

Leidenfrostův jev

PAVEL KONEČNÝ

Ústav fyzikální elektroniky PřF MU

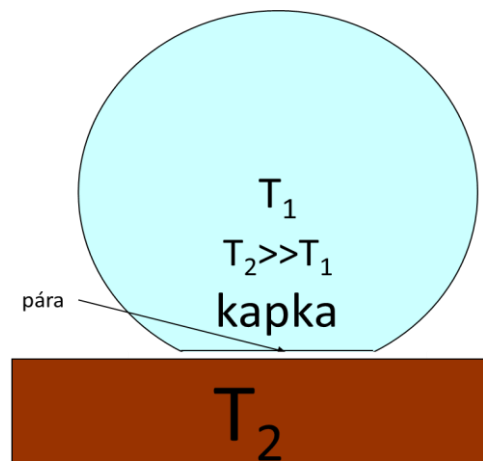
Letos uplyne kulatých 260 lety od vydání traktátu *De aquæ communis nonnullis qualitatibus tractatus* [1] ve kterém jeho autor Johann Gottlob Leidenfrost popsal jev, jehož podstata spočívá v tom, že kapalina s určitým bodem varu vytváří ze svých par na rozhraní s mnohem teplejším povrchem souvislou separační vrstvu. Tento jev známý jako Leidenfrostův jev má praktický význam u varných kotlů, kapalinových chladičů, ale také v sacím traktu benzínových motorů. K příležitosti tohoto výročí bude v následujícím příspěvku připomenut jeden poměrně spektakulární demonstrační experiment.

Leidenfrostův-Boerhaavenův jev

Málokterý objev je pojmenován po svém prvním objeviteli. Leidenfrostův jev není výjimkou. Byl popsán už v knize *Elementa Chemiae* [2] z roku 1732, jejímž autorem je holandský lékař, botanik a chemik Herman (Hermannus) Boerhave. Známe Leidenfrostův nikoliv Boerhaavenův jev, přes to, že Herman Boerhaaven nebyl ve své době neznámý vědec, naopak, byl velmi slavný a vlivný, vynikající pedagog, jehož žáci se stali oporou mnohých světových univerzit a jeho *Elementa chemiae* se dočkala mnoha vydání i brzkého překladu do angličtiny [3]. Jak proces objevování funguje a jak to vlastně je s vědeckou prioritou a pojmenovávání objevů, zajímavě pojednává například Stigler [4].

Několik poznámek k fyzice Leidenfrostova jevu

Fyzika Leidenfrostova jevu je popsána například v [5]. Její podrobnější rozbor není předmětem tohoto článku. Omezíme-li se na kvalitativní stránku věci, je intuitivně zřejmé, že kapalina nemůže smáčet povrch, který je mnohem teplejší, než její bod varu. Pokles tepelného příkonu souvisí se vznikem souvislé separační vrstvy plynu, protože plyn je dobrý tepelný izolátor. Teplotě odpovídající minimálnímu tepelnému příkonu se říká Leidenfrostova teplota. S dalším zvyšováním teploty přestup tepla pouze mírně roste, protože větší přestup tepla znamená víc vznikající páry a tedy silnější separační vrstvu, která lépe izoluje. Při vysokých teplotách hraje roli také radiace, ale ne každá kapalina tepelné záření absorbuje, například čistý kapalný dusík je pro tepelné záření průhledný a tedy radiální složka odpar kapky dusíku nezvyšuje.



Obr. 1. Leidenfrostův jev

Pokud je kapaliny tak malé množství, že vytvoří téměř kulovitou kapičku, je vzniklý tvar velmi podobný kapičce na ultra hydrofobním povrchu, viz obr. 2. U větších zploštělých kapek to tak úplně neplatí. Dokonce za určitých okolností oscilují v pravidelných módech, viz obr. 3. Ještě větší leydenfrostovsky levitující kapky jsou zcela nestabilní.

