

Úloha V.E ... Vypař se!

8 bodů; průměr 4,86; řešilo 28 studentů

Uřčete, jak závisí rychlost vypařování vody na povrchu, který tato kapalina zaujímá. Experiment proveďte alespoň pro pět různých vhodných nádob. Zamyslete se nad dalšími faktory, které mohou rychlost vypařování vody ovlivnit. Upozorňujeme, že experiment je velmi vhodné nechat probíhat po delší dobu (několik dní), proto ideálně začněte o hodně dřív než pár hodin před uzávěrkou.

Kiki zvažovala, zda má cenu chodit pro hadr.

Vypařování je typickou vlastností kapalin. Při každé teplotě přechází určitá část molekul vlivem tepelné energie (která se projevuje pohybem molekul) do plynného skupenství. V podstatě dochází k tomu, že molekula vody dostatečně blízko povrchu s dostatečnou kinetickou energií překoná soudržné síly a přejde do plynné fáze. Tato tendence závisí na povaze kapalin, přesněji na jejich soudržných silách mezi molekulami. Probíhá-li vypařování v uzavřené nádobě, ustaví se mezi kapalinou a její párou rovnováha. V naší úloze se však jedná o otevřenou soustavu, proto nedojde k ustavení rovnováhy vlivem neustálého unikání molekul páry do okolního prostředí, proto bude kapalná fáze neustále ubývat.

Naše úloha je zaměřená na to, jak souvisí velikost povrchu vody s rychlostí vypařování v , respektive s rychlostí úbytku kapalná fáze. Tuto rychlost vypařování v si můžeme definovat jako množství (případně objem) odpařené vody za čas.

To, že s větším povrchem lze očekávat větší množství odpařené vody, je poměrně intuitivní (nevíme, jak často věšíte prádlo, ale asi nikdo z vás by nečekal, že mu tričko zmačkané do kuličky uschne rychleji než stejné mokré tričko pověšené na šňůře), nás však přímo zajímá, zda je tato závislost lineární, jak by se dalo čekat, či jiná, tedy jaká je rychlost vypařování na jednotku povrchu.

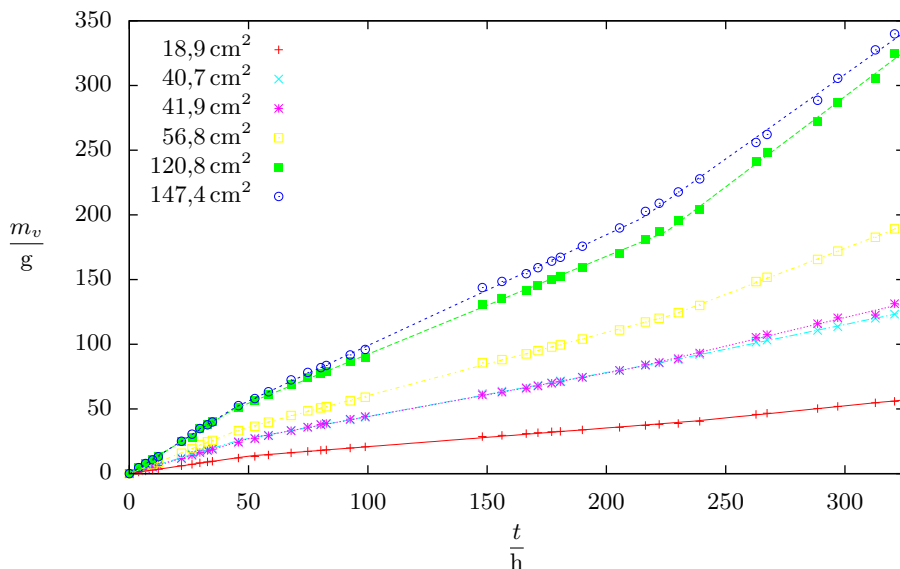
Nelze však zanedbat skutečnost, že na rychlost vypařování má vliv celá řada dalších faktorů. Rychlost vypařování souvisí s tenzí odpařených par nad kapalinou, pokud je tato tenze větší, vypařování probíhá rychleji, neboť molekuly jsou více tlačeny do okolí. Tenze par je navíc veličina provázaná s teplotou a tlakem. Na rychlost vypařování má také vliv vlhkost vzduchu, neboť vlhčí vzduch bude méně ochotně přijímat nové molekuly páry. Stejně tak pohyb vzduchu je při odpařování důležitý, což je spolu se zvýšením teploty například principem fénu.

