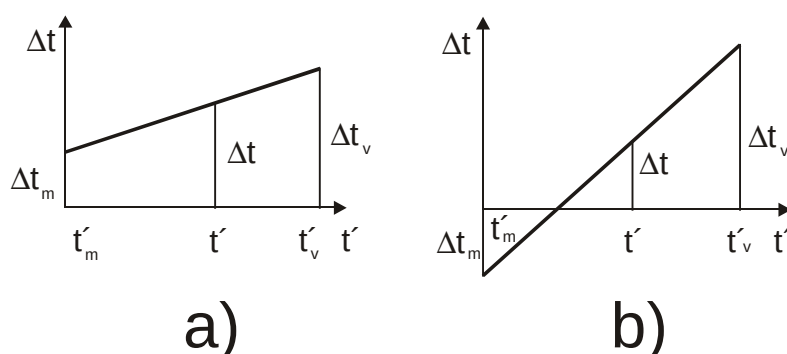
Oprava bodu varu: teploměr umístíme v parách vroucí vody tak, aby v parách byla ponořena celá stupnice až po dílek $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k tomu, že bod varu významně závisí na barometrickém tlaku, je třeba správnou teplotu varu t_v pro daný tlak b vyhledat v tabulkách nebo vypočítat $t_v = 100\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,0368(b - 760)\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde b je barometrický tlak v torrech, který zjistíme odečtením na rtuťovém barometru. Měření trvá opět alespoň 30 minut. Je-li údaj teploměru t_v' , je oprava bodu varu $\Delta t_v = t_v - t_v'$.

Opravu libovolné teploty t' , kterou odečítáme na teploměru mezi bodem mrazu a bodem varu, určíme na základě interpolačního vzorce $\Delta t = \Delta t_m + \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{t_v' - t_m'}(t' - t_m')$ a správná teplota je pak $t = t' + \Delta t$.

Obr. 16: Kontrola základních bodů teploměru



Obr. 17: Opravy základních bodů teploměru



Mají-li opravy bodu mrazu i bodu varu stejná znaménka (obr. 17a), pak musíme opravit každou teplotu, odečtenou na teploměru. Mají-li opravy základních bodů znaménka opačná (obr. 17b), existuje v intervalu $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ teplota t_0 , pro kterou je oprava rovna nule. Pro kontrolovaný teploměr vypočteme tabulku oprav pro teploty $t' = 0\text{ }^{\circ}\text{C}, 10\text{ }^{\circ}\text{C}, 20\text{ }^{\circ}\text{C}, \dots, 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a sestrojíme graf oprav, podle něhož pak odečítáme opravu pro libovolnou naměřenou teplotu. Hodnoty oprav zaokrouhlujeme podle typu kontrolovaného teploměru na desetiny posledního dělení.

13. Vlastnosti roztoků, Avogadrova konstanta

13.a Vlastnosti roztoků

Pomůcky: destilovaná voda, denaturovaný líh, sada zkumavek, teploměr, byreta

Roztokem nazýváme homogenní soustavu, která se skládá ze dvou nebo více chemicky čistých látek. Jedna ze složek roztoku, obvykle ta, která je zastoupena v největším množství, se nazývá rozpouštědlo. Roztok může existovat ve skupenství plynném, kapalném a pevném. U plynných roztoků se jedná o směs dvou nebo více plynů, které spolu chemicky nereagují. Na rozdíl od jiných skupenství se plyny dokonale mísí v libovolných poměrech. Směs plynů je homogenní roztok, tvoří jedinou fázi a přísluší mu tudíž nejméně tři stupně volnosti (Gibbsovo pravidlo). Proto stav směsi dvou plynů je určen třemi navzájem nezávislými veličinami (např. p , T , koncentrace). Roztok ve skupenství pevném – látky pevné fáze obsahují více než jednu složku, např. jedna krystalická látka tvoří s jinou svými atomy společnou krystalickou mřížku. Složení těchto roztoků se může měnit v širokém rozmezí koncentrací. To je také charakteristická vlastnost tuhých roztoků, která je odlišuje od krystalů chemických sloučenin (NaCl , Fe_3C), jimž náleží zcela určité složení.

Nejběžnějším typem roztoků jsou roztoky, kdy rozpouštědlem je kapalina, rozpuštěnými látkami mohou být látky pevné, kapalné i plynné. Složení roztoků je charakteristické jejich koncentrací.

Molární koncentrace (molarita) c_{mol} je podíl látkového množství n rozpuštěné látky a odpovídajícího objemu V roztoku $c_{\text{mol}} = \frac{n}{V} [\text{mol.l}^{-1}]$.

Molalita (i -té složky v roztoku) – je podíl látkového množství n této složky a hmotnosti m rozpouštědla $m_i = \frac{n}{m} [\text{mol.kg}^{-1}]$.

