

Hrátky s kapalným dusíkem – dodatek

MILOŠ ROTTER

MFF UK Praha

Pokusy s kapalným dusíkem předváděné na minulých Veletrzích byly popsány již v předchozích sbornících. V letošním roce mohli účastníci spatřit i několik dalších pokusů, které jsem našel v literatuře nebo je převzal od kolegů.

Leidenfrostův jev

Předvádění tance kapiček kapalného dusíku na stolní desce, na podlaze, na misce a ještě lépe na dlani demonstrátorově vyvolává vždycky nadšenou pozornost diváků.

Je zřejmé, že příčinou tohoto jevu je klouzání kapky na izolující vrstvičce dusíkových par, jejichž tepelná vodivost je více než čtrnáctkrát menší než vodivost kapalného dusíku. Připomíná se též analogie s chováním kapiček vody na rozpálené plotně. To je také historicky první pozorovaný projev Leidenfrostova jevu. Patrně nejstarší zmínka o tomto jevu z roku 1732 pochází od Hermanna Boerhaave z Leidenu. Svě jméno získal jev podle Johanna Gottloba Leidenfrosta, který jej popsal v latinsky psaném traktátu *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* publikovaném v Duisburgu v roce 1756.



Johann Gottlob Leidenfrost se narodil v roce 1715 v městečku Rospewenda, v německém kraji Sasko – Anhaltsko, v rodině evangelického faráře. J. G. Leidenfrost studoval nejprve teologii a poté medicínu na univerzitách v Giessenu, Lipsku a Halle, kde také v roce 1741 promoval na základě práce o pohybu lidského těla. Cestoval po různých univerzitách, sloužil také jako polní lékař v první slezské válce. V roce 1743 získal místo profesora medicíny na univerzitě v Duisburgu. Tam se také v roce 1745 oženil s Annou Cornelií Kalckhoffovou a měli spolu 7 dětí. Leidenfrost vyučoval kromě medicíny také fyziku a chemii, publikoval více než 70 prací, od roku 1751 byl několikrát zvolen rektorem univerzity. Zemřel v Duisburgu v roce 1794.

Leidenfrost prováděl své pokusy se železnou lžičkou rozpálenou v krbu do červeného žáru. Dobu, po kterou kapka vody na lžičce vydržela, než se odpařila, měřil pomocí počtu kyvů kyvadélka. Na internetových stránkách můžete nalézt řadu návodů i k velmi nebezpečným pokusům, jejichž opakování čtenářům nedoporučuji. Profesor Jearl Walker z univerzity v Clevelandu některé pokusy z Leidenfrostovým jevem popisuje a zmiňuje se také o úrazech, k nimž může při jejich provádění dojít. Zopakoval také pokus s „dobou života“ vodní kapky v závislosti na teplotě podložky. Zjistil, že nejdéle vydrží vodní kapka při teplotě tzv. Leidenfrostova bodu, tedy asi 220 °C, přičemž doba prudce vzroste nad 200 °C a při vyšších teplotách zvolna klesá. Relativně vysoká teplota Leidenfrostova jevu je zřejmě nezbytná k tomu, aby při dopadu kapky na podložku došlo k prudkému odparu kapaliny a vytvoření dostatečné vrstvy par, které kapku nadnášejí a tepelně ji izolují od horké podložky. Při ještě vyšších teplotách přítok tepla zářením vycházejícím z podložky způsobuje zrychlení odparu kapky. Leidenfrostův jev se významně uplatní při průběhu varu vody, jak jej můžeme na příklad pozorovat ve varné konvici. Zpočátku se z ohřívané vody uvolňují bublinky vzduchu absorbovaného ve vodě, poté ode dna stoupají bublinky vodních par, které vznikají na nukleačních jádrech, jimiž jsou nerovnosti povrchu ohřívaného dna. Bublinový var posléze prostoupí celým objemem kapaliny, voda vře. Při vyšších teplotách se uplatní Leidenfrostův jev a vytvoří se při ohřívané ploše izolující vrstva par a rychlost odparu klesne. To může velmi nepříznivě působit ve výměnících tepla, kdy se podstatně sníží schopnost chladicí vody odnímat teplo ohřátému tělesu.