Jak je vidět, nejlépe by bylo experiment provádět v místnosti o stálé teplotě, tlaku, vlhkosti vzduchu a bez jakéhokoli průvanu, a vůbec nejlépe na nic nesahat, nedýchat a ani tam nebýt. Tyto podmínky však v domácím prostředí těžko splníte, zvláště když je nutné provádět v průběhu experimentu měření, proto je dobré nechat všechny nádoby s vodou spolu na stejném místě a nechat probíhat experiment u všech zároveň, čímž máte zhruba zaručeno, že ač budou okolní podmínky do určité míry proměnlivé, budou v daném okamžiku pro všechny nádoby přibližně stejné, takže by pak jejich případný vliv měl být pozorován u všech nádob a rozpoznán jako ovlivnění některými ze zmiňovaných faktorů.

Poslední vliv, který zde bude zmíněn, nejdříve ani nebyl v teorii uvažován, nicméně v průběhu samotného experimentu se ukázala jeho důležitost. Jedná se o působení nádoby, která představuje nejen překážku pro kapalinu, ale také pro páru. Pokud máme kapalinu pouze na dně poměrně vysoké a úzké nádoby, je pro molekuly páry těžší uniknout do okolí, neboť při nárazu do stěny nádoby ztratí část své energie, takže mnohem větší část z nich zkondenzuje zpátky na kapalinu. Proto je vhodné pro experiment použít nádoby co nejvíce naplněné vodou nebo aspoň dostatečně široké, velmi úzkým nádobám (jako jsou například zkumavky) je dobré se vyhnout i kvůli kapilárním jevům, které by zde již nemusely být zanedbatelné.

Měření

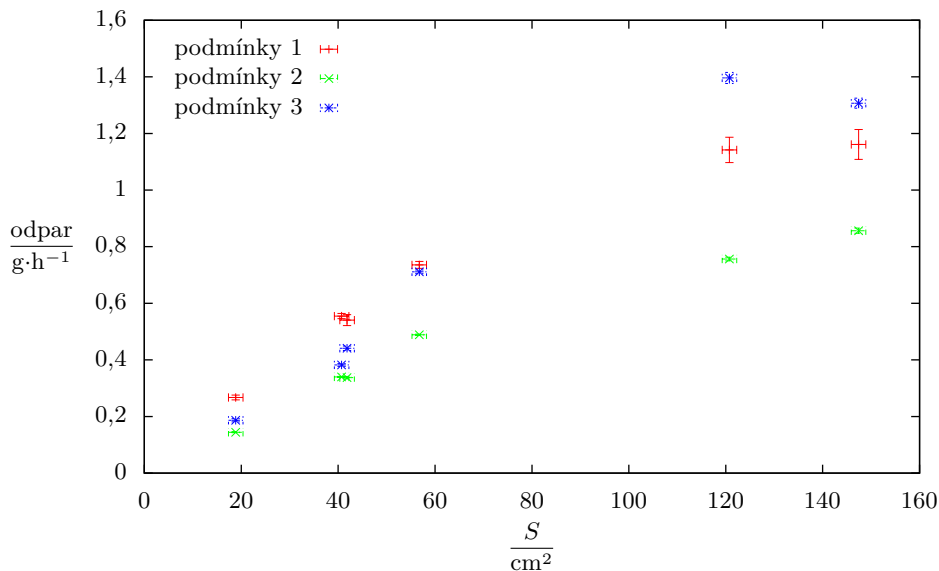
Pro první verzi experimentu bylo vybráno devět nádob, přičemž dvě z nich byly stejné (pro kontrolu) a ostatní se lišily. Všechny nádoby byly vybírány tak, aby měly tvar válce (aspoň na potřebném úseku – např. seříznutá PET láhev) a bylo tím pádem snadné dát do souvislosti množství odparu s jejich povrchem, který byl v podstatě konstantní a také lehce zjištělný. Průměr nádob se pohyboval v rozmezí 58 mm až 137 mm.



Obr. 1: Závislost množství odpařené vody na čase.

