Seznam návodů k přístrojům Phywe

- Viskozita kapalin
- Fázová a grupová rychlost ultrazvuku v kapalinách
- Barometrická formule
- Měření účinnosti palivových článků
- Ověření Stefan-Boltzmannova zákona
- Studium Planckovy konstanty

ÚVOD

Cílem tohoto textu je umožnit studentům provádět měření a demonstrační pokusy s pomůckami, které byly získány z projektu FRVŠ.
Půjde o měření fyzikálních veličin, ověřování platnosti fyzikálních zákonů, a sledování modelových demonstračních situací

Úlohy jsou rozděleny na část experimentální, projektovou a demonstrační.

Příprava na výuku i vlastní záznam měření je součástí protokolu, který student odevzdává.
Text musí obsahovat:
a) název úlohy,
b) pracovní úkoly,
c) u elektrických úloh schéma zapojení,
d) vztahy pro výpočet hledané veličiny,
e) vztahy pro stanovení nejistoty výsledku,
f) tabulku pro zápis veličin, potřebných pro výpočet, připravenou na základě principu metody a popisu úlohy.
G, závěr či interpretaci pokusu

U každé úlohy je v laboratoři přiložen návod upřesňující požadavky pro provedení měření.

Studenti se seznámí s centrálním vypínačem a dbají na bezpečnost práce.
Nesmí bez svolení vyučujícího zapínat elektrické zařízení nebo připojit elektrický obvod k proudovému zdroji.
Způsob, jímž se provádí fyzikální měření, závisí jednak na povaze měřené veličiny, jednak na tom, ze kterých vztahů pro měřenou veličinu vyjdeme a jakých přístrojů použijeme.

Při měření studenti pečlivě zapisují naměřené hodnoty, aby se zbytečně nedopustili hrubých chyb. Sledují přitom, zda-li se jednotlivé hodnoty měření od sebe neliší více, než lze očekávat. Při zjištění nepřiměřené odchylky se zkontrolují znovu podmínky pokusu.

Údaje se zapisují na tolik míst, kolik můžete odečíst ze stupnice (ne víc, ne méně), naměřené hodnoty jsou neúplná čísla! Je-li měření provedeno jen jednou, odhadne se nejistota měření.
Měří-li se veličina za stejných podmínek vícekrát, vypočítá se z naměřených hodnot aritmetický průměr a standardní nejistotu typu A a stanoví se i nejistotu typu B.
Výsledkem je zápis měřené veličiny spolu s údajem kombinované nejistoty. Nejistota měření se zaokrouhlí na jednu platnou cifru vždy směrem nahoru (např. 0,0238 na 0,03).

Úvod
Pro ideální tekutinu předpokládáme, že v ní neexistují smyková – tečná napětí. Pro skutečnou tekutinu to platí pouze v případě, že tekutina se nepohybuje. V případě, že tekutina proudí a její jednotlivé elementární objemy jsou v relativním pohybu a dvě sousední vrstvy mají rozdílnou rychlost, potom na jejich rozhraní dochází mezi nimi ke tření a ke vzniku smykového napětí, příčinou tohoto jevu je viskozita tekutiny.
Při laminárním proudění u kterého jednotlivé proudnice jsou rovnoběžně a tekutina se nepromíchává, pro tečné napětí formuloval Newtonův zákon, podle něhož je tangenciální napětí v kapalině úměrné dynamické vazkosti a gradientu rychlosti.

Viskozita Newtonovských a ne-newtonovských kapalin
(rotační viskozimetr)
Smyková, tečná napětí, gradient, vnitřní tření, viskozita, plasticita, tvarovatelnost.

Princip
Viskozitu kapalin lze zjišťovat rotačním viskozimetrem. Rotační viskozimetry je založen na měření torzního momentu, jímž působí rotující kapalina na element zavěšený na torzním vlákně. Zařízení se sestává ze dvou soustředných válců, mezi nimiž je úzká mezera, vyplněná měřenou kapalinou. Jeden z elementů se otáčí konstantní úhlovou rychlostí, vnitřním třením kapaliny je otáčivý moment přenášen na druhý element, zavěšený na torzním vlákně. Odporem kapaliny proti pohybu vytváří kroutící moment, který se zkoumá pomocí spirálové pružiny a jeho velikost se odečítá přímo na stupnici. Rotační viskozimetry jsou vhodné i ke studiu nenewtonských kapalin, neboť umožňují měřit úhel pootočení (úměrný napětí) v závislosti na rychlosti otáčení (ta je úměrná rychlosti deformace).

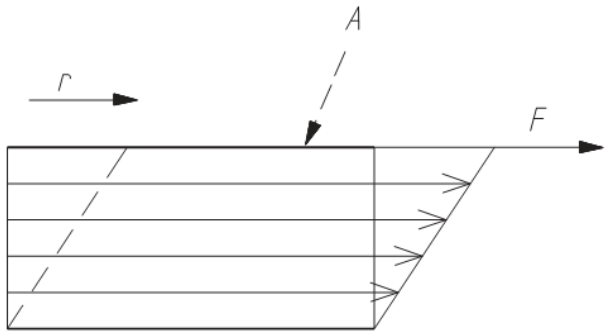
Úkoly
Určete gradient rotační rychlosti jako funkci torzního smykového napětí pro dvě Newtonovské kapaliny (glycerin, tekutý parafin).
Určete výstupní tokové křivky pro nenewtonovské kapaliny (čokoláda).
Vyšetřete teplotní závislost viskozity oleje a glycerinu.

Zařízení:
Rotační viskozimetr s příslušenstvím, ohřívadlo s magnetickou míchačkou, teploměr, potřebné nádoby a kapaliny (aspoň 250ml).

Nastavení a postup
Sestavený experiment je zobrazen na fotografii. Rotační viskozimetr pečlivě nastavte do vertikální polohy. K tomu slouží seřizovací šrouby a kontrola pomocí vodováhy na podložce viskozimetru. Spusťte viskozimetr až k povrchu měřené kapaliny přesně na kalibrační značku otočného tělesa. Připojte externí kontaktní teploměr k magnetické míchačce a nastavte na příslušnou experimentální teplotu (25 ° C pro první měření). Umístěte míchadlo do skleněné kádinky a za stálého míchání vyčkejte dokud teplota nezůstane konstantní po dobu několika minut. Po dosažení tepelné rovnováhy vypněte magnetickou míchačku a změřte viskozitu kapaliny, jak je popsáno v návodu, který je dodáván s otočným viskozimetru.

Pro glycerol a tekutý parafin stanovte závislost kroutícího moment na frekvenci v rozsahu mezi 0,1 Hz a 1,0 Hz. V druhém pokusu určete teplotní závislost viskozity glycerolu a ricinového oleje v mezi teplotami 25 a 70°C v pěti krocích. Nakonec změřte závislost kroutícího momentu na frekvenci v rozsahu 0,1 Hz až 1,0 Hz při teplotě 30 ° C.
Po každé sérii měření vyčistěte pečlivě viskozimetr vodou nebo acetonem.
Jiné látky vhodné pro experimenty jsou oleje, etylenglykol jakožto newtonovské kapaliny, a barvy, sirup nebo maziva jako nenewtonské kapaliny.

Teorie a rozbor
O ideální kapalině předpokládáme, že v ní neexistují tečná - tzv. smyková napětí. Pro reálnou kapalinu to platí pouze tehdy, jsou-li její jednotlivé části vůči sobě v klidu. Proudí-li reálná kapalina, tj. jsou-li její části v relativním pohybu a dvě po sobě se posouvající vrstvy ka paliny mají různou rychlost, dochází mezi nimi ke tření.
Tečná – v podstatě třecí síla a tím i tečné (smykové) napětí τ (podíl tečné síly a velikosti styčné plochy) jsou nenulové. Tečné napětí, které je kompenzováno proměnnou rychlostí kapaliny, je tím větší, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění, můžeme charakterizovat podílem dv/dy - gradientem rychlosti ve směru kolmém k proudu. Při laminárním proudění, při němž probíhají proudová vlákna souběžně a kapalina se nepromíchává, je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti.



Rychlostní gradient a smykové napětí

Pokud tenká vrstva kapaliny leží mezi dvěma skleněnými destičkami, pak pohyb desek vůči sobě vyžaduje aplikaci nějaké síly. Vrstvy kapaliny přiléhající přímo k povrchu každé z destiček jsou přidržovány adhezními silami a mezi molekulami vlastní kapaliny působí kohezní síly soudržnosti. Pohyb destičky vyvolá v nejbližším okolí pohyb v kapalině, předává se určitá hybnost, tu pak tato vrstva kapaliny předává částečně své sousední vrstvě tekutiny, takže i další a další vrstvy se začnou pohybovat. V kapalině se tak postupně ustaví lineární gradient rychlostí – rychlostní profil mezi oběma deskami.
Označíme-li vzdálenost mezi oběma deskami *dx* a rozdíl rychlostí *dv*, pak *F* síla potřebná k pohybu kapalné vrstvy bude podle Newtona:

$$F = \eta A \frac{dv}{dx}. \quad (1)$$

Tato síla je úměrná velikosti plochy *A* a rychlostnímu gradientu $\frac{dv}{dx}$. Faktor η v rovnici značí dynamickou viskozitu. Podíl *F/A* nazveme smykové napětí τ,

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$ kde

A velikost kontaktní plochy mezi destičkou a kapalinou
η viskozita kapaliny
dv/dx rychlostní gradient.
Tato rovnice představuje Newtonův zákon viskozity. Vidíme, že dynamická viskozita je rovna podílu smykového napětí a rychlostního gradientu.

Měřidlem v tomto experimentu je rotační viskozimetr. Skládá se z vnitřního a vnějšího válce. Zkoumaná kapalina se nachází mezi nimi. Při nízké rychlosti otáčení otáčivý moment *T (r),* jímž je poháněna válcová vrstva kapaliny s poloměrem *r* a výškou *h* odpovídá následujícímu vztahu jako důsledek otáčení vnějšího nebo vnitřního válce:

$$T(r) = \tau \cdot 2\pi r h \cdot r \quad (3)$$

Smykové napětí lze vyjádřit pomocí měřitelného otáčivého momentu jako:

$$\tau(r) = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (4)$$

V tomto případě rychlostní gradient D vyjádříme pomocí úhlové rychlosti ω

$$D(r) = r\frac{d\omega}{dr} \qquad (5)$$

Vhodné substituce v rovnicích (2), (4) a (5) a integrace za okrajových podmínek $\omega = 0$ pro $r=R_1$ a $\omega = f$ pro $r=R_2$ (kde R_1, R_2 jsou poloměry příslušných válců) dávají následující vztah mezi měřeným otáčivým momentem a úhlovou rychlostí

$$T = \frac{4\pi R_1^2 - R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2}\eta f = C\eta f \qquad (6),$$ kde C je konstanta přístroje a f frekvence otáčení.

Pokud je provedena korekce na vliv okrajových jevů, stává se C je empirickou konstantou, tedy závisí na konkrétním zařízení.