Autor článku popisuje také své pokusy s horkým olovem. Ověřil, že je možné ponořit vlhkou ruku do roztaveného olova ohřátého na teplotu alespoň 400 °C, tedy vysoko nad teplotu tání 328 °C. Postačí však, aby prsty byly příliš suché a nemohla se tudíž vytvořit ochranná vrstva vodních par nebo aby olovo nebylo dostatečně horké a následují ošklivé popáleniny. Přítomností Leidenfrostova jevu se dá také vysvětlit zázračná schopnost některých zasvěcených jedinců projít bez popálenin bosýma nohama po žhnoucích uhlících. Autor článku tento pokus několikrát vyzkoušel a skončil nakonec s nepříjemnými popáleninami. Domnívá se, že k popálení došlo proto, že se už přestal bát a na jeho chodidlech se již nevytvořila dostatečná ochranná vrstvička potu ze strachu z popálení. Autor zkusil také nabrat trochu kapalného dusíku do úst a vydechnout oblak par, jak je to na některých internetových stránkách popsáno. Na rozdíl od drobných popálenin se popraskaná zubní sklovina nevyléčí ani po dlouhé době. Prosím tedy nezkoušet!

Pohyb na magnetické polštáři – MAGLEV

Dostupnost velkých a kvalitních vysokoteplotních supravodičů Y-Ba-Cu-O a zároveň velkých a silných permanentních magnetů ze slitiny Nd-Fe-B nám umožnila sestavit jednoduchý principiální model dopravního prostředku pohybujícího se na magnetickém polštáři zvaného MAGLEV (Magnetic Levitation Vehicle). Pomocí mosazné kostry jsme sestavili řádku hranolových magnetů s rozměry 40 mm x 20 mm x 10 mm upevněných tak, aby jejich pole byla souhlasně orientována kolmo k řádce. Bez záchytné kostry by se magnety zhroutily a přitáhly nesouhlasnými póly k sobě.

Supravodič o průměru 28 mm a výšce 10 mm se ochladí v polystyrénové nádobce umístěné pod řádkou magnetů.



Supravodič projeví Meissnerův – Ochsenfeldův jev, bude tedy vytlačován z magnetického pole. Zároveň se však chová jako supravodič 2. druhu, do něhož proniká magnetický indukční tok prostřednictvím soustavy vířů. Projevuje se tedy také jako zmagnetované těleso a drží se v jisté rovnovážné vzdálenosti od magnetu. Tento jev jsme si již dříve předváděli závěsem ochlazeného supravodiče pod magnetem. Převrátíme řádku magnetů a supravodič se bude nad nimi vznášet a volně se pohybovat vlivem tíže, když řádku nakloníme. Pozoruhodné je, že supravodič je udržován nad řádkou magnetů a nespadne, ani když dopluje na kraj řádky. Levitační dopravní prostředek by ke svému pohybu potřeboval ještě horizontální pohon, k čemuž se dá využít lineární střídavý motor.

Brždění vířivými proudy

Účinku vířivých proudů, jež vznikají ve vodiči, na který působí proměnné magnetické pole, se využívá k brždění elektromotorů, tlumení kmitů vah nebo ručkových měřicích přístrojů. Vlivem časově proměnného indukčního toku vzniká elektromotorické napětí, které ve vodiči vyvolá proudy, někdy nazývané Foucaultovými. Příkon těchto proudů je odebírán kinetické energii pohybujícího se tělesa, čímž se snižuje jeho rychlost. Přenesený výkon je úměrný rychlosti změny magnetického pole a to dokonce v druhé mocnině a je také přímo úměrný elektrické vodivosti bržděného tělesa. Jistě jste viděli, jak nepřírozně pomalu padá hliníková deska vložená mezi póly nabuzeného elektromagnetu.

Náš pokus je veden z opačné strany. Vodivé těleso stojí a padá permanentní magnet. Používáme měděnou trubku o průměru 20 mm a permanentní magnet ze slitiny Nd-Fe-B o průměru 10 mm. Pustíme-li magnet na měkkou podložku z výšky asi 45 cm, což je délka naší trubky, dopadne na podložku ve zlomku sekundy. Necháme-li jej však padat vnitřkem svisle postavené trubky, trvá pád asi 2 sekundy. Ponoříme-li trubku do kapalného dusíku v polystyrénovém džbánu, sniží se teplota mědi z přibližně 300 K alespoň na 100 K. Ponořená je jen část trubky a zbytek se ochladí vedením tepla. Elektrická vodivost mědi se zvýší zhruba šestkrát. Po ochlazení trubky necháme opět magnet padat vnitřkem svisle postavené trubky. Tentokrát naměříme dobu pádu delší než 6 sekund.