Je třeba říci, že množství vody, které bylo možno do nádob nalít, bylo limitováno tím, že váhy, které byly k dispozici a měřily s přesností na setinu gramu, vážily maximálně do cca 400 g. Takže bylo postupováno tak, že bylo do nádob postavených na kuchyňské váze naléváno takové množství vody, aby nádobu i s vodou bylo posléze možno zvážit na výše zmíněné váze. Tak došlo k tomu, že nádoby byly různě plné. Všechny nádoby s vodou byly po zvažení a zapsání času vážení umístěny spolu na okenní parapet a po různých časových úsecích byly váženy, aby se zjistilo, kolik vody se z nich za danou dobu odpařilo. Po několika prvních měřeních však bylo zřejmé, že výsledky jsou jiné, než by se očekávalo. Zatímco dvě stejné nádoby poskytovaly přibližně stejný odpar (byly i stejně vysoko naplněné), což bylo v pořádku, při srovnání ostatních nádob bylo vidět, že z některých širších nádob se odpařuje téměř stejně, nebo dokonce méně než z nádob užších. Nejlépe to bylo patrné při srovnání nádob označených jako PET malá, která měla průměr 72 mm, a PET velká s průměrem 85 mm. První tři hodnoty množství odpařené vody vždy za určité časové úseky z PET malé činily 1,52 g, 5,92 g a 1,89 g, zatímco z PET velké se za stejné časové úseky odpařilo pouze 1,13 g, 4,45 g a 1,64 g. Z toho plyne, že nádoba s povrchem o zhruba 30 % menším měla odpar o 23 % až 35 % větší, což je poměrně podivné.

Vysvětlení spočívá právě v různé naplněnosti nádob, která vyplývala z omezeného množství

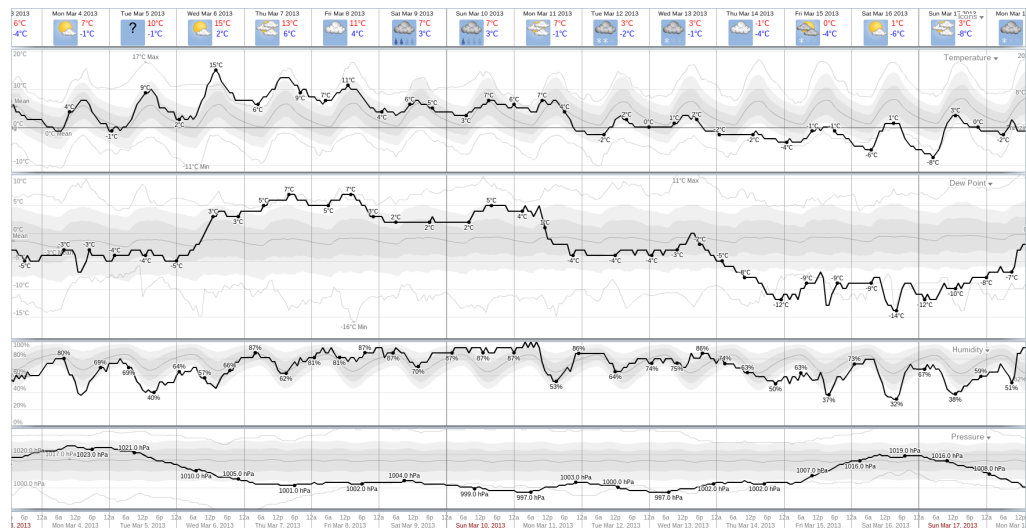


Obr. 2: Závislost rychlosti vypařování na povrchu.

vody, které mohlo být do nádoby nalito, aby byla pořád vážitelná. Tato různá vzdálenost hladiny od vrchní části nádoby byla nejdříve zanedbána. Nyní ale vidíme, jak může fakt, že PET malá byla naplněna vodou téměř po okraj, zatímco PET velká pouze zhruba do poloviny své výšky, negativně ovlivnit výsledky.

Pro potvrzení důležitosti tohoto efektu byl proveden miniexperiment se třemi shodnými skleničkami o průměru 58 mm, tyto skleničky měly výšku zhruba 13 cm. První byla naplněna do výšky přibližně 11 cm (naprosté naplnění nebylo možné z váhového hlediska), druhá byla naplněna zhruba do poloviny, tedy do výšky cca 7 cm a poslední byla naplněna pouze do výšky cca 3 cm. Z výsledků bylo posléze patrné, že odpar třetí skleničky často činí méně než 50 % odparu skleničky první. Podrobnější data k tomuto měření jsou uvedena v tabulce 1.

Posléze se začalo s experimentem od začátku. Postup byl podobný, ovšem byly vyřazeny všechny skleněné nádoby a nahrazeny plastovými, neboť bylo třeba, aby samotná nádoba vážila co nejméně. Nakonec bylo pro měření použito šesti nádob: kalíšek od svíčky (1), PET malá (5), PET velká (6) (tyto byly na začátku vodou zcela naplněny), plastový odpadáček (4), plastový kryt na CD (2) (naplněny zhruba 1 cm pod okraj) a plastová miska (3) (naplněná zhruba 4 cm pod okraj – ovšem dostatečně široká), další údaje o použitých nádobách jsou uvedeny v tabulce 2 spolu s výsledky. Po různých časových intervalech byly vždy všechny nádoby zváženy a získala se tak hmotnost odpařené vody za daný časový úsek. Tato fáze experimentu probíhala od 4. března do 17. března.