Tekutiny, jejichž viskozita je nezávislá na smykovém napětí a na gradientu rychlosti se nazývají newtonovské kapaliny. Jde obvykle o kapaliny s nízkou molekulovou hmotností, zředěné suspenze se sférickými částicemi a čisté velmi tekuté mazací oleje.
U koloidních roztoků a suspenzí s vyšší koncentracích částic, krystalických kapalin, tavenin již viskozita není konstantní při dané teplotě. Takové ne-newtonovské kapaliny vykazují komplexní korelaci mezi τ a celkovým gradientem rychlosti D.
Koloidní roztok je roztok, který obsahuje rozpuštěné částice velikost mezi 10^{-5} a 10^{-7} cm.
Viskozita koloidních roztoků závisí nejen na koncentraci, ale také na tvaru molekul.
Sférické koloidy (glykogeny, různé bílkoviny) mají přibližně sférický tvar částic. Viskozita roztoků je dána rovnicí

$$\frac{\eta}{c} = K \qquad (7),$$

c je koncentrace, K je konstanta, která má stejnou hodnotu pro homologií polymerní látky.
Lineární koloidy (parafiny, guma, celulóza, polystyren) mají tyčovité nebo listové tvary částic. Viskozita roztoků o stejné koncentraci z homologické řady polymerů je závislá na molekulární délce a roste s zvýšením stupně polymerace. V takových případech je viskozita závislá na molekulové hmotnosti.

$$\frac{\eta}{c} = K\,M \qquad (8).$$

Viskozita je veličina velmi závislá na teplotě. Kapaliny vykazují pokles viskozity se zvýšením teploty. Když je energie je dodávána, průměrná energie molekul se zvyšuje a vzájemné síly přitažlivosti mezi molekulami kapaliny stává méně znatelné. Pro většinu kapalin platí následující rovnice:

$$\ln\eta = \frac{E}{RT} + \ln C \qquad (9)$$

C materiálová konstanta
E energie nutná k překonání mezimolekulárních sil.
Při zvýšení teploty o 1K viskozita klesne přibližně o 2%.

Fig. 3: Moment of rotation as a function of the frequency for a Newtonian liquid.
+ Glycerol
o Liquid paraffin

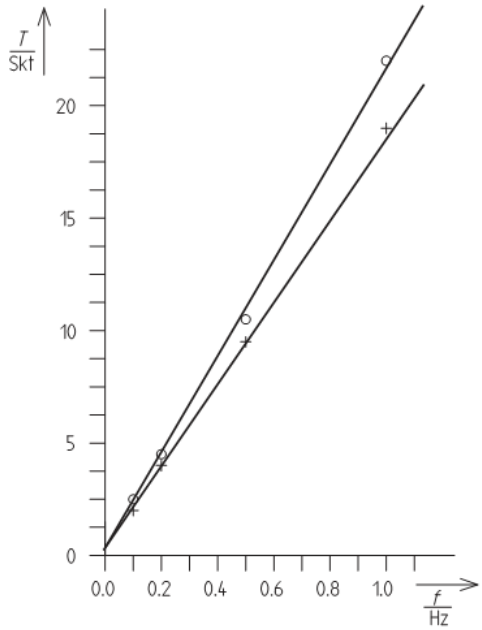


Fig. 4: Moment of rotation as a function of the frequency for a non-Newtonian liquid (chocolate at 302 K)

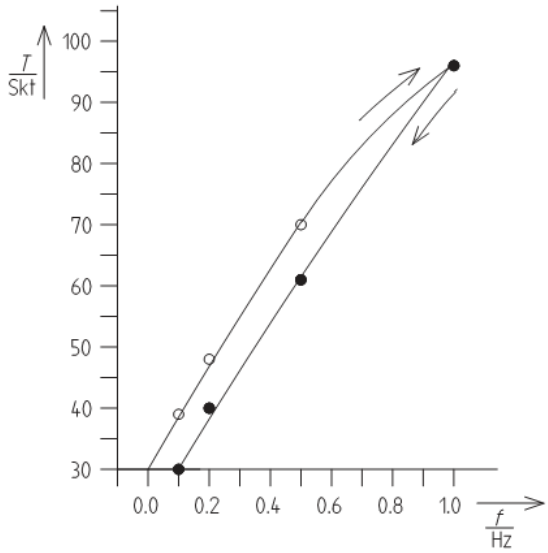


Fig. 5: Temperature dependence of the viscosity of glycerol

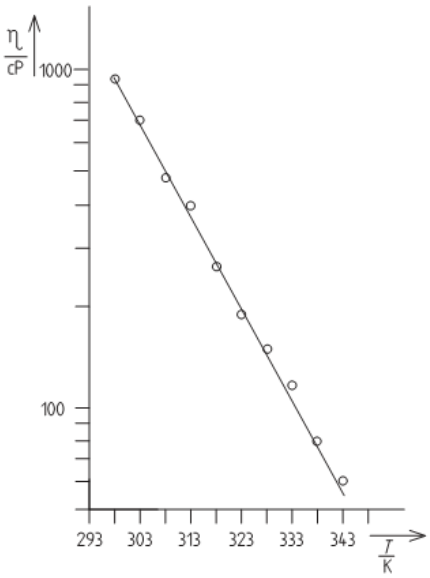
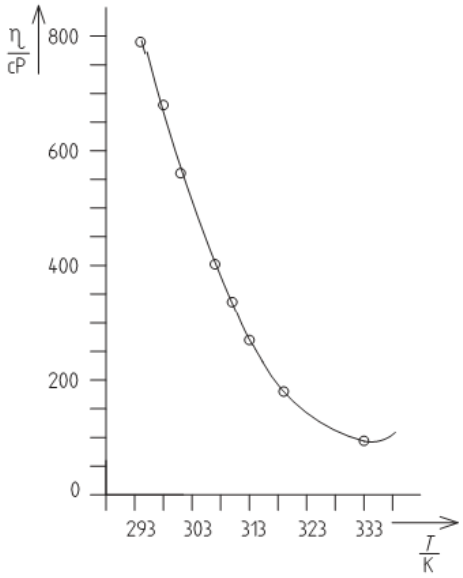


Fig. 6: Temperature dependence of the viscosity of castor oil



2. Viskozita nenewtonských kapalin

Jak již bylo uvedeno v kap. 1.1, pokud pro kapaliny neplatí rovnice (1.1) pak se jedná o kapaliny nenewtonské. Zatímco poměr tečného napětí newtonských kapalin a smykové rychlosti je dynamická viskozita, která je konstantním látkovým parametrem, charakterizujícím danou kapalinu.

Pro nenewtonskou tekutinu platí analogická rovnice jako pro kapaliny newtonské – rov. (1.1)

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a . j \quad , \tag{2.1}$$

kde η_a je zdánlivá viskozita definovaná rovnicí

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}} = \frac{\tau}{j} . \tag{2.2}$$

Zdánlivá viskozita není pro nenewtonské kapaliny látkovým parametrem, ale je veličinou proměnnou. Její okamžitá hodnota se mění podle použitého napětí a nemůže tudíž v žádném případě sloužit pro fyzikální hodnocení konsistence nenewtonských kapalin.

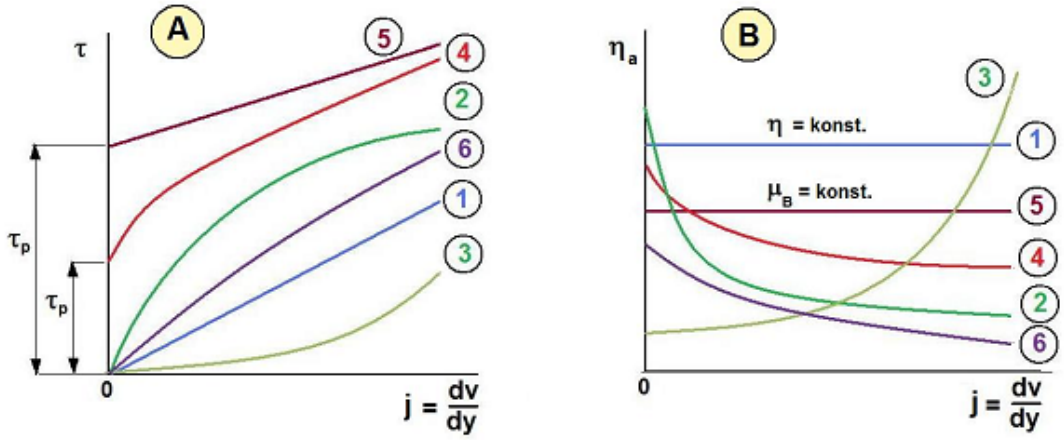
Vedle zdánlivé viskozity se používá pro hodnocení nenewtonovské kapaliny při určitém smykovém napětí tzv. diferenciální viskozita daná rovnicí

$$\eta_\Delta = \frac{d\tau}{dj} . \tag{2.3}$$

Protože ani zdánlivá ani diferenciální viskozita nejsou pro nenewtonovskou kapalinu konstantní, je třeba pro fyzikální ohodnocení těchto kapalin udávat jejich závislost na smykovém napětí. Při studiu nenewtonských kapalin byla velká pozornost věnována určení závislosti tečného napětí na rychlostním gradientu, tzn. reologických modelů. Bylo sestaveno několik rovnic, ve většině případů empirických, které uvedenou závislost popisují, některé vybrané rovnice uvádí tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Vybrané typy rovnic popisujících nenewtonské chování tekutin

Číslo	Název funkce	rovnice
1	Lineární funkce	$\tau = \eta j$
2	Ostwald	$\tau = A j^{B}$
3	Steiger Ory	$j = A\tau + B.\tau^3$
4	Parabolická	$\tau = A + B\tau + C.\tau^2$
5	Logaritmická	$\tau = A + B.\ln j$
6	Hyperbolická	$\tau = A + \frac{B}{j}$
7	Cassoin	$\sqrt{\tau} - \sqrt{A} = \sqrt{B}.\sqrt{j}$

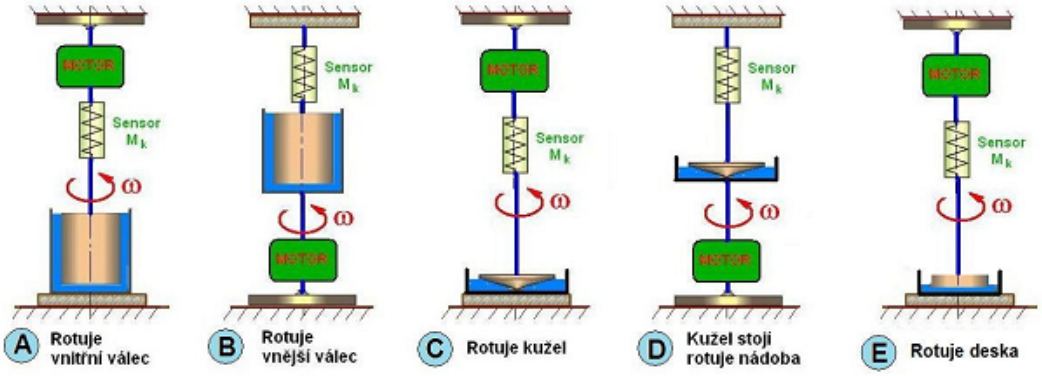


Obr. 2.1 Reogramy a zdánlivá viskozita vybraných nenewtonských kapalin A - reogram; B – zdánlivá viskozita – [4]

1. newtonská kapalina; 2. pseudoplastická kapalina; 3, dilatantní kapalina; 4. skutečná plastická kapalina; 5, Binghamova – ideálně plastická kapalina; 6. Eyringův model

9. Rotační viskozimetr

Přiblížení k pomyslnému pokusu o stanovení viskozity mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými plochami se dá dosáhnout přechodem na soustavu dvou souosých válců, otáčejících se navzájem kolem společné osy. Na tomto principu jsou založeny rotační viskozimetry. Přímo měřitelnými veličinami u rotačních viskozimetrů je úhlová rychlost ω nebo počet otáček za čas ustáleného pohybu jednoho z válců a dále údaje o odporu kapaliny proti smykovému namáhání v důsledku vzniku gradientu rychlosti. Tento odpor se projevuje jako kroutící moment, kterým se jeden z válců přístroje brání proti pohybu přenášeného kapalinou z druhého válce. Rotační viskozimetry se nejčastěji používají ve třech provedeních a sice dva souosé válce nebo kužel – deska, nebo dvě rotující desky - obr. 9.1.