Objemová koncentrace je poměr hmotnosti rozpuštěné látky a objemu roztoku.

Hmotnostní koncentrace je poměr hmotnosti rozpuštěné látky a zvolené hmotnosti roztoku (nejčastěji se volí hmotnost 100 g).

Při rozpouštění kapaliny v jiné kapalině mohou nastat tři případy:

- Kapaliny se navzájem rozpouštějí v libovolných poměrech, vzniká jediná fáze (např. roztok vody a ethylalkoholu)
- Vzájemná rozpustnost kapalin je omezená - rozpouštějí se jen v určitých rozmezích koncentrací (např. voda a éter)
- Kapaliny se navzájem vůbec nerozpouštějí (např. sirouhlík a voda).

Rozpustnost plynů v kapalinách závisí na teplotě, druhu rozpouštědla a plynu, na tlaku nad kapalinou (Henryův zákon).

Proces rozpouštění je doprovázen uvolňováním nebo pohlcováním tepla. Teplo, které se uvolní nebo pohltí při rozpouštění látky o jednotkovém látkovém množství v rozpouštědle o velké hmotnosti je tzv. molární rozpouštěcí teplo.

Rozpustnost dané látky je koncentrace příslušející nasycenému roztoku.

Budeme studovat roztok etanolu a vody. Při vytváření roztoku kapalin se mohou molekuly sdružovat ve větší skupiny. Např. ve vodě se vlivem vodíkové vazby mezi molekulami vytvářejí asociované molekuly $(\text{H}_2\text{O})_2$, $(\text{H}_2\text{O})_3$. Počet těchto molekul v těchto skupinách není ani u dané kapaliny stálý a je závislý na teplotě (s rostoucí teplotou klesá). Při smíchání kapalin se asociované molekuly mohou rozpadat na menší celky a současně může nastat i tzv. solvatace, při níž se v roztoku vytvářejí nové skupiny složené z částic obou kapalin (solváty). K rozpadu asociovaných molekul je třeba energie (získá se z kinetické energie neuspořádaně se pohybujících částic) – ochlazení roztoku, při vzniku solvátů se energie uvolňuje. V případě vody a etanolu se oba procesy kombinují.

Postup měření:

1. Připravíme si daná množství etanolu a destilované vody, změříme jejich počáteční teplotu.
2. Připravujeme roztoky o zvyšující se koncentraci etanolu ve vodě, stanovujeme jejich objemy, počáteční teplotu a určujeme výsledný objem po smíchání obou kapalin a výslednou teplotu.
3. Vyneseme graf závislosti koncentrace a teploty a graf závislosti koncentrace a změny objemu při smíchání daného množství etanolu a vody.

13.b Přibližné určení průměru molekuly kyseliny olejové

Pomůcky: kyselina olejová, benzín, misky, destilovaná voda, byreta, laboratorní váhy, posuvné měřítko

Přeneseme-li na povrch vody kapku kyseliny olejové, bude se roztékat na monomolekulární vrstvu. Ze známého objemu kapky a změřeného průměru kruhové vrstvy lze vypočítat její výšku, tj. průměr molekuly kyseliny olejové. Pro měření používáme kyselinu olejovou ředěnou čistým (lékárenským benzínem) v poměru 1:40. Pomůcky nesmí být mastné.

Postup měření:

1. Zjistěte počet kapek roztoku na 1 cm^3 , určete objem jedné kapky roztoku, určete objem kyseliny olejové v kapce. (Ředění je v objemovém poměru 1:2000).
2. Do kruhové misky nelijte destilovanou vodu (popř. ji můžete poprášit korkovým práškem).
3. Kapátkem přeneste na vodu kapku roztoku kyseliny olejové a benzínu. Vyčkejte několik minut – benzín se odpaří a na vodě zůstane jen vrstva kyseliny olejové. Průměr olejové skvrny změřte posuvným měřítkem. Předpokládáme, že za uvedenou dobu se odpaří pouze benzín.
4. Vypočítejte výšku monomolekulární vrstvy. Aby chyba v určení výšky vrstvy byla co nejmenší, měříme postupně pro 1 kapku, 2 kapky, 3 kapky atd. benzínové směsi, měříme příslušné průměry kruhových skvrn, jejich plošný obsah a výšku jako poměr objemu ku

ploše vrstvy ($v = S/V$). Potom znovu určíme průměrnou hodnotu poloměru kruhové vrstvy.

5. Pomocí naměřených hodnot odhadněte velikost Avogadrovy konstanty.
6. Na základě tabulkové hodnoty určete poloměr kyseliny olejové výpočtem a srovnajte jej s naměřenou hodnotou.

Kyselina olejová $C_{17}H_{33}COOH$ má hustotu $\rho = 900 \text{ kg.m}^{-3}$.

