

Úloha I.E ... Expresní chlazení

8 bodů

Výfuček si uvařil hrnek svého oblíbeného čaje, pak si ale uvědomil, že se má za chvíli potkat s kamarády. Začal tedy přemýšlet, jak čaj co nejrychleji zchladit. Pomůžete mu najít nejlepší způsob?

Uvařte si hrnek čaje nebo jen vody a porovnejte alespoň dva způsoby, jak urychlit chladnutí. Můžete vyzkoušet například foukání, míchání, přelévání, umístění hrnku do chladnější kapaliny, umístění do ledničky apod. Pokus dělejte vždy se stejným množstvím čaje nebo vody o stejné počáteční teplotě a proveďte pro každý způsob dostatek měření. Výslednou teplotu změřte vždy po nějakém (pokaždé stejném) čase t , po který budete chlazení provádět. Nezapomeňte svá snažení porovnat s chladnutím čaje bez dodatečných snah o jeho urychlení. Celkem pro každý z alespoň tří způsobů chlazení proveďte nejméně tři měření.



Který způsob vám vychází jako nejefektivnější?

Teorie

Horký čaj má krátce po uvaření teplotu výrazně vyšší než okolní prostředí. Tato teplota se bude následně samovolně snižovat až na úroveň teploty okolí. K tepelné výměně může docházet třemi způsoby – sáláním, vedením nebo prouděním. Pokud chceme chladnutí čaje urychlit, musíme urychlit jeden nebo více ze způsobů tepelné výměny.

Ztráta tepla sáláním závisí zejména na teplotě tělesa, ploše jeho povrchu a jeho barvě. Ani jeden z těchto parametrů nelze v popsaném experimentálním scénáři rozumně ovlivnit. Teoreticky by bylo vhodnější zvolit spíše černý hrnek než stříbrný, protože vyzáří o trochu víc tepla, které mu čaj předává, ale rozdíly by pravděpodobně byly sotva měřitelné.

Rychlost vedení tepla závisí na rozdílu teplot mezi hrnkem s čajem a okolím. Výraznou roli zde hraje hrnek – jeho tvar, tloušťka a materiál mohou výrazně ovlivnit výsledné množství předaného tepla za časovou jednotku. Představme si, že bychom čaj po uvaření nalili do termohrnku. Jeho izolační vlastnosti by z chlazení čaje udělaly jistě mnohem obtížnější úkol, než kdybychom jej nalili do tenkostěnného plecháčku. Neméně podstatná je také teplota okolního prostředí. Tu můžeme snížit umístěním hrnku do lednice nebo do chladné vody (která bude kvůli své tepelné kapacitě navíc teplo odvádět mnohem lépe než vzduch).

Dalším způsobem tepelné výměny je proudění. Jeho podstata spočívá v přesunu kapaliny nebo plynu s různými teplotami. Proudění samotného čaje nám může pomoci nanejvýš s homogenizací jeho teploty, která je podmínkou pro provedení vypočítacího měření. Můžeme ale urychlit proudění v okolním prostředí. Nabízí se foukání (pára nad hladinou je nahrazena studenějším vzduchem), případně se můžeme pokusit rozpráskat vodu, do které hrnek s čajem částečně ponoříme. Oba způsoby by měly urychlit konvekci (pomáhají udržet co největší teplotní rozdíl mezi okolním prostředím a hrnkem s čajem).

U čaje v otevřené nádobě dochází ještě k vypařování (speciální případ proudění), které také může být pro proces ochlazení čaje významné. Z čaje unikají molekuly s nejvyšší rychlostí (a tedy i energií), což snižuje jeho průměrnou teplotu. Odváděním par (foukáním) lze tento proces nezanedbatelně urychlit. Pokud tedy ochlazování čaje ničím nepomůžeme, lze se vcelku oprávněně domnívat, že největší vliv bude mít (minimálně zpočátku) právě vypařování. Sálání

je pomalé, vzduch je izolant, podložka většinou taky a vzduch v místnosti samovolně příliš neproudí.