Obr. 9.1 Schematické znázornění rotačních viskozimetrů

Fázová a grupová rychlost ultrazvuku v kapalinách

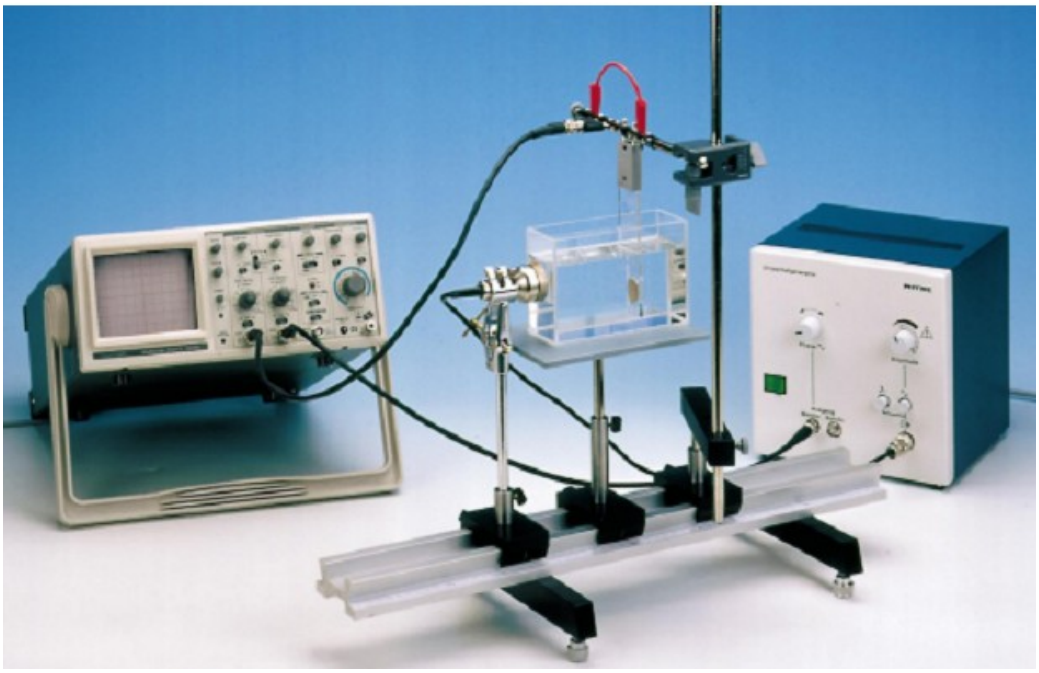
Klíčové pojmy: podélné (longitudinální) vlnění, rychlost zvuku v kapalinách, vlnová délka, frekvence, piezoelektrický efekt, piezoelektrický ultrazvukový převodník

Princip
Zvukové vlny jsou v kapalině vyvolány ultrazvukovým generátorem a jsou detekovány piezoelektrickým ultrazvukovým přijímačem. Signály z vysílače a přijímače sledujeme pomocí osciloskopu. Signály z generátoru ultrazvuku a přijímače ultrazvuku zaznamenáváme pomocí osciloskopu.

Ultrazvukem vznikají v kapalném prostředí podélné, postupné nebo stojaté vlny. Pro určení fázové a grupové rychlosti použijeme podélné postupné vlny. V experimentu jsou zvukové vlny vysílány do kapaliny vysílačem – ultrazvukovým zvukovým generátorem a snímány piezoelektrickým ultrazvukovým čidlem. Fázová rychlost je vypočtena pomocí relativního posunu fázových pozic signálů. Grupová rychlost je určená z měření zpoždění zvukových pulsů.

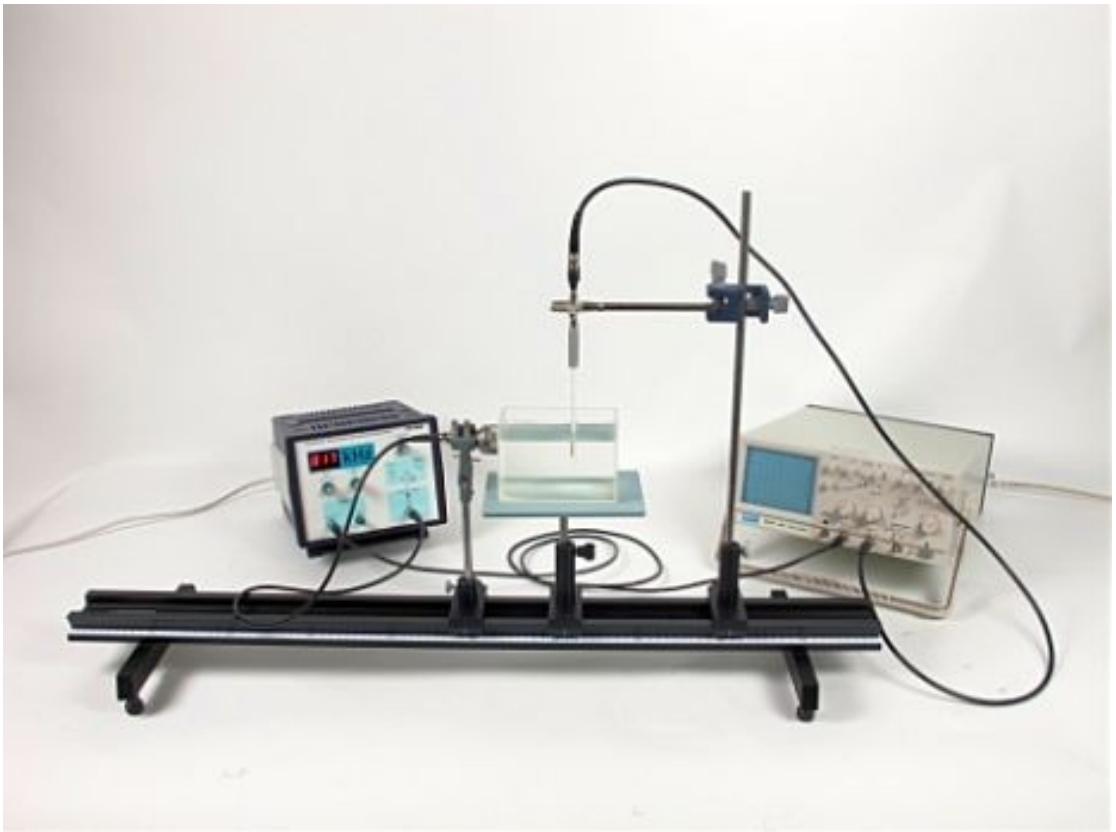
Úlohy
1. Naměřte relativní fázový posun signálu ultrazvukového přijímače jako funkci vzdálenosti od ultrazvukového generátoru (sinusový mód) a určete ultrazvukovou vlnovou délku a fázovou rychlost, frekvence vlnění je známa.
2.1 Najděte vhodné nastavení koeficientu rozmítání „sweep“ osciloskopu pro ultrazvukovou frekvenci.
2.2 Pomocí generátoru v pulsním módu zaznamenejte „delay time“ zpoždění zvukových pulzů jako funkci vzdálenosti mezi generátorem a přijímačem. Stanovte grupovou rychlost.

Obr.2 -Aparatura potřebná ke studiu rychlosti šíření ultrazvuku



Vybavení

11744.00 1 přijímač – sonda ultrazvuku
11744.93 1 generátor ultrazvuku
03504.00 1 skleněná kyveta 150 _ 55 _ 100mm
07924.00 1 izolační stojan
08283.00 1 optická lavice l = 60 cm
08284.00 2 nastavitelná podstava optické lavice
08286.01 2 jezdec pro optickou lavici, h = 30mm
08286.02 2 jezdec na optickou lavici, h = 80mm
08060.00 1 stoleček na tyčce
08256.00 1 otočné rameno
02040.55 1 dvojitá svorka -PASS-
02032.00 1 podpůrná nerezová tyč, l = 500mm
37715.00 1 univerzální držák
11459.95 1 osciloskop, 30MHz, 2 kanálový
07359.95 1 vodič, l = 100mm, červený
07542.11 2 koaxiální kabel, BNC, l = 750mm
07542.27 1 adaptér, BNC-zásuvka/ 4mm plug pair
05949.00 1 laboratorní teploměr 10 + 30 C
30084.25 3 glycerín, 250ml
30155.50 1 NaCl, 500 g
31246.81 1 destilovaná voda, 5 l



Postup.
Plošku generátoru smočíme pro lepší kontaktní vlastnosti glycerínem nebo vodou. Abychom zabránili vzniku stacionárního vlnění a vícenásobného echa zvukovým odrazem, kyvetu s kapalinou naproti generátoru opatříme zvukově absorpčním materiálem jako je např. pěna nebo pokrčený papír.

Úkoly stručně:

1. Osciloskop připojíme tak, aby přijímal signál z monitorovaného ultrazvukového sinusového generátoru na interním kanálu 2. Měníme-li vzdálenost mezi generátorem a přijímací sondou, sledujeme na osciloskopu změny fáze přijímaného signálu. Sondu nejprve nastavíme tak, aby její signál byl ve fázi s monitorovaným signálem braným z generátoru. Posuneme-li nyní sondu o celistvé násobky vlnové délky, budou oba signály opět ve fázi. Tak lze ze vzdálenosti, o které byla sonda přenesena a její signál byl opět ve stejné fázi určit vlnovou délku vlnění v daném prostředí.

2.1. Časovou základnu osciloskopu (tu, která odpovídá zkoumanému zpoždění) ověříme, případně kalibrujeme pomocí známého (spolehlivého) frekvenčního generátoru.

2.2. Osciloskop je spouštěn externím synchronním signálem generátoru, který pro tuto část úlohy je nastaven v pulsním módu. Ultrazvukový přijímač - sonda přesuneme z počáteční polohy blíže ke generátoru vln a změnu v pulsním odezvě („delay time“) se zjistíme z toho, že hrana pulsu na oscilogramu se posune, toto posunutí zaznamenáme.
Dále sledujeme a zaznamenáváme teplotu kapaliny: Měření opakujeme pro další prostředí glycerol a roztoky soli.

Teorie a rozbor

Úkol 1: vlnová délka, fázová rychlost vlnění

Se změnou vzdálenosti Δ mezi generátorem a sondou, z její počáteční polohy (relativní fáze = 0), se přijímaný signál fázově posunuje vzhledem k vysílači takto

$$\Delta = \frac{\hat{\ }}{\lambda} \qquad (1)$$

Pokud vzdálenost dále měníme, signál se znovu překryje pro (při posunu sondy o celistvé násobky vlnové délky, budou oba signály opět ve fázi):

$$\Delta = \cdot \qquad = \qquad (2)$$

Vlnovou délku λ je možné vypočítat ze vzájemného posuvu fáze obou signálů jako

$$\lambda = \frac{\hat{\ }}{\Delta} \cdot \qquad - \hat{\ } \qquad (3)$$

To plyne z rovnic (1) a (2).