14. Měření vlhkosti a viskozity vzduchu

14.a Měření vlhkosti vzduchu

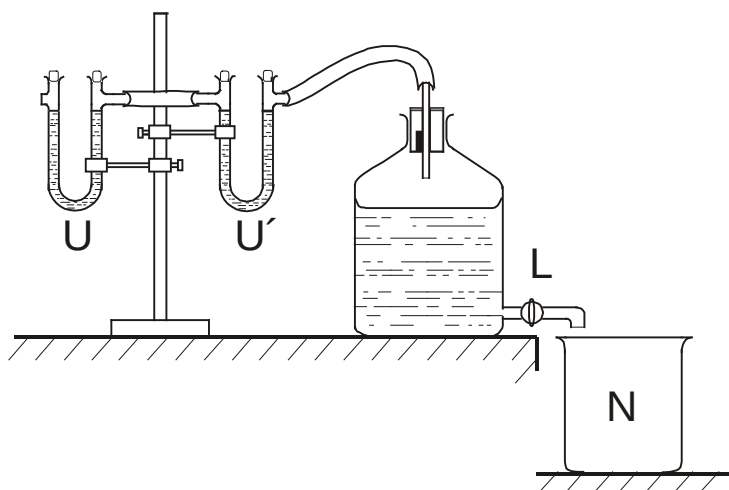
Absolutní vlhkost vzduchu Φ definujeme vztahem $\Phi = \frac{m}{V}$, kde m je hmotnost vodní páry obsažené v objemu V vzduchu. Jednotkou je kg.m^{-3} .

Pro přesné určení absolutní vlhkosti je třeba určit hmotnost m vodních par v objemu V – přímá metoda. Měření realizujeme podle obr. 19.

Obr. 19

Dvě skleněné trubice U a U' naplníme hygroskopickou látkou (např. chloridem vápenatým CaCl_2). Obě trubice jsou nahoře uzavřeny a vzájemně propojeny. Trubicemi prochází vzduch nasávaný vodou vytékající z láhve L do podstavné nádoby N . Vodní pára obsažená ve vzduchu je absorbována hygroskopickou látkou v trubici U , trubice U' slouží k ochraně první trubice před vodními parami z láhve L .

Obr. 18: Měření vlhkosti vzduchu



Z přírůstku hmotnosti v U -trubici zjistíme hmotnost pohlcených vodních par, objem vzduchu V je rovný objemu vody vyteklé z láhve L . Absolutní vlhkost vzduchu můžeme také vyjádřit pomocí napětí vodních par za dané teploty. Jednotkou je Pa . Z absolutní vlhkosti nelze určit stav nasycení vzduchu vodními parami. Proto zavádíme tzv. relativní vlhkost vzduchu

$\varphi = \frac{m}{M}, \varphi = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}$, kde $\Phi_{\max}$ značí absolutní vlhkost vzduchu nasyceného vodními parami

při téže teplotě. Relativní vlhkost je bezrozměrná veličina, je udávána v procentech

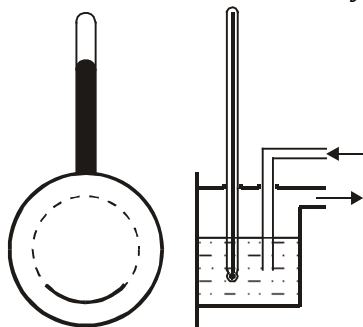
$$\varphi = \frac{m}{M} 100\%$$

Při měření relativní vlhkost vzduchu využíváme skutečnosti, že tlak vodních par je úměrný počtu molekul vody v objemové jednotce a tedy také hmotnosti vodních par. Označíme-li p tlak vodních par obsažených ve vzduchu a p_o tlak nasycených vodních par za téže teploty, pak relativní vlhkost vzduchu lze vyjádřit jako $\varphi = \frac{p}{p_o} \cdot 100\%$.

Relativní vlhkost vzduchu měříme vlasovým vlhkoměrem, který je založen na hygroskopické vlastnosti odtučněného vlasu, který se s rostoucí vlhkostí vzduchu prodlužuje. Změny délky mírně napjatého vlasu se přenášejí na ručičku, která ukazuje na empirické stupnici relativní vlhkost v procentech. Měření jsou velmi málo přesná.

Rosným vlhkoměrem určujeme relativní vlhkost vzduchu na základě stanovení rosného bodu. Rosný bod je teplota, při které se stanou vodní páry obsažené ve vzduchu nasycenými. Na obr. 19 je zobrazen Lambrechtův rosný vlhkoměr.