Obr. 3: Počasí během experimentu (shora teplota, rosný bod, vlhkost a tlak). Zdroj: <http://weatherspark.com>.

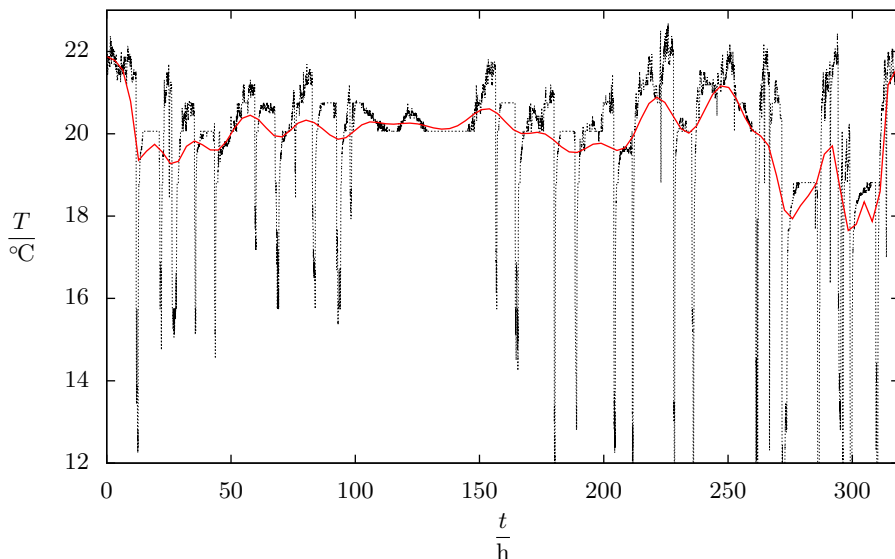
Tabulka 1: Srovnání odparu pro tři stejné skleničky naplněné do výšky 11 cm, 7 cm a 3 cm.

t min	odpar 1 g	odpar 2 g	odpar 3 g
821	2,37 (100 %)	2,00 (84 %)	1,15 (49 %)
222	0,68 (100 %)	0,58 (85 %)	0,35 (51 %)
399	1,20 (100 %)	0,75 (63 %)	0,44 (37 %)
750	2,05 (100 %)	1,09 (53 %)	0,78 (38 %)
529	1,55 (100 %)	0,88 (57 %)	0,72 (46 %)

Výsledky

Souhrn experimentálně získaných dat je uveden v tabulce 2. Podle nich je vytvořen graf 1 závislosti hmotnosti odpařené vody na čase pro jednotlivé nádoby. Z grafu je patrné, že tato závislost je lineární, nicméně nelze zde provést lineární regresi jedinou přímkou kvůli proměnlivým podmínkám, které mají vliv na rychlost vypařování, což ovlivní sklon příslušné části. Proto bylo fitováno funkcí s proměnnou směrnicí a všechny grafy se rozdělily na tři úseky. Jak je vidět, body zlomu pro jednotlivé kapaliny nejsou ve zcela stejný čas, což však může být důsledkem fitování, které funguje na základě metody nejmenších čtverců.

Jak již bylo zmíněno, tato proměnlivost souvisí s výraznými změnami experimentálních podmínek. První větší změna nastala za zhruba 52 h od začátku experimentu, kdy se venku oteplilo, což by samo o sobě nemělo velký vliv, ale jako důsledek bylo vypnuto topení v místnosti. Jelikož topení je umístěno kousek od místa, na kterém stojí nádoby s vodou, mohlo to rychlost



Obr. 4: Teplota v místnosti.

vypařování ovlivnit jednak teplotně, jednak změnou proudění vzduchu a odvětrávání par. Počasí se však v tu dobu také měnilo nejen z hlediska teploty, ale také tlaku, rosného bodu a vlhkosti, což je vidět na přiloženém záznamu (zlom je ve středu 6. 3. dopoledne) na obrázku 3. Také bylo zaznamenáno, jak se měnila teplota v místnosti, kde probíhal experiment, pomocí teplotního čidla (obrázek 4). Všechny tyto faktory se pravděpodobně podílejí na zpomalení odpařování, které je pozorovatelné ve střední části grafu. Pro ověření, že zapnuté topení má na na rychlost odpařování větší vliv, bylo v čase kolem 190 h od začátku experimentu topení znovu zapnuto a rychlost odpařování skutečně znovu narostla. Rozdělení na jednotlivé úseky (tedy použití rozdílných směrnic) bylo zohledněno i v grafu závislosti rychlosti odparu na povrchu kapaliny na obrázku 2.