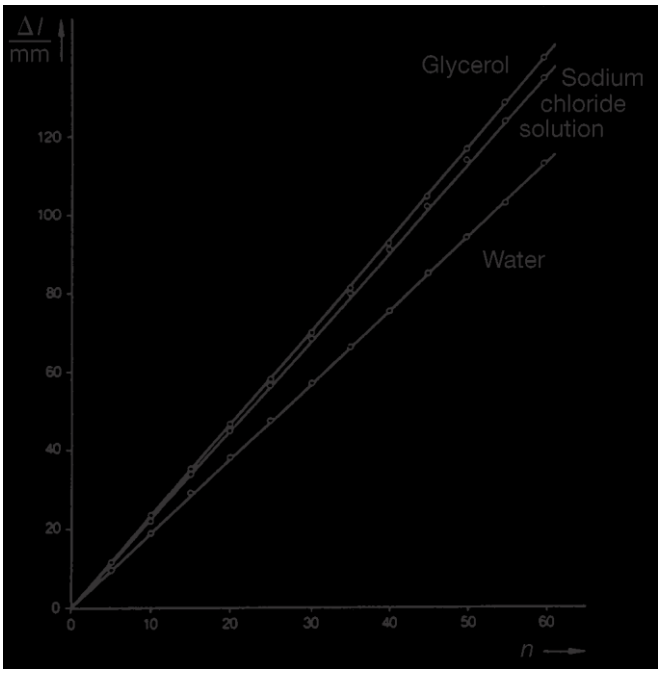
Pokud známe frekvenci zvuku ***f***, je fázová rychlost

$$c_p = \cdot \qquad (4)$$

Vlnovou délku λ určujeme ze (3) jako směrnici regresní přímky.

Tabulka 1 ukazuje vlnové délky s jejich standardními odchylkami a fázové rychlosti c_p počítané při frekvenci f = 800 kHz podle vztahu (4). Odchylky pro fázovou rychlost jsou počítány pomocí odchylek vlnové délky a předpokládané frekvenční nestálosti generátoru ±5 kHz.

Kapalina	°C	mm	mm	c_p / m / s	c_p / m / s
Destilovaná voda	25	1.873	0.003	1500	12
Nasycený roztok NaCl	25	2.255	0.007	1800	20
Glycerol+	25	2.353	0.004	1880	15



Obr. 1.2: Závislost posunutí sondy pro vodu, glycerol a roztok NaCl jako funkce počtu „přejetých“ vlnových délek(při teplotě 25°C)

Úkol 2.1. Práce s osciloskopem
Koeficient „sweepu“ získáme takto:

$$t^* = \frac{N T}{x} \qquad (5)$$

kde:
N = počet ukázaných vibračních period.
T = 1/f = délka periody f (T=1.25 μs pro f=800 kHz)
x = délka vibračních period z oscilogramu.

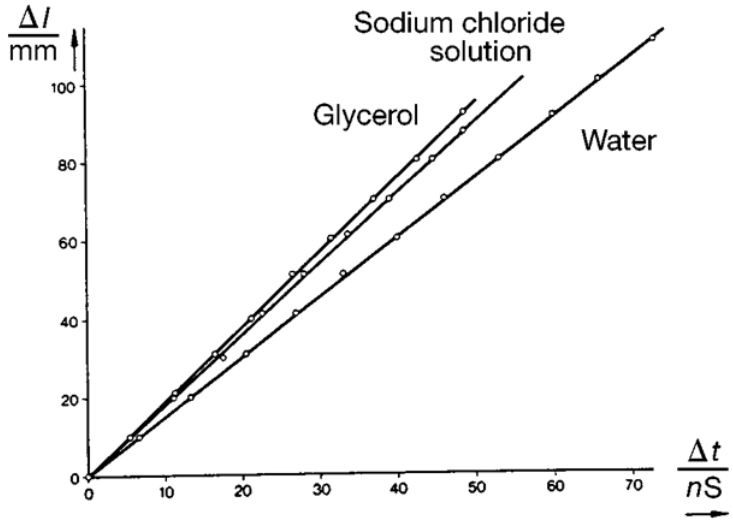
Úkol 2.2. Grupová rychlost c_g
Grupová rychlost vlnění má význam při šíření skupiny (grupy) harmonických vln. Jeto rychlost, kterou se pohybuje tato skupina prostředím, tzn. rychlost, jíž je vlněním přenášena energie. Grupovou rychlost c_g určíme ze vzdálenosti Δl, kterou zvukový signál (sledovaný impuls) v kapalině urazil a času Δ , který potřeboval.

$$c_g = \frac{\Delta l}{\Delta t} \qquad (6)$$

Tabulka 2 ukazuje grupové rychlosti určené ze směrnice regresní přímky podle rovnice (6) a jejich standardní odchylky Δc_g.

Kapalina	°C	c_G / m/s	c_G / m/s	$M c_G$ / m/s
Destilovaná voda	25	1506	7	12
NaCL (satur.)	25	1800	9	14
Glycerol+	25	1900	9	15

Poslední sloupec obsahuje standardní odchylku získanou ze statistických a systematických odchylek vyskytujících se při stanovení koeficientu „sweepu“ t^* při dané frekvenci generátoru.



Obr. 1.3: Změna l(t) pro vodu, glycerol a roztok NaCl jako funkce zpoždění (delay time Dt, (při teplota 25°C)

C).

Grupová a fázová rychlost jsou propojené vztahem:

$$c_g = \quad - \frac{dc}{d\lambda}$$

Fakt, že výsledek rovnosti grupové a fázové rychlosti vlnění: $c_g = c_p$ je v rámci limitů odchylky měření, ukazuje, že

$$\frac{dc_p}{d\lambda} =$$

A tedy, že nedochází k disperzi.

Tabulka 3 údaje převzaté z referenčních zdrojů

Kapalina	°C	$\frac{c}{m/s}$	$\frac{c/T}{m/s \cdot °C}$	Source
Glycerol+	20	1923	−1.8	*
	25	1904	−2.2	**
Voda (destllovaná)	25	1497	+2.5	
	25	1498	+2.4	*
			(0 < u < 40°C)	**

* L. Bergmann, Der Ultraschall (Ultrasonics), Hirzel-Verlag
** Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co.

Poznámky

1. Glycerol je hygroskopický, takže měřená rychlost zvukového vlnění bývá pomalejší, než jakou nalezneme v referenčních tabulkách.

2. Osciloskop: relativná chyba záchytu „sweep“ error ± 5 %.

3. Ultrazvukový generátor: relativní odchylka pro frekvenci 800 kHz: ± 0.6 %.

4. Podle údajů z Bergmana * rychlost zvuku v NaCl lineárně roste s koncentrací. Rychlost se mění stejně s teplotou stejně jako v případě destilované vody.

5. Zvukové rychlosti jsou funkcí teploty viz * a **.

Barometrická rovnice

LEP 1.4.07

Související témata: Kinetická teorie plynů, tlak, stavová rovnice, teplota, plynová konstanta.

Princip

Skleněné nebo kovové kuličky jsou urychlovány vibrující ploškou na různé rychlosti (teplotní model). Částicová hustota kuliček je měřena jako funkce výšky pístu a frekvence vibrací plošky.

Zařízení

1x Aparatura pro měření kinetické teorie plynů	09060.00	1
1x zdroj napájení 15 V/5A	13530.93	1
1x světelná závora s počítadlem	11207.08	1
1x zdroj napájení 5V/2,4A	11076.93	1
1x digitální stroboskop	21809.93	1
1x stopky digitální, 1/100 s	03071.01	1
1x skleněné korálky, d = 2 mm, 10 000 kusů	09060.01	1
1x kovové kuličky, d = 2mm, 1000 kusů	09060.02	1
2x stojan	02002.55	2
1x tyč na upevnění, hranol. l = 400 mm	02026.55	1
1x pravoúhelná svorka	02040.55	1
1x spojovací kabel, l = 750 mm, červená	07362.01	1
1x spojovací kabel, l = 750mm, modrá	07362.04	1

Úkoly

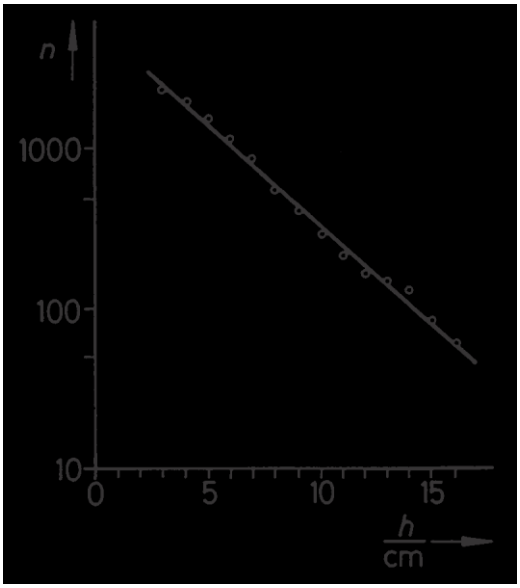
měření částicové hustoty jako funkce:

1. výšky, při konstantní frekvenci
2. frekvence vibrací chvějící se plošky v konstantní výšce

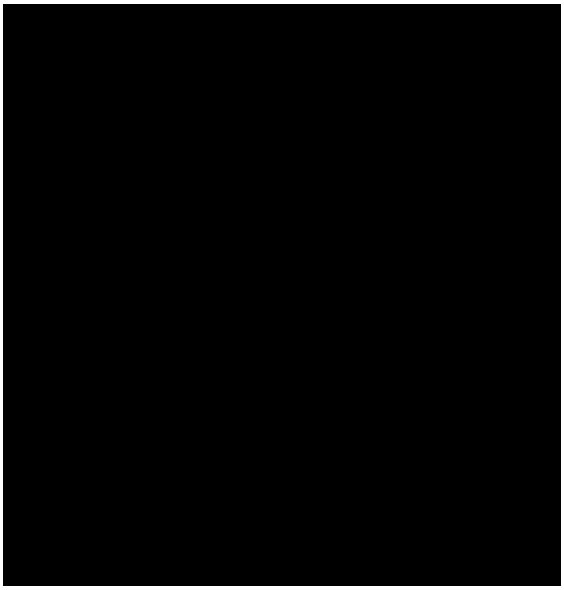
Příprava a průběh měření:

Připravený experiment je ukázán na obrázku 1. Aparatura pro zkoumání kinetické teorie je naplněna asi 400 kovovými kuličkami (přibližně jedna vrstva kuliček). Píst je nastaven do polohy maximálního objemu. Rychlost rotace plošky – a tedy frekvence vibrací – je nastavena prostřednictvím napájení a měřena stroboskopem (vibrující plát se jeví při stejné frekvenci jakou bliká stroboskop jako nehybný). Neměla by být překročena maximální rychlost rotace 3000 min^{-1} (tedy 50 Hz). Použijeme světelnou závoru s počítadlem pro záznam počtu kuliček, které přeruší paprsek světla v daném čase (použijeme oblast o ploše přibližně 0,4 mm^2). Bezprostředně nad vibrující ploškou je pravděpodobnost, že kuličky projdou světelnou závorou velká. Proto je doporučeno aby měření začalo na výšce kolem 3 cm nad vibrující ploškou.

obr. 1: Aparatura pro měření barometrické rovnice.



Obr.2 : Počet ocelových kuliček (m = 0.034 g) keré projdou objemovým elementem dV za 30 s přivibrační frekvenci 50 Hz jako funkce výšky h.



Obr.3 : Počet ocelových kuliček (m = 0.034 g) keré projdou objemovým elementem dV za 30 s ve výšce h = 8 cm v závislosti na vibrační frekvenci.

Teorie a vyhodnocení:

Představíme li si vertikální oblast cylindrického tvaru jako jednotkový objem vyříznutý z atmosféry, pak tlak v základně takového válce je roven tíze sloupce vzduchu nad základnou. V bodě *h + dh* nad základnou je tlak nižší než v bodě *h* právě o změnu tíhy sloupce vzduchu při posunu o výšku *dh*:

$$dp = - \qquad , \qquad (1)$$

kde g = 9,81 ms^{-2} je tíhové zrychlení, ρ = hustota vzduchu.

