

8. MĚŘENÍ MAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY PARAMAGNETICKÝCH A DIAMAGNETICKÝCH LÁTEK

Měřicí potřeby

- 1) poloautomatické analytické váhy WA33
- 2) zdroj napětí pro elektromagnety
- 3) malý a velký elektromagnet
- 4) měřené vzorky: molybden, tantal, vizmut
- 5) katetometr
- 6) U-trubice, pipeta, nádobka s destilovanou vodou

Obecná část

Magnetickou susceptibilitu κ definujeme pro látky paramagnetické a diamagnetické pomocí výrazu

$$\mu_0 \frac{dm}{dV} = \kappa \mathbf{B} , \quad (1)$$

kde dm je (Ampérův) magnetický moment látky o objemu dV , μ_0 je permeabilita vakua, \mathbf{B} je magnetická indukce v místě kde se nachází daná látka. Veličina dm/dV se nazývá magnetizace (viz např. [1], str. 625). Vzhledem k definici (1) se tato susceptibilita nazývá též susceptibilitou objemovou a je veličinou **bezrozměrnou**. (Často se též zavádí susceptibilita hmotná, atomová a molekulová – viz např. [2])

Metody měření susceptibility jsou nejčastěji založeny na silových účincích nehomogenního magnetického pole na vzorek materiálu. Platí zde přímá úměra mezi susceptibilitou měřeného vzorku a silou, jíž je paramagnetický vzorek vtahován do míst s větší intenzitou pole. Diamagnetický vzorek je z těchto míst naopak vypuzován. Používají se i jiné metody (zejména indukční), podrobný popis lze nalézt v [2].

Síla $d\mathbf{F}$, která působí na element hmoty o objemu dV v poli s magnetickou indukcí \mathbf{B} , je dána vztahem:

$$d\mathbf{F} = \text{grad}(dm \cdot \mathbf{B}) . \quad (2)$$

Bude-li měřený vzorek dostatečně tenký a umístíme-li jej mezi póly magnetu do roviny symetrie magnetického pole yz (obr. 1), bude mít magnetická indukce \mathbf{B} ve vzorku pouze složku B_x ve směru osy x . Magnetický moment dm bude mít vzhledem k rovnici (1) také jen složku dm_x . Vztah (2) se tímto výrazně zjednoduší:

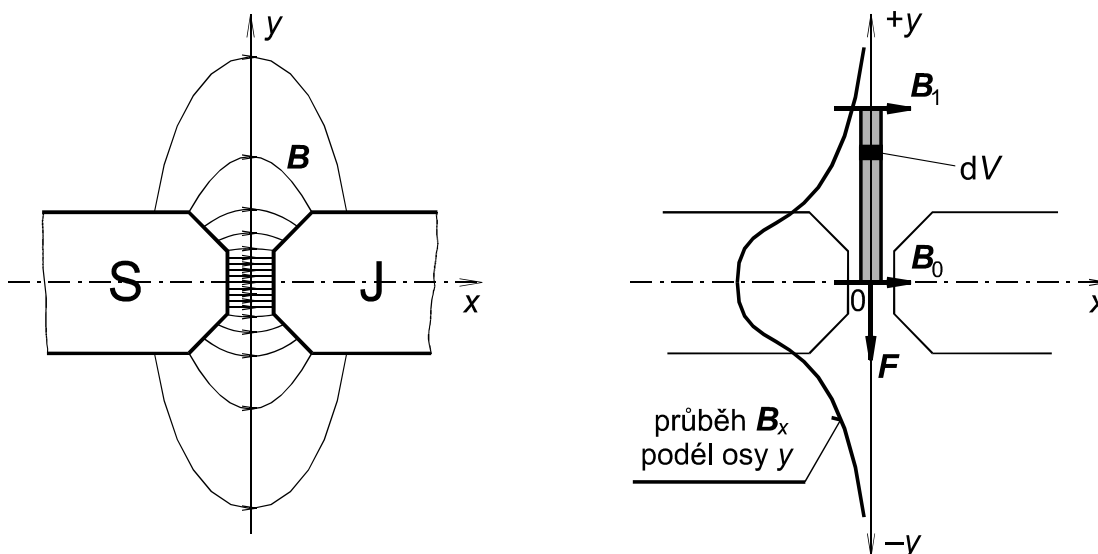
$$d\mathbf{F} = \text{grad}(dm_x B_x) . \quad (3)$$