Měrná tepelná kapacita vody a měrné skupenské teplo vody

Tentokrát nám kapalný dusík poslouží k porovnání číselných hodnot měrné tepelné kapacity vody a měrného skupenského tepla tuhnutí vody. Množství odpařeného dusíku bude mírou dodaného tepla při přeměně vody v její led. K demonstraci jsme použili běžné laboratorní váhy. Nádoby na kapalný dusík jsme vyrobili z odříznuté spodní části polyetylénových lahví a tepelně jsme je izolovali pěnovým polystyrénem. Na misky vah jsme umístili vyvážené nádoby a nalili do nich stejná množství kapalného dusíku (asi 200 ml) tak, aby nádoby zůstaly vyvážené. Do jedné nádoby s kapalným dusíkem jsme opatrně nalili asi 25 ml vody z varné konvice s teplotou blízkou 100 °C. Jako odměrka posloužilo plastové pouzdro na kinofilm. Dusík se silně odpařoval a miska stoupala vzhůru. Poté jsme do nádoby na druhé misce vah postupně nalili tři odměrky studené vody z termosky, kde ve směsi s ledem měla voda teplotu blízkou 0 °C. V nádobě s dusíkem postupně vznikala vodní led, který se prochládl až na teplotu kapalného dusíku. Nakonec se miska s nádobou, do níž jsme nalili tři odměrky studené vody, zvedla. Nádoba byla tedy lehčí, ačkoli jsme do ní nalili trojnásobek vody. Muselo se z ní tedy odpařit větší množství kapalného dusíku.



Příčinu pozorovaného jevu nalezneme v porovnání číselných hodnot měrné tepelné kapacity vody a měrného skupenského tepla tuhnutí. Pro rychlý orientační výpočet potřebného tepla pro uvažovaný děj zvolíme hmotnost vody 1 kg.

Střední hodnota měrné tepelné kapacity vody v intervalu teplot 0 °C až 100 °C je

$c_k = 4,194 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$. K ochlazení vroucí vody o hmotnosti 1 kg na teplotu 0 °C je tedy třeba odebrat teplo $Q_k \approx 419 \text{ kJ}$.

Měrné skupenské teplo tuhnutí vody $l = 334 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, proto k přeměně vody o hmotnosti 1 kg ochlazené na její teplotu tuhnutí, je třeba odebrat skupenské teplo $L = 334 \text{ kJ}$.

Měrná tepelná kapacita ledu $c_l = 0,702 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pro teplotu 77,35 K vzroste na hodnotu $c_l = 2,10 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ pro teplotu 273 K. K ochlazení ledu hmotnosti 1 kg z teploty 273,15 K (0 °C) na hodnotu 77,35 K (teplotu varu dusíku) je třeba tomuto ledu odebrat (uvažujeme-li průměrnou hodnotu měrné tepelné kapacity ledu v uvedeném intervalu teplot $1,40 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) teplo $Q_l \approx 274 \text{ kJ}$.

Vroucí vodě hmotnosti 1 kg při její přeměně na led (stejně hmotnosti) teploty 77,35 K tedy kapalný dusík odebral celkově teplo

$$Q_A \approx Q_k + L + Q_l = (419 + 334 + 274) \text{ kJ} = \underline{1027 \text{ kJ}}.$$

K přeměně studené vody hmotnosti 1 kg teploty 0 °C v led téže hmotnosti a k jeho ochlazení až na teplotu 77,35 K absorboval kapalný dusík teplo

$$Q_B \approx L + Q_l = (334 + 274) \text{ kJ} = 608 \text{ kJ}$$

Vidíme, že již dvě odměrky ledové vody způsobily odpar většího množství dusíku než jedna odměrka vroucí vody. Měrné skupenské teplo tuhnutí vody hraje tedy v tepelné bilanci pokusu významnou roli. Měrné skupenské teplo vypařování kapalného dusíku je $l = 199,6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, musíte tedy mít při pokusu k dispozici alespoň čtyřnásobný objem kapalného dusíku, než je objem použité vody.

Děkuji RNDr. Jaroslavu Kohoutovi, CSc. za přípravu pokusu s levitací a s vířivými proudy, Doc. RNDr. Janu Obdržálkovi, CSc. za upozornění na článek o demonstraci skupenského tepla tuhnutí a zejména Mgr. Michaele Blažkové za asistenci při provádění pokusů.