Objem vzduchu si označíme jako *V*, pak:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

kde *M* je hmotnost plynu. Použijeme li stavovou rovnici

$$pV = nRT = nLkT \qquad (2)$$

získáme vztah pro *dp*:

$$dp = - \qquad (3)$$

n = počet molů
T = termodynamická teplota (v K)
R = 8, 31 $JK^{-1}mol^{-1}$, plynová konstanta
L = 6, 02 . 10^{-23} mol^{-1}, Loschmidtova konstanta
k = 1,38 . 10^{-23} JK^{-1}, Boltzmannova konstanta
m = hmotnost molekul

Pokud rovnici (3) vyřešíme pro p pro případ

$$p = p_0 \qquad \text{pro h = 0}$$

potom dostaneme změnu tlaku s výškou

$$p = p_0 e^{\frac{-}{kT}} \qquad (4)$$, poněvadž

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

potom také platí, že hustota plynu se mění s výškou:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{-}{kT}} \qquad \textbf{(5)}$$

Poznámka:

Aparatura pro zkoumání kinetická teorie je využitelná pro kvalitativní experimenty týkající se tepelného pohybu částic, vypařování a destilace.

Charakteristika a účinnost palivového článku PEM a PEM elektrolyzéru

Související témata
Elektrolýza, polarizace elektrody, rozkladné napětí,
galvanické prvky, Faradayův zákon.

Podstata úloh
V PEM elektrolyzéru se elektrolyt skládá z protony-vedoucí membrány a vody (PEM = Proton-Exchange-Membrane). Použije-li se elektrické napětí, tvoří se vodík a kyslík. PEM palivový článek vytváří elektrickou energii z vodíku a kyslíku. Elektrické vlastnosti elektrolyzéru a palivového článku jsou zkoumány zaznamenáváním volt-ampérové charakteristiky . Pro stanovení účinnosti, jsou plyny ukládány v malých plynoměrech, aby bylo možné měřit množství vytvořeného a spotřebovaného plynu.

Zařízení

PEM palivový článek	06747.00	1
Pem elektrolyzér	06748.00	1
spojovací skříňka	06030.23	1
odpor v odporové skříňce 10 Ohm	06056.10	2
odpor v odporové skříňce 5 Ohm	06055.50	1
odpor v odporové skříňce 2 Ohm	06055.20	1
odpor v odporové skříňce 1 Ohm	06055.10	2
zkratová zástrčka, černá	06027.05	2
plynový zásobník	40466.00	1
odměrný válec, 100ml, plastový	36629.01	1
gumová hadička, průměr 4mm	39280.00	1
gumová hadička, průměr 6mm	39282.00	1
škrtička, šířka 10mm	43631.10	4
hadičková spojka, ID 3-6/7-11mm	47517.01	2
promívací baňka, plastová, 500ml	33931.00	1
kádinka, 250ml, plastová	36013.01	1
stopky, digitální, 1/100s	03071.01	1
barometr/manometr, ruční	07136.00	1
laboratorní teploměr, -10...+100° C	38056.00	1
digitální multimetr	07	

Připojte přibližně 40 cm dlouhý kus tenké gumy
trubky (di = 4 mm), aby horní výstup připojení
skladovací kontejner z electrolyser.
Naplňte obě vodní nádrže až k "Gas test" souladu s destilované
vody. Přitom držet hadičku tak, aby také vyplní
vodou.
Uzavřete naplněný vodou kusy pryžové hadice s hadicí

svorka přibližně 2 cm od konce a připevněte je
k gasometers.
Dejte pryžové zátky do skladovacích kontejnerů v
takovým způsobem, že žádné vzduchové bubliny se tvoří v nich a pak
stiskněte je v těsně, takže žádný plyn unikat.
Otevřete hadicové svorky.
Připojte electrolyser k napájení dle
Obr. 2, a nastavit proud přibližně 1 s ak-
pronájem nastavovacím knoflíkem.134.00 2

napájení, univerzální	13500.93	1
spojovací kabel, l=500mm, červený	07361.01	3
spojovací kabel, l=500mm, modrý	07361.04	2
spojovací kabel, l=750mm, červený	07362.01	1
spojovací kabel, l=750mm, modrý	07362.04	1
voda, destilovaná, 5l	31246.81	1

Úkoly

1. Zaznamenání charakteristiky PEM elektrolyzéru.
2. Zaznamenání charakteriistiky PEM palivového článku.
3. Stanovení účinnosti PEM elektrolytické soustavy.
4. Stanovení účinnosti PEM palivového článku.

Sestavení a postup

1. Charakteristika PEM elektrolyzéru

- Naplňte obě nádržky vodou mezi riskami minima a maxima.
- Připojte elektrolyzér k napájení na stejnosměrný proud podle obrázku 1 a schématu na obrázku 2.
- Je vhodné začít s nejvyšším napětím U=2V. V průběhu může na krátký čas proud překročit hodnotu maximálního stálého proudu I=2A. Přibližně po 1 minutě se hodnoty napětí a proudu ustálí.
- K postupnému snižování proudu z napájení použijte otočný knoflík pro regulaci proudu. V průběhu napájení upravuje hodnoty napětí tak, aby měl proud určenou hodnotu. Tento postup má tu výhodu, že hodnoty napětí a proudu jsou ustáleny rychleji než v elektrolyzéru. Ve chvíli, kdy je otočný knoflík pro regulaci proudu na svém minimu, mohou být dosaženy ještě menší hodnoty pomocí otočného knoflíku pro regulaci napětí. Před zaznamenáváním měřené hodnoty počkejte asi 1 minutu, než se hodnoty napětí a proudu ustálí.

2. Charakteristika PEM palivového článku

- Pro zaznamenání charakteristiky je nejjednodušší připojit palivový přímo k elektrolyzéru. Ačkoliv je také možné použít plyn z plynového zásobníku, jak je

popsáno v odstavci o měření účinnosti.
- Sestavení pokusu je znázorněno na obr.3 a schématem na obr.4.
- Příprava elektrolyzéru: Připojte tenké gumové hadičky, které jsou přibližně 40 cm dlouhé (d=4mm), na horní výstup zásobníků elektrolyzéru. Naplňte oba zásobníky destilovanou vodou nad rysku GAS TEST. V průběhu plnění zásobníku držte hadičky tak, aby se také naplnily vodou. Nasaďte gumové zátky na plastové zásobníky takovým způsobem, aby se nevytvořily vzduchové bubliny a pevně je stiskněte. Namočené zátky nasaďte na kádinky plné destilované vody. Připojte elkrolyzér k napájení, jak je ukázáno na obr. 2 a nastavte proud maximálně na 2A a provozní napětí na maximálně 2V.
- Když je v kádinkách dostatečné množství vodíku a kyslíku, stiskněte krátce konce hadiček, odpojte od zásobníků a připojte k hornímu vstupu palivového článku. Kapky vody, které by mohly být stále přítoné v hadičkách, mohou přerušit dodávku plynu do palivového článku. Pokud se tak stane, výstupní napětí klesne. Zvedněte hadičky krátce tak, aby voda mohla odtéct.
- Údaje palivového článku jsou závislé na průchodnosti plynu a vlhkosti membrány. K vytvoření stálého provozu palivového článku nechte článek běžet přibližně 5 minut bez zátěže a potom přibližně 5 minut se stálou zátěží, např. 2 ohmy.
-Připojte odpory různých velikostí k palivovému článku podle schématu na obr. 4. Pro každý odpor změřte hodnoty napětí U a proudu I. Nejdříve měřte nezatížené napětí a potom měřte případy s nejvyššími hodnotami odporu. Vzhledem k tomu, že vnitřní odpor ampérmetru nemůžeme zanedbat s ohledem na zatížení odporem, vždy použijte měřící rozsah 10-A. Pro odporové hodnoty menší než 1 ohm hodnoty napětí a proudu nemusí být stabilní při nedostatečné dodávce plynu ze zásobníku. Před zahájením měření nechte obvod zapojený přibližně 30 vteřin s dobrou dodávkou plynu. Vyhněte se zkratování palivového článku (max. 10 sekund)!

3. Účinnost PEM elektrolyzéru

- Příprava plynového zásobníku se dvěma plynoměry: plynový zásobník se skládá z Erlenmeyerovy baňky s válcovitou nálevkou a připojené zahnuté skleněné trubičky. Připojte redukční nástavec s krátkým kouskem gumové hadičky (d=6mm) na každou skleněnou trubičku plynoměru. Plňte válcovité nálevky destilovanou vodou, dokud Erlenmeyerovy baňky a skleněné trubičky nejsou naplňeny tak, že neobsahují skoro žádné bubliny. Voda odtéká skleněnou trubičkou a je shromážděna v kádince. Plnící výšky válcovitých nálevek jsou kalibrovány. Je vhodné zkontrolovat přesnost těchto značek tím, že naplníme celou nálevku destilovanou vodou a necháme ji odtéct do odměrného zařízení.
- Sestavení pokusu je ukázáno na obr.5.
- Připojte zhruba 40cm dlouhý kus úzké gumové hadičky (d=4mm) na horní výstup nádržek elektrolyzéru.
- Naplňte obě nádržky nad značku GAS TEST destilovanou vodou. V průběhu držte hadičku tak, aby se také naplnila vodou.
-Gumovou hadičku naplněnou vodou stáhněte svorkou přibližně 2cm od jejího konce a připojte k plynoměru.

- Umístěte gumové zátky na skladovací nádržky takovým způsobem, že se nevytvoří žádné vzduchové bubliny a stiskněte je tak, aby žádný plyn nemohl uniknout.
- Uvolněte svorky.
- Připojte elektrolyzéz ke zdroji napájení podle obr. 2 a nastavte proud přibližně 1A pomocí otočného knoflíku pro regulaci proudu.
- Elektrolyzér tvoří vodík a kyslík v poměru 2:1.

Objem V_{H2} vytvořeného vodíku je měřen jako funkce času t. Začněte měřit čas ve chvíli, kdy voda ve válcovité nálevce (H_2) dosáhne spodní rysky.
- V průběhu elektrolýzy měřte napětí U a proud I.
- Měřte pokojovou teplotu q a okolní tlak p_o.
- K uzavření pokusu vypněte elektrolyzér a uzavřete hadičky plynoměru svorkami.
- Opakování tohoto měření pro jinou hodnotu proudu (např. 2A)může být ulehčeno, pokud ho spojíme s pokusem s palivovým článkem.

4. Účinnost PEM palivového článku

-Ke zjištění innosti PEM palivového článku naplňte oba plynoměry plynem, jak jen je to možné.
Toho dosáhnete tak, že připojíte plynoměry k elektrolyzéru (svorky jsou otevřené). Pracujte s elektrolyzérem s maximálním napětím (2V) nebo maximálním proudem (2A). Pokud výroba plynu přesáhne maximální objemovou kapacitu plynoměru (přibližně 250ml), přebytečný plyn unikne skrze nálevky do atmosféry. Díky tomu může být naplněn nejen plynoměr s H_2, ale i s O_2.
Po naplnění plynoměru vypněte elektrolyzér a pevně sevřete hadičky za elektrolyzérem.
- Oba plynoměry by měly být naplněny přibližně 250ml plynu.
- Sestavte pokus podle obr.6 a schématu na obr.4.
- Pevně sevřete spotní výstup krátkým kouskem hadičky (d=4mm) a svorkou.
- Připojte oba horní vstupy palivového článku k plynoměru.
- Uvolněte svorky na spojení mezi plynojemem a palivovým článkem.
- Připojte zatěžovací odpor 1 Ohm k palivovému článku podle schématu na obr.4.
- Palivový článek spotřebovává vodík a kyslík v poměru 2:1. Měřte objem V_{H2} spotřebovaného vodíku jako funkci času t.