Obr. 19: Lambrechtův rosný vlhkoměr



Je to kovová nádobka opatřená lesklou plochou, na níž lze snadno pozorovat orosení. Nádobku opatříme teploměrem, nalijeme do ní trochu éteru a gumovým balónkem do ní vháníme vzduch. Éter se odpařuje a teplota nádobky klesá. Při dosažení rosného bodu se lesklá plocha orosí srážejícími se vodními parami. Teplotu t_r rosného bodu odečteme na teploměru v nádobce. Tlak nasycených par při této teplotě je roven skutečnému tlaku p vodních par ve vzduchu obsažených. Lze tedy počítat podle vztahu $\varphi = \frac{p}{p_o} \cdot 100\%$, kde p_o je tlak nasycených vodních par při teplotě místnosti.

Rosný bod je teplota, při které za nezměněného tlaku dosáhnou vodní páry ve vzduchu stavu nasycení. Absolutní vlhkost vzduchu roste s teplotou, relativní vlhkost s teplotou klesá. Vlhkost je významný meteorologický faktor. Příjemné prostředí v místnosti odpovídá vlhkosti 40-60%.

14.b Určení absolutní vlhkosti vzduchu

Pomůcky: hygroskopická látka, 2 trubice ve tvaru U, zátky, hadice, nádoba s destilovanou vodou, kádinka, technické váhy, digitální předvážky

Postup měření:

1. Zvážíme U trubici naplněnou hygroskopickou látkou – hmotnost m_o . Trubice U a U' spojíme a připojíme k láhvi L naplněné vodou.
2. Na technických vahách zvážíme nádobu N – hmotnost M_o .
3. Necháme vytékat vodu z láhve L, kohoutem upravíme výtokový otvor tak, aby vody jen odkapávala. Necháme natéct do nádoby N několik litrů vody.
4. Uzavřeme přívody trubice U, určíme její hmotnost – m_1 . Hmotnost pohlcených vodních par je $m = m_1 - m_o$.
5. Na technických vahách zjistíme hmotnost M_1 nádoby s vodou, hmotnost vody v nádobě je $M = M_1 - M_o$.
6. Objem V vody (= objem vzduchu) vypočteme ze vztahu $V = \frac{M}{\rho}$, kde ρ je hustota vody pro danou teplotu t .
7. Ze vztahu $\Phi = \frac{m}{V}$ vypočteme absolutní vlhkost vzduchu.

14.c Určení relativní vlhkosti vzduchu Lambrechtovým vlhkoměrem

Pomůcky: Lambrechtův vlhkoměr, éter, teploměr, gumový balónek

Postup měření:

1. Pečlivě očistíme lesklou plochu vlhkoměru. Přístroj postavíme tak, aby se v lesklé ploše zrcadlil nějaký světlý předmět.
2. Naplníme do nádobky éter a balónkem vháníme vzduch. Když se plocha začne zamlžovat, vhánění vzduchu přerušíme a odečteme teplotu t_r' .
3. Pozorujeme lesklou plochu tak dlouho, až zamlžení zmizí. Odečteme teplotu t_r'' .
4. Vypočteme teplotu rosného bodu $t_r = \frac{1}{2}(t_r' + t_r'')$. Teploty t_r' a t_r'' se nesmí lišit více než o 1 °C.

14.d Měření vlhkosti vzduchu psychrometrem

Psychrometr je tvořen dvěma teploměry na jednom stojanu. Jeden teploměr je suchý, druhý je obalen vlhkou látkou. Voda odpařující se z vlhké látky odnímá teplo svému okolí, proto je teplota t_1 vlhkého teploměru nižší než teplota t suchého teploměru. Voda se z vlhké látky odpařuje tím rychleji, čím dále jsou vodní páry ve vzduchu od stavu nasycení. Pokles teploty je přímo úměrný rozdílu tlaku p_1 nasycených par při teplotě t_1 a tlaku p vodních par obsažených ve vzduchu. Platí $t - t_1 = \frac{p_1 - p}{Ab}$, kde A je konstanta závislá na typu psychrometru a volbě jednotek, b je barometrický tlak.. Tlak vodních par obsažených ve vzduchu je potom $p = p_1 - A b (t - t_1)$ a relativní vlhkost vzduchu $\varphi = \frac{p}{p_o} \cdot 100\% =$

$\frac{p_1 - Ab(t - t_1)}{p_o}$. Hodnota konstanty A bývá u psychrometrů uvedena a leží v mezích od $0,00066 \text{ K}^{-1}$ až $0,00080 \text{ K}^{-1}$. Častěji je však k psychrometru připojena tabulka nebo nomogram, takže lze po odečtení hodnot t a t_1 bez výpočtu určit vlhkost vzduchu.