Magnetická indukce \mathbf{B} ve vzorku se mění jen ve směru osy y , takže síla \mathbf{F} má nenulovou pouze složku F_y :

$$dF_y = \frac{\partial(dm_x B_x)}{\partial y} = dm_x \frac{\partial B_x}{\partial y} . \quad (4)$$

Vyjádríme-li objem dV pomocí průřezu vzorku S , pak z rovnic (1) a (4) vychází:

$$dF_y = \frac{\kappa B_x}{\mu_0} dV \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\kappa B_x}{\mu_0} S dy \frac{\partial B_x}{\partial y} . \quad (5)$$



Obr. 1 Tvar siločar magnetického pole a umístění vzorku mezi pólovými nástavci

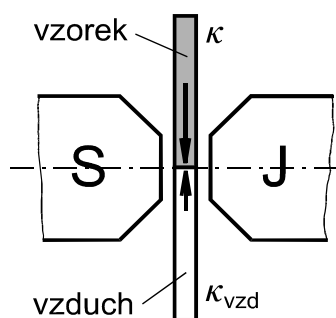
Vzorek je umístěn v magnetu tak, aby jeho konec procházel bodem 0 ve středu pólových nástavců a jeho osa splývala s osou y . Potom celková síla působící na vzorek je dána integrací vztahu (5) podél celého vzorku:

$$F = \int_0^{y_1} \frac{\kappa S}{\mu_0} B_x \frac{\partial B_x}{\partial y} dy = \frac{\kappa S}{\mu_0} \int_{B_0}^{B_1} B_x dB_x$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{\kappa S}{\mu_0} (B_1^2 - B_0^2) . \quad (6)$$

Pole mimo magnet je již velmi malé, $B_1^2 \ll B_0^2$, a tak můžeme B_1 zanedbat:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{\kappa S}{\mu_0} B_0^2 . \quad (7)$$



Obr. 2

Magnetické pole nepůsobí jen na vzorek, ale také na okolní vzduch, jenž má kladnou susceptibilitu $\kappa_{\text{vzd}} \approx 0,369 \cdot 10^{-6}$. V důsledku toho vzniká v ose pólových nástavců mírný "přetlak", který působí silou na spodní plochu vzorku proti síle F_y . Pro výpočet tohoto vlivu si můžeme představit vzorek vzduchu stejných rozměrů jako měřený vzorek, ale umístěný na opačné straně (obr. 2). Aplikací stejného postupu pak

dostaneme výslednou sílu:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{\kappa S}{\mu_0} B_0^2 + \frac{1}{2} \frac{\kappa_{\text{vzd}} S}{\mu_0} B_0^2 = (\kappa_{\text{vzd}} - \kappa) \frac{S B_0^2}{2 \mu_0} , \quad (8)$$

a odtud:

$$\kappa = \kappa_{\text{vzd}} - \frac{2\mu_0 F}{SB_0^2} . \quad (9)$$

Při výpočtech z naměřených hodnot je třeba si promyslet orientaci a znaménko dosazované síly. Pokud je vzorek **vtahován** mezi pólové nástavce, má síla **záporné** znaménko a susceptibilita je podle (9) **kladná**.

Měření

A. Měření susceptibility pevných látek

Sílu F lze určit nejspíše vážením vzorku na přesné váze při vypnutém a zapnutém magnetickém poli. Síla se určí z rozdílu naměřených hmotností:

$$F = (m_{\text{vyp}} - m_{\text{zap}})g , \quad (10)$$

kde g je gravitační zrychlení.

Měření hmotnosti budete provádět na analytických váhách (viz kap. „Přístroje užívané ve fyzikálním praktiku“ v úvodní části skript). Vzorek se zavěsí na vahadlo do mezery elektromagnetu tak, aby se nikde nedotýkal. Při měření se pak střídavě zapíná a vypíná předem nastavený proud do elektromagnetu a odečítají se příslušné hmotnosti. Tak získáte jistý počet hodnot síly z nichž vypočtete aritmetický průměr a příslušnou směrodatnou chybu. Informace o rozměrech, materiálu vzorků a velikosti magnetického pole v elektromagnetech jsou přiloženy u úlohy.