Pozn.: Hodnoty pro napětí a proud nejsou konstantní po delší časový úsek. Od doby, kdy začneme dodávat elektrodě plyn, začíná klesat. Z tohoto důvodu je vhodné měřit čas pro spotřebování 25ml vodíku v každém z měření a vyprázdnění palivového článku vodíkem a kyslíkem mězi měřeními.
- Uvolněte opatrně svorky na spodním výstupu na kyslíkové straně palivového článku a nechte projít přibližně 25ml kyslíku. Utáhněte svorku.
- Poté nechte vodík projít palivovým článkem stejným způsobem do té doby, než hladina vody ve válcové nálevce nedosáhne přibližně 1mm nad kalibrační rysku a utáhněte svorku.

Začněte měřit čas ve chvíli, kdy hladina vody dosáhne kalibrační rysky a ukončete měření ve chvíli, kdy je spotřebováno 25ml vodíku.
- Měřte napětí U a proud I na začátku a na konci časového intervalu.

- Znovu vyprázdněne palivový článek pomocí kyslíku a vodíku a proveďte nové měření pro spotřebování 25ml vodíku.
- Měřte pokojovou teplotu q a okolní tlak p_o.
- Opakování tohoto měření pro jinou hodnotu zátěžového odporu (např. 2 Ohm)může být ulehčeno, pokud ho spojíme s pokusem s elektrolyzérem.

Teorie a výpočty

Hlavní část PEM elektrolyzéru a PEM palivového článku je elektrodová membrána. Vrstva katalyzačního materiálu byla použita na obou stranách tenké proton-vedoucí membrány (PEM= proton exchange membrane). Tyto dvě vrstvy tvoří anodu a katodu elektrochemické buňky.

Na straně anody plynného kyslíku se tvoří elektrony a ionty H^+, když je zapojeno externí napětí. Ionty H^+ jdou skrze proton-vedoucí membránu ke katodě a tvoří pynný vodík a tam s elektrony proudí skrze vnější elektrický obvod.
Palivový článek funguje na inverzním principu. V elektrolýze je elektrická energie přeměněna do chomické energie a je uchována ve formě vodíku a kyslíku; v palivovém článku je chemická energie ve formě vodíku a kyslíku přímo převedena, tj. bez spalovacího procesu, do elektrické energie. Vodík a kyslík reagují za vzniku vody a vydávají elektřinu a teplo.

Jakmile plynný vodík, který je přiváděn na katodu, zoxidován, rozloží se katalytickým působením elektrody (např. platina) na protony a elektrony. Ionty H^+ přejdou skrz proton-vedoucí membránu na stranu katody. Elektrony jdou skrz uzavřený vnější elektrický obvod na katodu a tím vytváří elektrický proud. Plynný kyslík, který je přiváděn na katodu, je redukován. V průběhu toho, je kromě elektronů a protonů vytvářena i voda. Pokud jsou vodík a kyslík přítomny na elektrodě v elektrolyzéru nebo palivovém článku, vzniká mezi dvěma elektrodami rozdíl potenciálů ΔE. To závisí na teplotě, jeho teoretická hodnota se může spočítat z volné entalpie reakce ΔG a je roven ΔE=1,23V při 25°C.

Aby při elektrolýze mohl protékat proud, musí být aplikované napětí velké nejméně tak, jako je teoretické napětí článku. V palivovém článku může být maximální mezní napětí velké, jako je teoretická hodnota. V obou elektrolyzérech a palivovém článku se na elektrodě objevuje dodatečný potenciál. V elektrochemické rovnováze se fázové rozhraní potenciálů mezi elektrodou a membránou vyskytuje také na elektrodách. V průběhu dochází k rovnoměrné výměně nábojů mezi oběma, ale celková reakce je rovna nule. Pokud navíc elektrolyzérem nebo palivovým článkem protéká proud, elektrochemická rovnováha na elektrodách je narušena. Potenciál na elektrodách nabývá jiné hodnoty, která závisí na proudové hustotě vzhledem k různým reakcím na elektrodě. Tato odchylka od rovnovážné hodnoty se nazývá „elektrická polarizace“, např. polarizování elektrody.

Charakteristická křivka elektrolyzéru a palivového článku vykazuje téměř lineární průběh kromě vyšších hodnot proudu. V této oblasti je pohyb iontů přes membránu rozhodující.

Množství látky n uvolněné na elektrodě může být spočítáno užitím Faradayova zákona. (1)

V tomto experimentu vznikají plyny. Objem látky množství n může být určen užitím obecné plynové rovnice. (2)

Pokud proud I protéká elektrolyzérem, následující objem plynu za jednotku času, je určen

rovnicemi (1) a (2).

Aby v palivovém článku mohl vznikat proud, je potřený tento objem plynu za jednotku času.

K určení účinnosti elektrolyzéru a palivovému článku, se elektrická W_{el} a chemická W_{H2} energie spočítá na základě vytvořeného nebo spotřebovaného vodíku. (4), (5)

Rozlišujeme mezi dolním kalorickým obsahem H_U a horním kalorickým obsahem H_O.

Rozdíl mezi nimi je molární entalpie vypařování (kondenzace entalpie) q vody.

Účinnost elektrolyzéru je značně závislá na příslušných provozních podmínkách. Pokud nebyl dlouho používán, může být intenzita proudu při 2V menší, než jak je uvedena v tabulce. Při delší době provozu může být mnohem větší (např. větší než 4A).

Tabulka 1 V-A charakteristika PEM elektrolyzéru

Naměřené hodnoty v tabulce 1 jsou vyneseny na obr. 9. Z lineárního úseku charakteristické křivky je rozkladné napětí U_Z určeno jako průsečík prodloužené přímky s osou U.

U_z=1,60V

Tabulka 2 charakteristická křivka PEM elektrického článku

Účinnost palivového článku je funkcí tlaku plynu, průtoku plynu, vlhkosti membrány a teploty. Naměřené hodnoty v tabulce 2 jsou zobrazeny na obr. 10. Bezzátěžové napětí je U_0=0,93V.

Pro větší hodnoty proudu charakteristická křivka na obr. 10 vykazuje téměř lineární průběh. Pokud se charakteristická křivka odlišuje od lineárního průběhu, je možné, že v této oblasti byly nedostatečné dodávky vodíku a kyslíku do palivového článku.

Tabulka 3 účinnost PEM elektrolyzéru

Naměřené hodnoty v tabulkách 3.1 a 3.2 jsou zobrazeny na obr. 11. Ze sklonu přímek můžeme určit vytvořený objem plynu za jednotku času V_{H2}/t (měřeno).

Ty porovnáme s teoretickými hodnotami z rovnice (3) a z výnosu plynu vypočteme tzv. proudový výtěžek.

Tlak vytvořený ve sloupci vody v plynoměru musí být připočten k naměřenému okolnímu tlaku P_{ok}. To má průměrnou hodnotu přibližně 20HPa. Na druhou stranu je produkovaný vodík nasycen párou, jejíž parciální tlak je 23HPa. Tyto dva efekty se navzájem kompenzují, takže nemusíme provádět žádnou korekci tlaku.

Chybějící plyn je v důsledku difuze ztracen v článku.

Účinnost elektrolyzéru můžeme spočítat užitím rovnic (4) a (5).

Užitím obecné plynové rovnice (2) naměřené hodnoty objemu vodíku V převedeme na množství látky n. Tak získáme následující vztah pro účinnost: (8).

Kromě toho je třeba vzít v úvahu korekční faktor v případě, že objemová značka na plynoměru byla kontrolovaná zařízením měřící objem. V našem případě měření ukázalo toto: 250ml v plynoměru=255ml v měřícím zařízení. $V_{kor}=1{,}02\cdot V_{H2}$.

Tabulka 4: účinnost PEM palivového článku

Tlak vytvořený ve sloupci vody v plynoměru musí být připočten k naměřenému okolnímu tlaku P_{ok}. To má průměrnou hodnotu přibližně 20HPa. Na druhou stranu je produkovaný vodík nasycen párou, jejíž parciální tlak je 23HPa. Tyto dva efekty se navzájem kompenzují, takže nemusíme provádět žádnou korekci tlaku.

$P=P_{ok}$

Teoreticky požadovaný objem plynu určený vztahem (3) srovnejte s naměřenou hodnotou a z toho spočítejte využití plynu.

Chybějící plyn je v důsledku difuze ztracen v článku.

Účinnost palivového článku můžeme spočítat užitím rovnic (4) a (5).

Vzhledem k reakci, ke které dochází v palivovém článku, musíme k výpočtu účinnosti použít horní kalorický obsah H_O. V průmyslu je běžné počítat s dolním kalorickým obsahem H_U, protože se kondenzací vytváří pouze teplo a ne elektrická energie. Tyto dva výsledky jsou porovnány v tabulce 4.4.

Užitím obecné plynové rovnice (2) naměřené hodnoty objemu vodíku V převedeme na množství látky n. Tak získáme následující vztah pro účinnost: (8).

Kromě toho je třeba vzít v úvahu korekční faktor v případě, že objemová značka na plynoměru byla kontrolovaná zařízením měřící objem. V našem případě měření ukázalo toto: 250ml v plynoměru=255ml v měřícím zařízení. $V_{kor}=1{,}02 \cdot V_{H2}$.

Stefanův-Boltzmannův zákon

Klíčová slova

Vyzařování černého tělesa, termoelektrický jev, závislost odporu na teplotě.

Princip

Podle Stefanova-Boltzmannova zákona vyzařování na jednotu plochy a času černého tělesa roste se čtvrtou mocninou absolutní teploty tělesa. Stefanův-Boltzmannův zákon platí i pro tzv. šedé těleso, jehož povrch vykazuje emisivitu nezávislou na vlnové délce a hodnota této emisivity je menší než 1. V tomto pokusu je šedé těleso reprezentováno vláknem žárovky, jehož vyzařování je zkoumáno jako funkce teploty.

Pomůcky

Termočlánek	08479.00	1
Stínící tubus pro 08479.00	08479.01	1
Univerzální zesilovač	13626.93	1
Zdroj proměnný 15 VAC/12 VDC/5 A	13530.93	1
Držák žárovky E 14	06175.00	1
Žárovka 6V/5A, E14	06158.00	3
Propojovací box	06030.23	1
Rezistor, 100Ω	06057.10	1
Optická lavice, l = 60 cm	08283.00	1
Stavitelný podstavec pro opt. lavici	08284.00	2
Držák přístrojů pro opt. lavici, h 30 mm	08286.01	2
Digitální multimetr	07134.00	3
Propojovací kabel, 500 mm, modrý	07361.04	4
Propojovací kabel, 500 mm, červený	07361.01	4

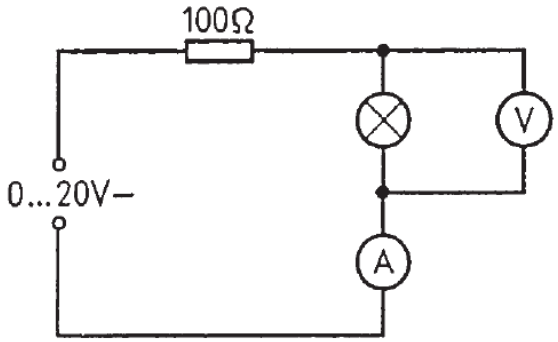
Úkoly

1. Změřit odpor vlákna žárovky při pokojové teplotě a zjistit odpor tohoto vlákna při 0 °C.

2. Změřit intenzitu záření vlákna při různých napětích. Odčíst proud při každém napětí a vypočítat odpovídající odpor daného vlákna. Z předpokládané závislosti odporu na teplotě druhého řádu vypočítat příslušné teploty vlákna.