Postup měření

Měření jsme provedli celkem pro pět různých scénářů. Kromě ochlazování bez pokusů o urychlení ještě pro míchání, foukání, umístění do ledničky a umístění do chladnější kapaliny.

Ve všech případech jsme použili skleničky (tedy nádoby s poměrně nízkou tepelnou vodivostí), do kterých jsme nalili pokaždé 150 ml vroucí vody. Následně jsme počkali 5 min a provedli měření infračerveným teploměrem. Pro měření by byl samozřejmě vhodný i klasický kontaktní teploměr. Bezkontaktní teploměr ovšem měření urychlil a usnadnil jeho paralelizaci. U infračerveného teploměru je důležité si před měřením ověřit, že je správně nastavený a měří správně (třeba srovnáním naměřených hodnot s teplotou odečtenou z kontaktního teploměru), což u průhledné kapaliny není zdaleka tak samozřejmé jako u pevné látky. V místnosti byla teplota cca 25 °C.

Všechny tyto společné parametry experimentu jsou zatíženy značnou chybou. Ta je dána povahou experimentu. Například vodu nelze po dovaření okamžitě přesunout do ledničky, odměrný válec má jistou chybu měřidla (5 ml) a teplota v místnosti se měnila v rozmezí dvou stupňů (pomineme-li chybu teploměru). Uvedení alespoň těchto parametrů je specificky u tohoto typu experimentu velmi důležité, jinak by totiž měření nebylo reprodukovatelné, což by mělo být cílem každého experimentátora.

K běžnému ochlazování, míchání a foukání není potřeba nic víc dodávat. Při umisťování do ledničky bylo potřeba vždy nějakou chvíli počkat, aby se po předchozím měření teplota uvnitř opět snížila na původní hodnotu. V chladnější kapalině byly skleničky ponořené asi ze dvou třetin. Chladnější kapalina měla na začátku teplotu přibližně 15 °C a bylo jí několikrát více než kapaliny ve skleničce, tedy se její teplota během chlazení čaje významně nezvýšila. Těsně před měřením teploty byl čaj po vytažení skleničky z vody ještě zamíchán, aby se vyrovnala teplota v celém jeho objemu.



Naměřené hodnoty

Pro každý scénář bylo provedeno celkem 20 měření. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v následující přehledové tabulce.

Scénář	Naměřené hodnoty – teplota [°C]				
Bez urychlení	78.7	78.7	76.8	78.6	77.1
	79.1	76.8	76.4	76.4	78.3
	77.5	78.5	76.2	77.0	77.2
	78.8	79.4	75.9	75.7	77.7
Míchání	73.5	71.2	69.8	70.1	73.7
	74.2	72.2	70.0	70.5	71.9
	73.7	73.1	72.8	72.1	71.9
	71.0	70.7	70.4	69.8	69.6
Foukání	56.8	56.4	54.9	56.1	58.2
	56.4	56.4	54.0	57.3	57.1
	54.0	53.8	53.6	53.3	53.0
	54.6	56.4	56.2	56.3	56.4
Lednička	68.6	68.9	69.6	69.7	74.7
	75.8	73.4	73.7	72.2	73.0
	75.1	74.8	73.9	72.7	72.5
	71.1	69.0	69.9	69.9	72.0
Chladnější kapalina	57.3	57.1	57.0	55.1	55.0
	55.0	55.0	55.0	54.7	54.7
	55.1	55.8	55.9	55.5	55.0
	52.6	52.8	53.1	53.2	53.4

Tabulka 1: Naměřené teploty po 5 minutách chlazení pro různé scénáře.

Scénář	Průměr [°C]	Směrodatná odchylka [°C]
Bez urychlení	77.5	1.2
Míchání	71.6	1.5
Foukání	55.6	1.5
Lednička	72.0	2.3
Chladnější kapalina	54.9	1.4

Tabulka 2: Průměrné teploty a směrodatné odchylky pro různé scénáře.

Výpočet směrodatné odchylky je zde uveden spíše pro zajímavost. Dále v diskuzi se na něj odkazujeme v souvislosti s výrazně větším rozptylem¹ hodnot u scénáře s ledničkou, ovšem toho je možné si všimnout i pouhým pohledem na naměřená data.