Aspirační psychrometr typ 885 měří s přesností, která je maximálně dosažitelná kapalinovými teploměry. Hlavní součástí jsou dva stejné rtuťové teploměry. Rtuťové nádobky teploměrů jsou chráněny proti vlivům záření dvojími trubcovými pouzdry, tepelně izolovanými od ostatních částí přístroje. Vnější trubice mají náběhové hrany nálevkovitě upraveny. Rtuťová nádobka jednoho z teploměrů je obalena jemnou tkaninou (punčoškou). Před měřením se tato punčoška dokonale navlhčí destilovanou vodou pomocí trubičky, která je součástí přístroje, ta se zasune do ochranné trubice teploměru. Příslušný teploměr se nazývá „vlhký“. Pro urychlení měření resp. odpařování vlhkého teploměru, je vzduch nasáván ventilátorem s pécovým motorkem, umístěným v hlavici přístroje. Proud vzduchu o minimální rychlosti 2 m.s^{-1} proudí kolem obou teploměrných nádobek. Teploměr suchý i vlhký ukazují různou teplotu. U vlhkého teploměru je teplota závislá na rychlosti odpařování destilované vody z tkaninového obalu. Z ustálených údajů obou teploměrů lze určit vlhkostní veličiny (relativní vlhkost, tlak vodních par, rosný bod. A to buď výpočtem nebo z tabulek.

Příklad k stanovení rosného bodu:

Relativní vlhkost 70 %

Teplota + 6 °C

Maximální tlak par za teploty +6 °C = 7 mm

70% maximálního tlaku par při +6 °C ... $\frac{7,0}{100} \cdot 70 = 4,9 \text{ mm}$

Maximální tlak par 4,9 mm odpovídá podle tabulky 1 teplotě 1 °C.

Rosný bod je při +1 °C.

Postup měření:

1. Připravíme si stojan pro zavěšení psychrometru. Přístroj vyjmeme z obalu a pomocí pomůcek navlhčíme destilovanou vodou punčošku mokrého teploměru.
2. Psychrometr zavěšíme a přiloženým klíčem opatrně natáhneme motorek ventilátoru.
3. Z ustálených údajů obou teploměrů (asi po pěti minutách) odečteme hodnoty teploty na obou teploměrech.
4. Pomocí přiložené tabulky určíme relativní vlhkost vzduchu.
5. Určete rosný bod.

Tabulka 1: Tabulka maximálního tlaku par a absolutní vlhkosti vzduchu při úplném nasycení vodními parami

t °C	Tlak par mm Hg	Abs. vlhkost g.m ⁻³	t °C	Tlak par mm Hg	Abs. vlhkost g.m ⁻³
-30	0,39	0,46	6	7,0	7,3
-29	0,43	0,51	7	7,5	7,8
-28	0,47	0,55	8	8,0	8,3
-27	0,51	0,60	9	8,6	8,8

-26	0,56	0,65	10	9,2	9,4
-25	0,61	0,71	11	9,8	10,0
-24	0,67	0,78	12	10,5	10,7
-23	0,73	0,85	13	11,2	11,4
-22	0,80	0,92	14	12,0	12,1
-21	0,88	1,01	15	12,8	12,8
-20	0,96	1,10	16	13,6	13,6
-19	1,00	1,2	17	14,5	14,5
-18	1,1	1,3	18	15,5	15,4
-17	1,2	1,4	19	16,5	16,3
-16	1,3	1,5	20	17,5	17,3
-15	1,4	1,6	21	18,7	18,4
-14	1,6	1,8	22	19,8	19,5
-13	1,7	1,9	23	21,1	20,6
-12	1,8	2,0	24	22,5	21,8
-11	2,0	2,2	25	23,8	23
-10	2,2	2,4	26	25,2	24,4
-9	2,3	2,6	27	26,8	25,8
-8	2,5	2,8	28	28,4	27,3
-7	2,7	3,0	29	30,0	28,8
-6	2,9	3,2	30	31,8	30,4
-5	3,2	3,4	31	33,7	32,1
-4	3,4	3,7	32	35,7	33,9
-3	3,7	4,0	33	37,7	35,7
-2	4,0	4,2	34	39,9	37,6
-1	4,3	4,5	35	42,2	39,6
0	4,6	4,9	36	44,6	41,8
+1	4,9	5,2	37	47,1	44,0
+2	5,3	5,6	38	49,7	46,3
+3	5,7	6,0	39	52,5	48,7
+4	6,1	6,4	40	55,3	51,2
+5	6,5	6,8			

14.e Měření viskozity vzduchu

Stejně jako pro kapaliny platí také pro plyny Poiseillův vztah. Podle tohoto vztahu proteče

kapilárou délky l a poloměru r za dobu τ objem $V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\tau}{l} p$, kde p je rozdíl tlaků na koncích

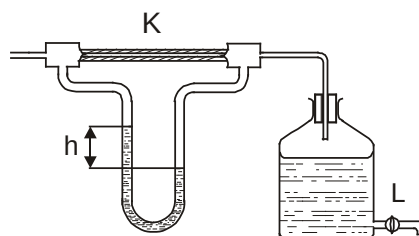
kapiláry, η je dynamická viskozita plynu. Rozdíl tlaků lze měřit manometrem, který je naplněn kapalinou o hustotě ρ . Tlak potom vyjádříme pomocí vztahu $p = h\rho g$, kde h je rozdíl

hladin kapaliny v manometru. Dynamickou viskozitu plynu lze potom psát $\eta = \frac{\pi r^4}{8lV} h\rho g$.