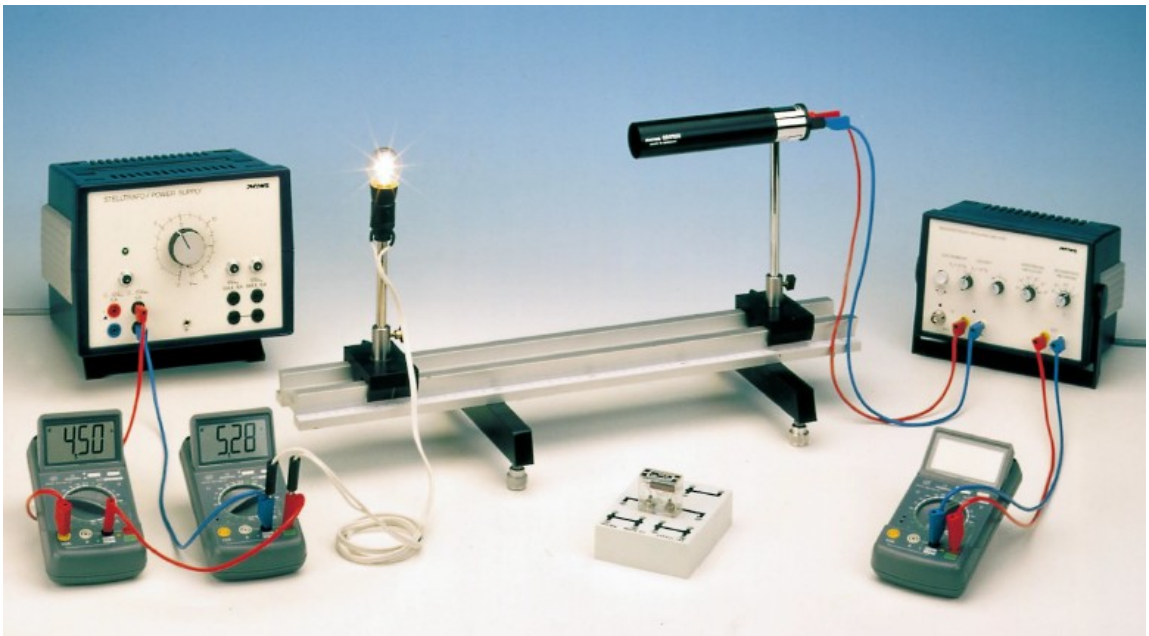
Sestavení a provedení experimentu

Začneme sestavením obvodu podle obr. 1, měříme odpor vlákna při pokojové teplotě. Rezistor (100Ω) je připojen k žárovce sériově, což umožňuje jemné upravování proudu. Odečítáme úbytek napětí na vlákně pro stejnosměrné proudy I_1=100mA a I_2=200m. Z těchto dat pak vypočítáme odpor při pokojové teplotě. Hodnoty proudu jsou dostatečně malé na to, abychom mohli zanedbat ztráty způsobené ohřevem vlákna.



Obrázek 1:Schéma zapojení obvodu pro měření odporu vlákna

Poté sestavíme samotný experiment podle obr. 2. Rezistor z předchozího měření už v obvodu není zapojen. Žárovka je nyní připojena ke zdroji měnitelného střídavého napětí přes ampérmetr, který umožňuje měření měnícího se proudu (až do 6 A). Voltmetr připojíme paralelně k žárovce a poté krokově zvyšujeme napětí od 1 až do 8 V, vždy po 1 V.



Obrázek 2: Sestavení experimentu

Nejprve nastavíme napětí 1 V. Čidlo s termočlánkem je pevně fixováno k lavici ve vzdálenosti 30 cm od žárovky. Žárovka je následně postupně vytáčena lehce vpravo a vlevo, dokud nenajdeme pozici, ve které je vyzařování maximální. Osa vlákna by měla být kolmá na osu optické lavice. Protože termoelektrický jev se dává napětí v řádu jednotek milivoltů, je nutné pro přesné měření použít zesilovač. Zesílení nastavíme na 10^2 až 10^3 s ohledem na to, že připojený voltmetr budeme mít nastaven na rozsah 10 V. Pro dosažení stabilního údaje čidla a přesné „nuly“, sundáme žárovku na několik minut z optické lavice. Zesilovač nastavíme na mód LOW DRIFT ($10^4\Omega$) s časovou konstantou 1s.

Poté nasadíme lžárovku zpátky a započneme měření. Odečítání hodnot musí být provedeno, až se termočlánek ustálí, což trvá přibližně 1 minutu. Musíme dát pozor na to, aby měření neovlivňovalo jiné záření, než vycházející ze žárovky.

Poznámka: Napětí dodávané žárovce by nemělo být vyšší než 6 V. Napětí v rozmezí 6-8V může být aplikováno pouze pro dobu několika minut.

Teorie a vyhodnocení

Pokud je intenzita vyzařování černého tělesa (emitovaná energie na jednotku plochy a času, při teplotě *T* a vlnové délce λ na intervalu $d\lambda$) je stanovena jako $dL(T, \lambda)/d\lambda$.

Podle Planckova zákona:

$$\frac{dL(\lambda,T)}{d\lambda} = \frac{2c^2 h\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kt}-1}}$$

kde:	$c=3{,}00\cdot10^{8}\ m\cdot s^{-1}$	rychlost světla
	$h=6{,}62\cdot10^{-24}\ J\cdot s$	Planckova konstanta
	$k=1{,}381\cdot10^{-23}\ J\cdot K^{-1}$	Boltzmanova konstanta

Integrováním předchozího vztahu přes celkovou vlnovou délku od λ=0 do λ=∞ dostáváme intenzitu vyzařování L(T) (Stefan-Boltzmanův zákon).

$$L(T) = \frac{2\pi^4}{15} \cdot \frac{k^4}{c^2 h^3} \cdot T^4$$

$$L(T) = \sigma \cdot T^4$$

kde: $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-2}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

Úměrnost $L \sim T^4$ je platná také pro tzv. šedé těleso, které vykazuje emisivitu nezávislou na vlnové délce menší než 1.

Abychom dokázali platnost Stefan-Boltzmanova zákona změříme záření emitované vláknem žárovky, které docela dobře reprezentuje šedé těleso. Pro danou vzdálenost mezi vláknem žárovky a termočlánkem platí úměrnost mezi tokem energie ϕ a intenzitou vyzařování L(t).

$$\Phi \sim L(T)$$

Jelikož existuje úměrnost mezii ϕ a U_{therm} termočlánku můžeme psát:

$$U_{therm} \sim T^4$$

což platí při teplotě 0 K. Protože termočlánek sám o sobě při pokojové teplotě vyzařuje, musíme podle předchozího zákona psát:

$$U_{therm} \sim (T^4 - T_R^4)$$

Za podmínek našeho pokusu můžeme T_R^4 vzhledem k T^4 zanedbat.

$$\log U_{therm} = 4 \log T + const$$

Absolutní teplota $T = t + 273$ je vypočítána s pomocí měřeného odporu $R_{(t)}$ wolframového vlákna žárovky (t je teplota ve °C). Odpor vlákna je závislý na teplotě podle následujícího vztahu:

$$R_{(t)} = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

kde:

$$\alpha = 4{,}82 \cdot 10^{-3} \cdot K^{-1}$$
$$\beta = 6{,}76 \cdot 10^{-7} \cdot K^{-2}$$

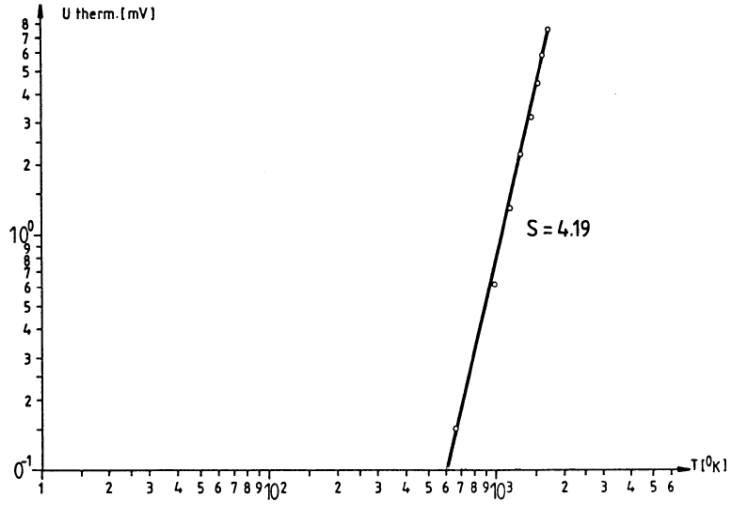
Odpor R_0 při teplotě 0°C pak můžeme vypočítat ze vztahu:

$$R_0 = \frac{R_{(t_R)}}{1 + \alpha t_R + \beta t_R^2}$$

S využitím předchozího vztahu a závislosti $T = t + 273$ dostáváme:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta}\left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta\left(\frac{R_{(t)}}{R_0} - 1\right)} - \alpha\right]$$

$R_{(t_R)}$ a R_0 vypočítáme za pomoci Ohmova zákona, např. z měření proudu a napětí na vlákně žárovky.



Obrázek 3: Závislost napětí na termočlánku a na absolutní teplotě vlákna žárovky

1. Použili jsme stejnosměrného napětí při hodnotách proudu 100 mA nebo 200 mA, který byl dodáván vláknu přes 100 Ω rezistor. Odpovídající úbytky napětí byly 16,5 mV a 33,0 mV. Pokud zdvojnásobíme proud, zdvojnásobí se také úbytek napětí, což dokazuje, že vliv teploty na odpor vlákna je zanedbatelný při zvolených hodnotách stejnosměrného proudu. V tomto případě:

   $$R_{(t_R)} = 0{,}165\ [\Omega]$$

   a následně:

   $$R_0 = 0{,}15\ [\Omega]$$

   Malé odchylky R_0 ovlivní sklon křivky, ale jen zanedbatelně.