Výslednou chybu vypočtené magnetické susceptibility lze odvodit ze vztahu (9) standardním postupem (viz kap. „Chyby měření“, odst. C). Uvádíme zde již odvozený vztah pro směrodatnou relativní chybu mag. susceptibility:

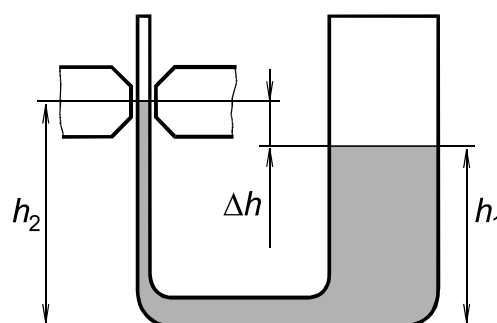
$$\xi\kappa = \sqrt{(\xi F)^2 + (\xi S)^2 + (2\xi B_0)^2} , \quad (11)$$

přičemž zanedbatelné chyby $\xi\kappa_{\text{vzd}}$, $\xi\mu_0$, ξg jsou vynechány.

B. Měření susceptibility kapalin

Měří se pomocí metody hydrostatické, zvané Quinckova – podle autora, který ji poprvé uveřejnil v r. 1889. Metoda se používá i k měření susceptibility plynů.

Kapalina se nalije do U-trubice jejíž jedno rameno (obr. 3) se umístí mezi pólové nástavce magnetu. Množství kapaliny se volí takové, aby hladina byla při zapnutém magnetickém poli přesně uprostřed pólových nástavců. Druhé rameno je mimo magnetické pole a má mnohem větší průřez, takže změna výšky hladiny v úzkém rameni (tenká kapilára) prakticky neovlivní výšku hladiny v širokém rameni. Posune-li se hladina kapaliny vlivem magnetického pole v úzké trubici o výšku $\Delta h = (h_1 - h_2)$, pak síla která toto posunutí způsobila se musí rovnat tíze sloupce kapaliny právě této



Obr. 3

výšky:

$$F = S(h_1 - h_2)\rho g \quad (12)$$

dosadíme-li vztah (12) do vztahu (9) vyjde:

$$\kappa = \kappa_{\text{vzd}} - \frac{2\mu_0 g \rho}{B_0^2} (h_1 - h_2) \quad (13)$$

Relativní chybu ke vztahu (13) si odvodíte sami, přičemž můžete zanedbat velmi malé chyby veličin κ_{vzd} , μ_0 a g .

Důležitou podmínkou měření je dokonalé odmaštění měřicí kapiláry (nejlépe horkou koncentrovanou kyselinou chrom-sírovou nebo alespoň dusičnou). Povrchové napětí mezi nečistotami v kapiláře a kapalinou totiž zabraňuje volnému pohybu – kapalina v kapiláře „zamrzá“. Dále je důležité u přesných měření odplynit měřenou kapalinu (převařením), abychom neměřili susceptibilitu směsi kapalina–vzduch.

Vlastní měření provádějte podobným způsobem jako u pevných vzorků. Pro měření výšky hladiny kapaliny použijte katetometr (viz kap. „Přístroje užívané ve fyzikální praktikě“). Příprava aparatury k měření je popsána u úlohy.

Pracovní úkol

- 1) Určete magnetickou susceptibilitu dvou pevných vzorků vážením. Vážení provádějte 10×.
- 2) Určete magnetickou susceptibilitu vody Quinckovou metodou. Měření provádějte opět 10×.
- 3) Stanovte chyby měření a výsledky uveďte ve standardním tvaru.
- 4) Srovnajte s tabulkovými hodnotami. Srovnajte procentní přesnost tabulkových hodnot s přesností vašeho měření.

Literatura

- [1] Horák, Z., Krupka, F.: Fyzika, SNTL 1981.
[2] Brož, J. a kol.: Základy fyzikálních měření (II)B