Určení dynamické viskozity vzduchu

Pomůcky: panel pro měření viskozity vzduchu, láhev s destilovanou vodou, kádinka, laboratorní váhy, technické váhy, stopky

Obr. 20: Měření dynamické viskozity vzduchu



K měření dynamické viskozity vzduchu použijeme zařízení podle obr. 22. Vytéká-li voda z láhve L, je vzduch nasáván přes kapiláru K a vlivem viskozity vzduchu vznikne na koncích kapiláry tlakový rozdíl, kterým měříme manometrem. Délku kapiláry určíme pomocí měřítka děleného na milimetry, poloměr určíme pomocí rtuti. Objem, který protekl kapilárou za dobu τ , zjistíme z hmotnosti a hustoty vody, která během této doby vytekla z láhve L, popř. pomocí kalibrované nádoby, do níž vodu zachycujeme. Je-li objemový průtok konstantní, bude výraz $\frac{\pi r^4 \rho g}{8lV}$ ve výrazu pro výpočet viskozity také konstantní pro danou kapalinu.

Potom lze viskozitu vypočítat pomocí zjednodušeného vztahu $\eta = A h \tau$, kde A je konstanta, h je rozdíl hladin v manometru, τ je doba průtoku daného objemu. Pro přesnější měření je třeba provést tzv. Hagenovu opravu a viskozita vzduchu je dána potom výrazem $\eta = A h \tau - \frac{B}{\tau}$, kde $B = \frac{1,1 \rho_v V}{8 \pi l}$, kde ρ_v je hustota vzduchu. Výrazy A, B jsou konstantní jen při stálé teplotě vzduchu, tj. teplota vzduchu v kapiláře musí být rovna teplotě okolí. Měříme-li závislost viskozity na teplotě, je potřeba konstantu A násobit poměrem absolutních teplot vzduchu v kapiláře a okolního vzduchu. Na konstantu B nemá změna teploty podstatný vliv.

Postup měření:

1. Aparaturu sestavíme podle obrázku. Použijeme měřicí panel, zapíšeme si hodnoty pro r , l kapiláry.
2. Změříme dobu průtoku daného objemu vzduchu. Měříme nejdříve pro objem uvedený na panelu, potom není třeba počítat hodnotu konstant A a B – jsou také uvedeny na panelu. Měření opakujeme pro různé objemy V.
3. Vypočteme dynamickou viskozitu vzduchu, určíme aritmetický průměr všech naměřených hodnot a výsledek porovnáme s tabulkovou hodnotou.
4. Měříme-li závislost viskozity na teplotě, volíme konstantní objem V a konstantní výtokovou rychlost. Sestavíme graf závislosti viskozity na teplotě pro alespoň pět různých hodnot teploty.

16. Úvod do rheologických měření.

Pro měření použijeme konsistometru. Slouží k určení konzistence (hustoty) viskózních materiálů. Podstata měření spočívá v určení vzdálenosti, kterou materiál proteče pod vlivem své vlastní tíhy během daného časového intervalu. Pro měření je potřeba jen 75 ml vzorku. Vyrytá stupnice s dílkou po 0,5 cm umožňuje přesný odečet výsledků.

Pomůcky: konsistometr, stopky, různé tekutiny (majonéza, kečup, hořčice apod.)

Postup měření:

Konzistometr se skládá ze dvou částí oddělených přepážkou. Menší část slouží jako zásobník tekutiny, který je oddělen od měřicí části přepážkou. Přepážka je ovládána pružinou, ve své poloze je držena závorou ve tvaru L. Před měřením je třeba přístroj ustavit do vodorovné polohy pomocí vestavěné libely. Dále polohu zkontrolujeme libelou postavenou napříč zařízením. Testovaný materiál je třeba několik hodin před měřením temperovat na 20 °C.

Konzistometr slouží převážně ke kvalitativnímu posuzování vlastností látek. Pro naše potřeby provedeme jeho oceňování kapalinou o známé viskozitě a hustotě (glycerín). Zásobník naplníme až povrch měřenou tekutinou, její povrch zarovnáme. Na konci zvoleného časového intervalu odměříme vzdálenost, kam tekutina dotekla. Odečteme polohu ve středu a na okrajích měřicího žlábků, obě hodnoty zprůměrujeme. Zjištěné hodnoty porovnáme pokusíme se zjistit, jaký je vztah mezi viskozitou a měřením na Bostwickově konzistometru.

Podle McCarthyho a Seymoura je měření pomocí konzistometru Bostwicka úměrné $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$.