Diskuze

Ze získaných dat je vidět, že množství odpařené kapaliny je lineárně závislé na čase, avšak tato rychlost vypařování závisí do značné míry i na podmínkách okolí. Podíváme-li se na závislost této rychlosti na povrchu kapaliny, tak zjistíme, že zde lineární závislost není (aspoň dle získaných dat). Naopak, s rostoucím povrchem rychlost odparu na jednotku povrchu klesá, což je zajímavý výsledek. Nicméně vzhledem k velkému počtu faktorů, které mají na vypařování vody vliv, a k tomu, že širší nádoby nebyly vodou zcela naplněné, protože by pak nebyly vážitelné našim vybavením, tento výsledek nelze považovat za zcela průkazný. Naopak ovlivnění rychlosti odparu v závislosti na výšce hladiny je z uvedených dat vidět mnohem jednoznačněji.

Závěr

Z měření vyplývá, že rychlost vypařování není lineárně závislá na povrchu, ale s rostoucím povrchem má spíše klesavou tendenci. Tento výsledek však vzhledem k povaze experimentu není nezpochybnitelný. Za určitější výsledek tedy lze považovat spíš to, že rychlost odpařování je závislá na míře naplnění dané nádoby, ačkoliv to nebylo původním cílem úlohy.

Kristína Nešporová

kiki@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

Tabulka 2: Parametry nádob; čas a množství odpařené vody.

r [mm]	49	124	137	73	72	85
S [cm ²]	18,9	120,8	147,4	41,9	40,7	56,8
m_0 [g]	5,01	20,22	91,44	39,67	8,24	8,32
$m_0 + m_v$ [g]	98,01	396,64	392,44	416,93	321,65	365,83
t	odpar	odpar	odpar	odpar	odpar	odpar
min	g	g	g	g	g	g
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
234	1,28	5,07	4,66	2,12	2,46	3,09
408	2,07	7,97	7,80	3,67	4,12	5,12
586	2,77	10,60	10,60	5,03	5,55	6,93
729	3,36	13,19	13,07	6,25	6,75	8,55
1 313	6,10	24,70	25,01	11,62	12,20	15,77
1 576	7,26	27,78	30,52	14,22	15,14	19,43
1 775	8,32	34,53	34,84	16,27	17,20	22,29
1 966	9,07	38,08	37,69	17,96	18,74	24,49
2 091	9,57	40,01	39,88	18,90	19,70	25,70
2 745	12,09	50,88	52,58	24,27	24,92	33,21
3 157	13,31	56,37	58,06	27,01	27,48	36,58
3 499	14,39	60,94	63,25	29,35	29,71	39,75
4 069	16,06	68,55	72,47	33,19	33,38	44,97
4 487	17,26	74,00	78,27	35,90	35,97	48,52
4 818	18,02	77,56	82,00	37,91	37,70	50,84
4 956	18,33	79,02	83,61	38,73	38,33	51,74
5 556	19,79	86,55	91,74	42,10	41,52	56,34
5 935	20,69	89,95	95,96	44,11	43,49	59,03
8 878	28,67	130,87	143,81	60,97	61,93	85,67
9 374	29,56	135,07	148,58	63,00	63,80	88,19
9 984	30,94	141,85	154,52	65,99	66,60	92,56
10 280	31,64	145,67	159,14	67,75	68,36	95,05
10 625	32,37	149,97	164,25	69,86	70,23	97,87
10 843	32,73	152,34	167,23	71,08	71,62	99,46
11 395	33,85	159,00	175,82	74,42	74,53	103,98
12 330	35,78	170,54	189,87	79,75	79,69	111,05
12 981	37,21	181,21	202,69	84,09	83,54	117,22
13 327	38,01	186,95	209,02	85,90	85,50	120,13
13 806	38,77	195,33	217,76	88,87	88,07	124,40
14 349	40,41	203,91	227,80	93,24	92,03	129,95
15 762	45,78	241,09	255,98	105,40	101,66	148,44
16 041	46,74	248,12	262,21	107,41	103,16	151,72
17 314	50,28	272,48	288,52	115,87	110,72	165,54
17 820	51,97	287,11	305,58	120,39	113,64	171,97
18 764	54,73	305,19	327,54	122,60	120,12	182,65
19 249	55,91	325,08	339,91	131,38	123,27	189,16