Diskuze

Dle předpokladů probíhalo ochlazování čaje ve scénáři bez dalšího urychlení procesu dosti pomalu. Čaj se za pět minut ochladil jen o asi $22,5^{\circ}\text{C}$, což je daleko od snesitelné teploty konzumace (v doporučení WHO se píše, že pravidelné pití nápojů teplejších než cca 65°C může dokonce zvyšovat riziko rakoviny jícnu). Ve sklenici viditelně poklesla hladina, vypařování čaje tedy mohl být pravděpodobně dominantní způsob tepelné výměny čaje s okolím. Je potřeba si uvědomit, že za dalších 5 min by se čaj určitě ochladil o méně než o dalších $22,5^{\circ}\text{C}$, protože rychlost ochlazování se postupně snižuje, takže je možné, že ani po dalších 5 minutách by čaj stále nebyl pitelný.

Míchání a umístění do ledničky přineslo podobné (neuspokojivé) výsledky. V případě umístění do ledničky se změnila pouze teplota prostředí, ale zjevně nedostatečně na to, aby to mělo významný efekt (byť jsou rozdíly i tak dobře měřitelné). Míchání v souladu s teoretickými předpoklady nijak zásadně nepřispělo k urychlení některého ze způsobů tepelné výměny. Velkou nevýhodou této metody je nutnost se ochlazování čaje po celou dobu (velmi aktivně) věnovat. Je zajímavé, že chlazení v ledničce produkovalo výsledky se zdaleka největším rozptylem. To je nejspíš dáno tím, že v ledničce není konstantní teplota a záleží na tom, v jaké fázi chlazení se do ní sklenička vloží.

Foukání urychlilo odvod par a ohřátého vzduchu dostatečně na to, aby se čaj ochladil na teplotu bezpečnou ke konzumaci (60°C až 65°C). Rozptyl hodnot byl o něco větší než u ochlazování bez urychlení, ovšem nenaplnily se obavy z toho, že bude těžké foukat opakovaně „stejným“ způsobem.

Nejlépe dopadlo chlazení čaje umístěním do chladnější kapaliny, která zrychlila odvod tepla z povrchu skleničky. Během 5 minut se podařilo čaj ochladit tímto způsobem v průměru o $45,1^{\circ}\text{C}$. Způsob ochlazování ve vodě by navíc šel dále zlepšovat (například použitím ještě chladnější proudící kapaliny s kostkami ledu). Také by se dal dobře kombinovat s ochlazováním pomocí foukání, což by se hodilo například v případě, kdy by bylo uvařené množství čaje celkově větší, a tudíž by zde byl méně příznivý poměr objemu a povrchu tělesa (použijeme-li místo hrnku hrnec, zvětší se objem čaje více než jeho povrch a jelikož uniká teplo z povrchu tělesa, bude obtížnější čaj zchladit).

Závěr

Provedli jsme dohromady celkem 100 měření, která nám poskytla solidní základ pro vyvozování závěrů o efektivitě různých metod chlazení čaje. Jako nejlepší se ukázaly metody foukání a umístění skleničky do chladnější kapaliny (vody), které navíc skrývají potenciál pro další zlepšování a vzájemnou kombinaci. Foukání je výhodné v tom, že není potřeba žádný dodatečný materiál (nádoba na chladící kapalinu a samotná kapalina). Umístění do chladnější kapaliny je ovšem mnohem méně náročné a čaji se není potřeba během procesu ochlazování věnovat, proto tato metoda v domácích podmínkách pravděpodobně vyhrává.

¹Směrodatná odchylka je odmocnina z rozptylu. Pro účely tohoto textu však stačí oba pojmy chápat intuitivně jako míru toho, jak moc se náš naměřený výsledek vzdaluje od skutečné hodnoty. Větší směrodatná odchylka znamená, že bylo měření méně přesné.

Kromě prozkoumání kombinací vyzkoušených způsobů by dále šlo vyzkoušet i jiné způsoby nebo experimentovat s jinými materiály nádoby na čaj a množstvím chlazeného čaje.

Viktor Materna

viktor.materna@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

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