Fyzika separační Leidenfrostovy vrstvy je komplikovaná. Proudění vyvíjené páry má u pevného povrchu okrajovou podmínku $v = 0$, ne však u přilehlé kapaliny. V kapce se navíc v případě teplotní diference horní a spodní části hladiny vyvine tzv. Marangoniho proudění viz [5] str. 201. Síla separační vrstvy není všude stejná a v případě velmi velkého rozdílu teplot, se projeví závislost viskozity plynů na druhé odmocnině absolutní teploty.

Příklady komplikované povahy Leidenfrostova jevu

Leidenfrostova teplota záleží nejen na kapalině, ale i na vlastnostech povrchu. Například na antiadhezivním povrchu kuchyňské pánve je pro alkohol vyšší než pro vodu. Zatímco kapky alkoholu stále vaří, voda už začíná vytvářet kuličky. Na hliníkovém rubu téže pánve je naopak Leidenfrostova teplota pro vodu vyšší, jak by bylo možné očekávat vzhledem k nižšímu bodu varu etylalkoholu. Etylalkohol už tvoří kuličky, zatímco kapky vody stále vaří.



Obr. 2. Kapky vody na hydrofobní pánvi



Obr. 3. Kmitající kapka vody na ocelové pánvi

Experiment s ponořením ruky do roztaveného kovu

Jedná se o celkem atraktivní experiment, při kterém Leidenfrostův jev ochrání kůži před spálením při mžikovém ponoru ruky do taveniny o teplotě několik set stupňů Celsia. S tímto pokusem souvisí řada fyzikálních otázek, na jejichž správném zodpovězení je zejména samotný experimentátor silně motivován a které lze s auditoriem poměrně emotivně diskutovat.

Příklad otázek k diskusi k experimentu s ponorem ruky do olova

1. Je bezpečnější mít lázeň kapalného kovu co nejbliž Leidenfrostově teplotě ochranné kapaliny, v případě vody 220 °C, tedy co nejnižší? Nebo je pro bezpečnou teplotu jiné kritérium?
2. O kolik by měla být teplota taveniny při experimentu vyšší, než je její bod tání? Na jakých vlastnostech taveniny a parametrech experimentu tento interval závisí? Nebo je to víceméně jedno a záleží hlavně na tom, aby byl kov kapalný?

3. Má-li být ruka chráněna filmem vodní páry, znamená to, že je vystavena teplotě 100 °C, protože to je teplota vodní páry za normálního tlaku? Nebo bude tato teplota vyšší nebo nižší?
4. Znamená to, že se stejným teplotním komfortem by mělo být možné stejně rychle a hluboko zanořit ruku i do vařící vody?
5. Jaká jsou fyzikální kritéria pro taveninu? Například tepelná kapacita, skupenské teplo, tepelná vodivost?
6. Jaká jsou fyzikální kritéria pro ochrannou kapalinu? Například bod varu skupenské teplo výparné.
7. Pomůže „prodloužit“ komfortní dobu ponoru do taveniny předchlazení povrchu kůže v ledové tříšti?
8. Lze bleskovým dochlazením ruky v ledové tříšti „prodloužit“ komfortní dobu ponoru do taveniny?
9. A jedna „neurofyziologická“ otázka: lze spoléhat na vněm teploty či signál bolesti jako na signál pro vytažení ruky z olova?

Kromě této fyzikální stránky experimentu je zde ještě bezpečnostní a technická stránka věci. Její vyčerpávající diskuze je mimo téma tohoto článku. Je třeba zdůraznit, že článek není v žádném případě návodem k tomuto experimentu. Pokus lze doporučit jen zkušenému experimentátorovi, který příslušnou problematiku teoreticky i experimentálně ovládá a ví sám, co a jak je třeba udělat, čili má to tak říkajíc z vlastní hlavy.

Jako materiál taveniny se v literatuře uvádí téměř výhradně olovo. Podobné vlastnosti má například cín, nebo bismut viz tab. 1. V cenách z roku 2016 pro odběrová množství v desítkách kg je nejlevnější olovo, cca 50 Kč/kg bez DPH. Cín je přibližně 10x dražší bismut 20x. Cín je méně jedovatý a má mnohem nižší tenzi par, bismut má nevýhodu v malé tepelné vodivosti, a poměrně velké tenzi par, dle zkušenosti autora také podstatně víc oxiduje, je však nejméně toxický. Olovo je naopak toxické a je třeba s tím podle toho zacházet. Jsou-li nějaké jiné důvody, než finanční, proč by byl například cín méně vhodný, není autorovi známo.