TABULKY

Hustota destilované vody při tlaku 10⁵ Pa

t(°C)	ρ(kg.m ⁻³)	t(°C)	ρ(kg.m ⁻³)
0	999,84	21	997,99
1	999,90	22	997,77
2	999,94	23	997,54
3	999,96	24	997,30
4	999,97	25	997,05
5	999,96		
6	999,94	25	997,0
7	999,90	30	995,6
8	999,85	35	994,0
9	999,78	40	992,2
10	999,70	45	990,2
11	999,60	50	988,0
12	999,50	55	985,7
13	999,38	60	983,2
14	999,24	65	980,6

15	999,10	70	977,8
16	998,94	75	974,9
17	998,77	80	971,8
18	998,59	85	968,6
19	998,41	90	965,3
20	998,20	95	961,9
		100	958,3

Povrchové napětí vody

$t(^{\circ}\text{C})$	$\sigma (\text{N.m}^{-1})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\sigma (\text{N.m}^{-1})$
0	$75,63 \cdot 10^{-3}$	35	$70,23 \cdot 10^{-3}$
5	$74,86 \cdot 10^{-3}$	40	$69,42 \cdot 10^{-3}$
10	$74,11 \cdot 10^{-3}$	50	$67,80 \cdot 10^{-3}$
15	$73,35 \cdot 10^{-3}$	60	$66,04 \cdot 10^{-3}$
18	$72,97 \cdot 10^{-3}$	70	$64,27 \cdot 10^{-3}$
20	$72,58 \cdot 10^{-3}$	80	$62,50 \cdot 10^{-3}$
25	$71,81 \cdot 10^{-3}$	90	$60,75 \cdot 10^{-3}$
30	$71,04 \cdot 10^{-3}$	100	$58,80 \cdot 10^{-3}$

Dynamická viskozita vody

$t(^{\circ}\text{C})$	$\eta (\text{N.s.m}^{-1})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\eta (\text{N.s.m}^{-1})$
0	$1,792 \cdot 10^{-3}$	30	$0,801 \cdot 10^{-3}$
5	$1,519 \cdot 10^{-3}$	35	$0,722 \cdot 10^{-3}$
10	$1,308 \cdot 10^{-3}$	40	$0,656 \cdot 10^{-3}$
15	$1,140 \cdot 10^{-3}$	45	$0,599 \cdot 10^{-3}$
16	$1,111 \cdot 10^{-3}$	50	$0,549 \cdot 10^{-3}$
17	$1,083 \cdot 10^{-3}$	55	$0,506 \cdot 10^{-3}$
18	$1,056 \cdot 10^{-3}$	60	$0,469 \cdot 10^{-3}$
19	$1,030 \cdot 10^{-3}$	65	$0,435 \cdot 10^{-3}$
20	$1,005 \cdot 10^{-3}$	70	$0,405 \cdot 10^{-3}$
21	$0,981 \cdot 10^{-3}$	75	$0,380 \cdot 10^{-3}$
22	$0,958 \cdot 10^{-3}$	80	$0,356 \cdot 10^{-3}$
23	$0,936 \cdot 10^{-3}$	85	$0,335 \cdot 10^{-3}$
24	$0,914 \cdot 10^{-3}$	90	$0,316 \cdot 10^{-3}$
25	$0,894 \cdot 10^{-3}$	95	$0,299 \cdot 10^{-3}$
26	$0,874 \cdot 10^{-3}$	100	$0,284 \cdot 10^{-3}$
27	$0,855 \cdot 10^{-3}$		
28	$0,836 \cdot 10^{-3}$		
29	$0,818 \cdot 10^{-3}$		

30	$0,801 \cdot 10^{-3}$		
----	-----------------------	--	--

Dynamická viskozita některých látek

$t(^{\circ}\text{C})$	Etylalkohol $\eta \text{ (N.s.m}^{-1}\text{)}$	Metylalkohol $\eta \text{ (N.s.m}^{-1}\text{)}$	Olej ricinový $\eta \text{ (N.s.m}^{-1}\text{)}$	Olej olivový $\eta \text{ (N.s.m}^{-1}\text{)}$
0	$1,773 \cdot 10^{-3}$	$0,817 \cdot 10^{-3}$	-	-
10	$1,466 \cdot 10^{-3}$	$0,680 \cdot 10^{-3}$	2,42	-
20	$1,200 \cdot 10^{-3}$	$0,584 \cdot 10^{-3}$	0,98	$80,8 \cdot 10^{-3}$
30	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$0,510 \cdot 10^{-3}$	0,45	$55,7 \cdot 10^{-3}$
40	$0,834 \cdot 10^{-3}$	$0,450 \cdot 10^{-3}$	0,23	$37,2 \cdot 10^{-3}$
50	$0,702 \cdot 10^{-3}$	$0,396 \cdot 10^{-3}$	0,13	$25,3 \cdot 10^{-3}$
60	$0,592 \cdot 10^{-3}$	$0,351 \cdot 10^{-3}$	0,09	$19,2 \cdot 10^{-3}$