2. V druhém úkolu zvyšujeme střídavé napětí krokově po 1 V od 0 do 8 voltů, což přináší tyto výsledky:

U[V]	I[A]	U_{therm}[mV]	T[K]
1	2,20	0,15	672
2	2,80	0,62	983
3	3,45	1,30	1160
4	4,00	2,20	1300
5	4,45	3,20	1430
6	4,90	4,45	1540
7	5,30	5,90	1630
8	5,70	7,50	1720

Grafické znázornění závislosti vyzařování na teplotě vlákna je znázorněna logaritmicky v grafu (Obr. 3). Směrnice S je vypočítána s regresí:

$$S = 4{,}19 \pm 0{,}25\mathbf{6}$$

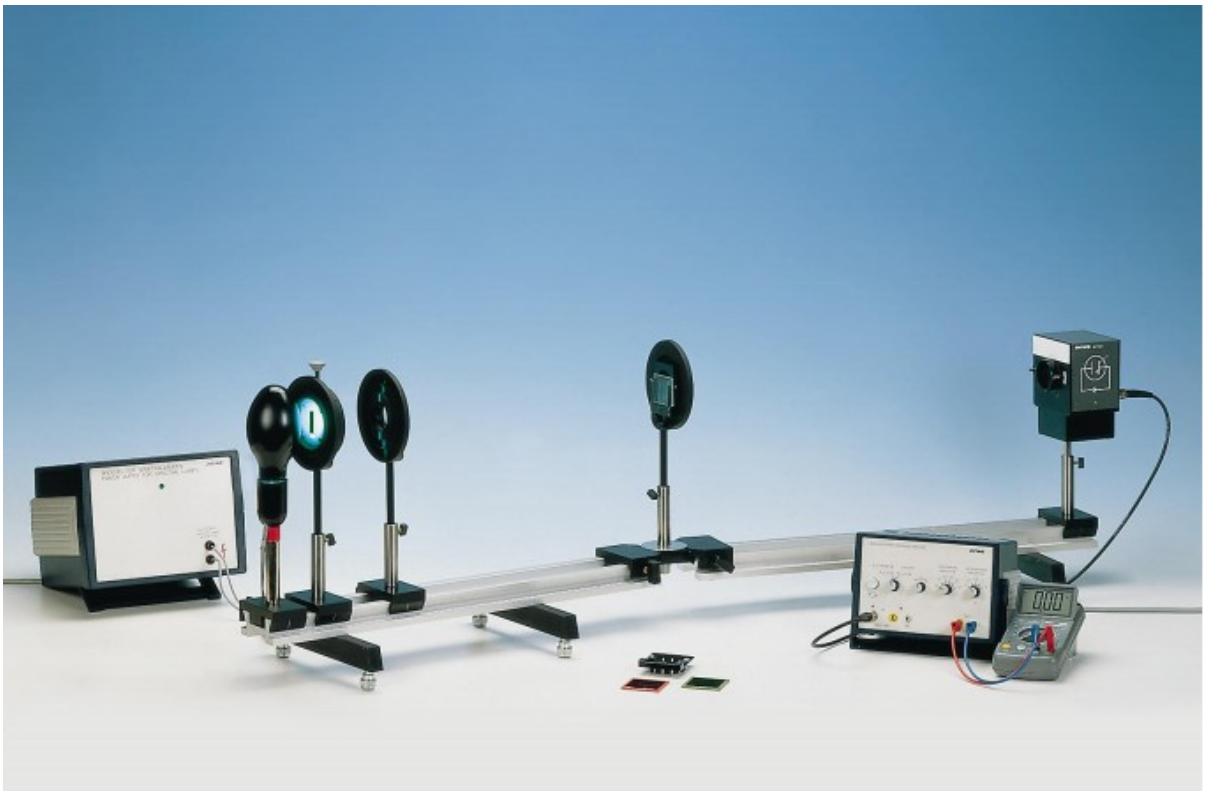
Přesná hodnota S by měla být 4. V našem případě je odchylka v mezích vypočítané chyby.

Určení Planckovy konstanty pomocí fotoelektrického jevu

Související témata:
Externí fotoelektrický jev, výstupní práce elektronu z kovu, absorpce, energie fotonu

Princip a úkol:
Fotocitlivý prvek - fotonka je postupně osvětlován monochromatickým světlem různých vlnových délek. U fotonky dochází v důsledku dopadu světelného záření vhodných vlnových délek k podstatným změnám elektrických vlastností. Jde o tzv. fotoelektrický jev, který je založen na tom, že při osvětlení látky dojde k uvolnění nábojů. Planckovu konstantu lze změřit na základě měření hodnot tzv. brzdného napětí a pomocí vztahů pro fotoelektrický jev.

Zařízení
Fotocitlivý prvek - fotonka
Difrakční mřížka 600 čar/mm
Diafragma – kruhová clona (s uzávěrkou) zachycující okrajové paprsky
Barevné interferenční filtry 580 nm, 525 nm
Optická lavice - otočná
Držák clony, nastavitelná štěrbina,
Držák čoček a držák barevných filtrů
Čočky s ohniskovou vzdáleností f +100 mm
Vysokotlaká rtuťová výbojka 80 W
Stíněný BNC kablík
Propojovací vodiče, 250 mm,
Zdroj pro spektrální výbojku
Univerzální zesilovač
Digitální multimetr



Obr. 1 : uspořádání experimentu

Sestavení a postup měření:

Obr. 1 ukazuje experimentální uspořádání experimentu.

1) Umístěte rtuťovou výbojku a fotonku na příslušné konce optické lavice
2) Difrakční mřížku vložte do držáku a upevněte otáčením otočného čepu
3) Umístěte štěrbinu ve vzdálenosti asi 9 cm, čočkou ve vzdálenosti cca 20 cm, zaostřete štěrbinu na fotonku v rovině okénka
4) Vyberte štěrbinu takové šířky, aby obraz štěrbiny byl asi 1 cm (pro snazší nastavení upevněte zde průhlednou lepicí páskou proužek papíru o šířce 3 cm, s jeho pomocí můžete pozorovat i jinak neviditelné UV čáry, které se projeví jako mírná fluorescence papíru)
5) Posouváním nosného ramene fotonky pomocí stavěcího šroubu můžeme nastavit fotonku na jednu vybranou barvu (vlnovou délku) dopadajícího světla. Postupně pokryjte barevnými obrazy štěrbiny vstup clony a po několika sekundách určete odpovídající úroveň napětí. Pro omezení zkreslení měření difrakcí druhého řádu pro žluté a červené spektrální čáry nasaďte na objímku ještě před clonu barevné interferenční filtry (525-nm sklíčko pro žluté spektrální čáry a 580-nm sklíčko pro červené spektrální čáry).
6) Před každým měřením vybijte vstupní kondensátor zesilovače a zkontrolujte jeho nulový bod při uzavřené cloně. Obvykle se k tomu užívá nulovací tlačítko (na měřícím zesilovači zcela vlevo).
7) Přibližně po deseti minutách je měřicí zesilovač připraven k použití.
8) Spektrální výbojku zapojíme na napájecí zdroj, fotoprvek na zesilovač. Nastavení parametrů měření:

   Měřící zesilovač nastavte do režimu - elektroměr: $Re > 10^{13}\ \Omega$

   zesílení = 100

   časová konstanta = 0

   multimetr – voltmetr: 2 V DC

Teorie a rozbor

Při ozáření kovového tělesa světlem dostatečně vysoké frekvence vystupují z jeho povrchu „vyražené“ elektrony (fotoelektrický jev). Počet těchto elektronů je úměrný intenzitě dopadajícího světla, jejich energie (kinetická) však závisí pouze na frekvenci světla. Vysvětlení fotoelektrického jevu podal v r.1905 Einstein a znamenalo začátek vývoje kvantové fyziky. Podle kvantové fyziky si můžeme světlo o frekvenci f představit jako proud mnoha stejných částic (fotonů) s energií o velikosti hf. Fotonku tvoří skleněná vakuovaná baňka, jejíž stěny jsou kromě vstupního okénka postříbřeny. Proti vstupnímu okénku je nanesena citlivá vrstva schopná fotoemise. Tato vrstva je z draslíku naneseného na vhodné kovové podložce a představuje katodu. Kolem je kruhovitě umístěna anoda. Pokud foton vstupujícího světla dopadne na katodu, pak v případě, že přináší dostatek energie, může uvolnit elektron z katody. Některé z uvolněných elektronů mohou dosáhnout anodu. Mezi anodou a katodou se po krátkém (nabíjecím) čase dosáhne mezní napětí. Elektrony se budou pohybovat proti elektrickému poli (napětí U) jen, pokud budou mít dostatečnou kinetickou energii.

Elektron uvolněný fotonem o frekvenci f nabývá podle zákona zachování energie maximální kinetickou energii

$$E_K = h f - A$$

kde h je Planckova konstanta a A výstupní práce daná materiálem kovu. Tato výstupní práce odpovídá mezní energii, jakou dopadající světlo musí mít, aby k uvolnění elektronů v daném materiálu vůbec došlo.

Kinetická energie uvolněných elektronů odpovídá práci vnějšího elektrického pole fotonky, ve kterém se elektrony nacházejí, jsou-li pod napětím tohoto vnějšího pole U

$$eU = h f - A$$

Celkově tedy získáváme vztah mezi napětím U a frekvencí světla f, s přihlédnutím ke vztahu mezi frekvencí a vlnovou délkou světla také vztah mezi napětím a vlnovou délkou světla λ

$$U = \frac{h}{e} - \frac{A}{e} \wedge \quad = \frac{c}{\lambda}$$, kde $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ As.

Fotonka je osvětlována monochromatickým světlem různých vlnových délek, které propouštějí interferenční filtry postupně osazované na světelný vstup.

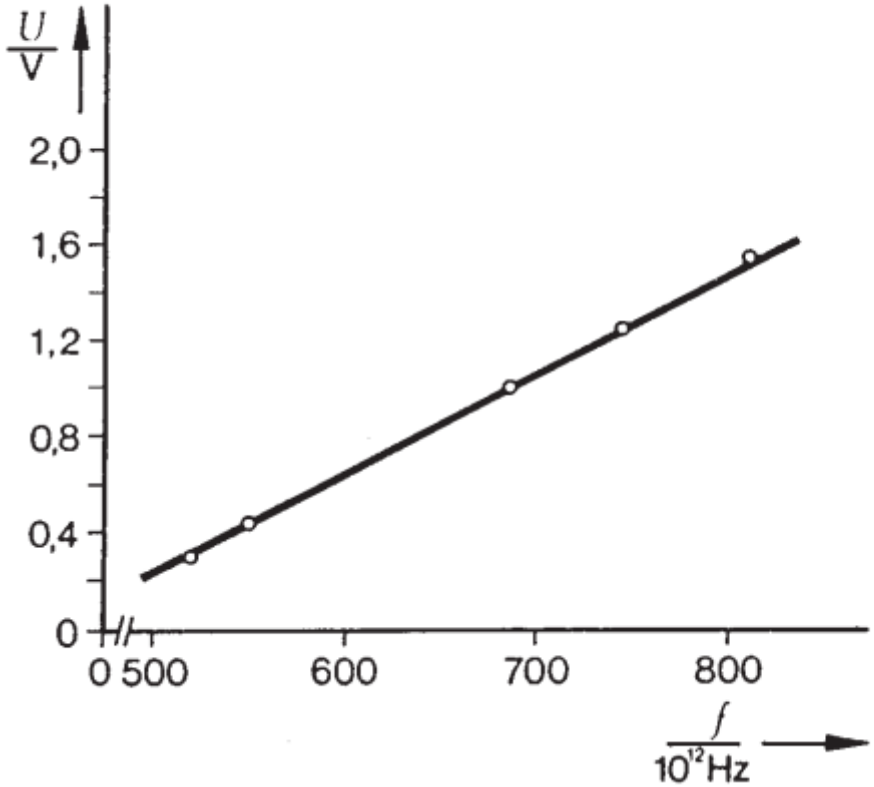
Opakováním měření pro různé frekvence, tj. různé vlnové délky světla získáme lineární funkci *U=U(f),* a ze směrnice této přímky pro vlnové délky

$$tg\alpha = \frac{h c}{e}$$

můžeme výpočtem určit Planckovu konstantu ***h***

$$h = \frac{e\, tg\alpha}{c}$$

Fig. 2: Voltage of the photo-cell as a function of the frequency of the irradiated light.



Poznámka

An additional contact potential ϕ occurs because the surfaces of the anode and cathode are different:

$$eU + \phi = \frac{m}{2} v^2$$

If we assume that A and ϕ are independent of the frequency, then a linear relationship exists between the voltage U (to be measured at high impedance) and the light frequency f:

$$U = -\frac{A + \phi}{e} + \frac{h}{e} f$$

If we assume $U = \alpha + bf$ to the values measured in Fig. 2 we obtain:

$$h = 6.7 \pm 0.3 \cdot 10^{-34}$$

Literature value: $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js.