	Hus- tota $\rho \cdot 10^{-3}$ kg m ⁻³	Bod tání t_l °C	Bod varu t_g °C	Skupen- ské teplo tání l kJ/kg	měrné teplo c Jkg ⁻¹ K ⁻¹	Tepelná vodivost Wm ⁻¹ K ⁻¹	Tenze par při teplotě T = 500 °C Pa
Olovo	11,34	327,5	1749	23,04	129	35,3	2,3 10 ⁻³
Cín	7,27	231,9	2602	59,22	228	66,8	2,7 10 ⁻¹⁰
Bis- mut	9,78	271,5	1564	54,07	112	7,97	3,6 10 ⁻³

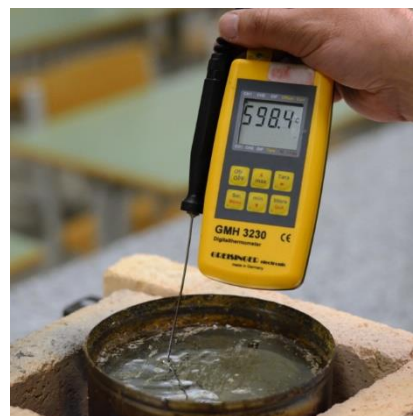
Tab. 1

Poznámky k vybraným otázkám

Ad. 1. Roseův kov (směs 50 % bismutu, 25 % olova a 25 % cínu, bod tání 96–98 °C) by umožnil snížit teplotu taveniny až k Leidenforstově teplotě, což je pro vodu asi 220 C, ale je otázka, jestli je to dobře. 220 °C je ještě dostatečně vysoká teplota pro vznik popáleniny a teplota, při které ještě může voda existovat v metastabilním stavu. Například v mikrovlnce ve skleněné kádince lze relativně snadno přehřát vodu cca na 108 °C, do stabilního stavu pak přechází výbuchem. Experimentálně naměřená střední doba života metastabilního stavu vody o objemu 1 mm³ a teplotě 250 °C při normálním tlaku je podle [6] asi 1 s, (teoretická mez asi 327 °C). Pravděpodobnost, že by voda vnesená do kapalného kovu přešla do metastabilního kapalného stavu a krátce v něm setrvala, je malá. Pokud by k tomu ale došlo, byl by průběh experimentu neočekávaný. Zajímavá je zkušenost, že i roztavené olovo se docela nepříjemně rozstříkuje, pokud je do něj vnesena i jen malá kapka vody i přes to, že má teplotu tání bezpečně nad teplotou maximálního možného přehřátí vody.

Ad. 2. Pro úspěšný průběh pokusu je nutné zajistit, aby za žádných okolností kov na ruce nezduhul. Vzniklá rukavice by měla totiž teplotu tuhnutí olova tj. 327 °C. Podle [7] je bezpečná teplota vyšší než 400 °C. Přitom vzhledem k tenzi par je naopak žádoucí toxické olovo zahřívát co nejméně. Autor článku raději nešel pod 440 °C a se zajištěným odtažením exhalací vyzkoušel maximum na něco přes 600 °C, pocitově bez jakéhokoliv problému.

Ad. 4. Při tomto experimentu nehraje roli jen Leidenfrostův jev, ale také hydrodynamika. Jak je vidět na obr. 6, a 8, olovo ponořovaný prst neobtéká, ale dynamicky se rozestoupí. V první fázi je tedy v kontaktu jen se špičkou prstu. Z fotografického záznamu procesu dále plyne, že vzniklá dutina kolabuje patrně rychleji, než je možné s prstem ucuknout, viz obr. 7. Kontakt není tedy časově omezen jen na ponořovací etapu, ale plně exponovány jsou hlavně špičky prstu/prstů. Ponor ruky do vařící vody,