Tabulka pro převádění viskozity z Englerových stupňů na jednotky SI

$^{\circ}\text{E}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$^{\circ}\text{E}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$^{\circ}\text{E}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
1,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	1,90	$10,7 \cdot 10^{-6}$	3,60	$26,1 \cdot 10^{-6}$
1,05	1,40	2,00	11,8	3,80	27,7
1,10	1,80	2,10	12,8	4,00	29,3
1,15	2,30	2,20	13,8	4,20	30,9
1,20	2,80	2,30	14,8	4,40	32,5
1,25	3,30	2,40	15,7	4,60	34,1
1,30	3,90	2,50	16,6	4,80	35,7
1,35	4,50	2,60	17,5	5,00	37,3
1,40	5,00	2,70	18,4	5,50	41,2
1,45	5,60	2,80	19,3	6,00	45,1
1,50	6,20	2,90	20,2	6,50	49,0
1,60	7,40	3,00	21,1	7,00	52,9
1,70	8,50	3,20	22,8	7,50	56,8
1,80	$9,60 \cdot 10^{-6}$	3,40	$24,5 \cdot 10^{-6}$	8,00	$60,6 \cdot 10^{-6}$

Fyzikální vlastnosti kapalin

ρ = hustota při 20°C , σ = povrchové napětí při 20°C , η = dynamická viskozita při 20°C , β = součinitel objemové roztažnosti při 20°C , c = měrné teplo při 20°C , t_t = teplota tání při tlaku 10^5 Pa , t_v = teplota varu při tlaku 10^5 Pa

Látka	ρ (kg.m^{-3})	σ (N.m^{-1})	η (N.s.m^{-2})	β (K^{-1})	c ($\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	t_t ($^{\circ}\text{C}$)	t_v ($^{\circ}\text{C}$)
Benzen	879	$29,1 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	1740	5,5	80,4
Etylalkohol	789	$22,0 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	2470	-117	78,4

Glycerín	1260	$62,5 \cdot 10^{-3}$	1,48	$0,50 \cdot 10^{-3}$	2430	18,6	290
Metylal- kohol	792	$22,7 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	2470	-97,8	64,7
Olej olivový	915	$33,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	1970	-	-
Olej ricinový	960	$36,4 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-1}$	$0,69 \cdot 10^{-3}$	1930	-	-
Olej terpentýn.	855	$27,0 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$0,97 \cdot 10^{-3}$	1800	-10	160
Petrolej	850	$27 \cdot 10^{-3}$	-	$0,96 \cdot 10^{-3}$	2140	-	-
Rtuť	13546	$491 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$				
Voda	998	$73,0 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	4180	0,0	99,6

Závislost teploty varu vody na tlaku

p (Pa)	t (°C)	p (Pa)	t (°C)	p (Pa)	t (°C)
90000	96,71	96500	98,63	103000	100,46
90500	96,86	97000	98,78	103500	100,60
91000	97,02	97500	98,93	104400	100,73
92000	97,32	98000	99,07	104500	100,86
92500	97,46	98500	99,21	105000	101,00
93000	97,61	99000	99,35	105500	101,13
93500	97,76	99500	99,49	106000	101,27
94000	97,98	100000	99,63	106500	101,40
94500	98,06	101000	99,61	107000	101,53
95000	98,20	101500	100,05	107500	101,66
95500	98,35	102000	100,19		
96000	98,49	102500	100,32		

Závislost napětí nasycených vodních par na teplotě

t (°C)	p (Pa)	t (°C)	p (Pa)
-50	3,9	50	12330
-45	6,9	55	15760
-40	12,4	60	19920
-35	22,3	65	25010
-30	37,3	70	31160
-25	62,7	75	38540
-20	102,7	80	47360
-15	165,3	85	57800
-10	260,0	90	70110
-5	401,3	95	84540
0	610,6	100	101320
5	866,6	105	120800

10	1227	110	143300
15	1706	115	169100
20	2330	120	198500
25	3173	125	232100
30	4240	130	270100
35	5626	135	313000
40	7373	140	361400
45	9586	145	415500

Literatura:

Brož, J.: Základy fyzikálních měření. SPN, Praha 1974.

Široká, M.: Fyzikální praktikum. UP Olomouc 1981 (skriptum).

Kupka, Z.: Fyzikální praktikum z kmitů, vlnění a optiky. UP Olomouc 1990 (skriptum).

Ilberg, W.: Physikalisches Praktikum. BSB BG Teubner Leipzig 1974.

University Laboratory Experiments – Physics. PHYWE Edition 94/95, Vol.1-5.