Obr. 4. Teplota olova měřená ponorným teploměrem



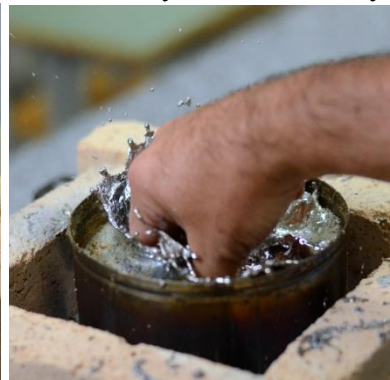
Obr. 5. Údaj infračerveného teploměru pro olovo o teplotě dle obr. 4



Obr. 8. Ponor



Obr. 7. Ucuknutí



Obr. 6. Ponor všech pěti prstů

což by teoreticky mělo probíhat při stejné teplotě, není zdaleka pocitově totéž. Má-li být teplotní komfort podobný, jako s olovem, je třeba ruku předtím ochladit v ledové vodě a z vařící vody se bleskově do ledu zase vrátit.

Ad. 5. Jak lze demonstrovat pomocí infračerveného teploměru viz obr. 5, kapalné olovo jako kov, tj. pokud není pokryto silnou vrstvou oxidu, má poměrně nízkou emisivitu. Proto nepřenáší na ponořenou ruku zářením žádný podstatný tepelný příkon ani při hodně vysokých teplotách.

Ad. 6. Jako ochranná lázeň se osvědčila směs vody a lihu v poměru 40 dílů lihu 60 dílů vody. Snižuje se tím teplota potřebná pro vznik plynného filmu. Samotný líh jako hořlavinu nelze doporučit

Ad 7., 8. Je zajímavé, že předchlazením povrchu ruky v ledu se skutečně vytvoří teplotní náskok, který stačí k tomu, aby pocitově vyšel ponor mnohem lépe. Stejně tak okamžité ponoření ruky do ledové tříště tepelný komfort zvyšuje. Při diskusi lze odkázat na problematiku relaxačních dob při měření teploty a na školské experimenty s teplotní vodivostí.

Poznámky k uspořádání experimentu

Jako tyglík sloužil nerezový ešus o objemu cca 1,5 l viz obr. 4 až 8. Bez tepelné izolace nebylo možné obyčejným kahanem olovo vůbec roztavit, ale po obestavení magnéziovými cihlami k tomu stačil překvapivě malý plamen, viz obr 9. Odpar olova omezovala plechová poklička, oxidaci zásyp dřevěným uhlím. Exhalace byly nuceně odsávány. Celá sestava byla pro případ úniku olova postavena do velké sběrné plechové nádoby. (Olovo je velmi dobře tekuté, „cáká“ proniká i hustou textilií, může zapálit hořlavé materiály s nízkým bodem vzplanutí, může také protavit elektrickou izolaci atd.). Obličej si experimentátor chránil standardním chemickým štítem. Vedle tyglíku s olovem byla připravena větší nádoba s vodou a ledovou tříští.



Obr. 9. Sestava k hřevu olova

Literatura

- [1] Leidenfrost, Johan Gottlob. *De aquæ communis nonnullis qualitatibus tractatus*. Hermanni Ovenni, Univers. bibliopolæ, 1756.
- [2] Boerhaave, H. *Elementa Chemiæ*, Lugduni Batavorum, 1732, díl 1. Experiment XIX, str. 257–258, dostupné z Google book: <https://goo.gl/CrPnxk>
- [3] Boerhaave, H. *A New Method of Chemistry; Including the History, Theory and Practice of the Art.*, 2 vydání, Longman, London, 1741.
- [4] Stigler, Stephen, M., Gieryn, F., ed. "Stigler's law of eponymy". *Transactions of the New York Academy of Sciences*. 39: 1980, 147–58. Dostupné z: doi:10.1111/j.2164-0947.1980.tb02775.x.
- [5] Quéré, D. *Leidenfrost dynamics*. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 45. 2013. s. 197–215
- [6] Baidakov, V. G. *Experimental investigations of superheated and supercooled water*. [cit]
- [7] WALKER J. *Boiling and the Leidenfrost Effect*. Dostupné z: http://www.wiley.com/college/phy/halliday320005/pdf/leidenfrost_essay.pdf