

Pokusy s kapalným dusíkem

Tento text slouží Karlovi Kolářovi k tomu, aby měl seznam pokusů, co už někde s dusíkem viděl. Nejsou zde tedy úplně všechna nutná varování a postupy nejsou vždy zcela podrobné a nejsou popsány vždy zcela didakticky správně. Snaha je mít tento seznam co nejbohatší, nicméně autor sám si není zrovna jistý, že sem dal všechno, co ví a pokud vás napadne něco, co by se sem dalo přidat, bude rád, kdy se mu ozvete na karel@fykos.cz (můžete nahlásit i překlepy, vylepšení...).

Obsah – aneb jaké experimenty tu najdete

Obecné pomůcky pro pokusy	1
Základní fakta ohledně (kapalného) dusíku	1
Jídelní, a tedy oblíbené, experimenty	3
„Vařený pomeranč“ – aneb nejrychlejší zmrzlina	3
Zmrzlina – efektní výroba	3
Efektní jezení keksu	3
Netradiční pomazánka pro dospělé	3
Síla plynu, stavová rovnice plynu	4
Balónek – stavová rovnice	4
Reaktivní pohon – pingpongový míček	4
Gejzír	4
Mlžný opar (možný způsob likvidace dusíku)	4
Puma	4

Bomba	4
Světelné efekty (2015 – Mezinárodní rok světla)	5
Svítilní diody	5
Zhasínající světýlko – rychlost chemické reakce	5
Rozbitá žárovka	5
Další zajímavé efekty	5
Leidenfrostův jev	5
Křehká krása	5
Supravodič (případně i vláček)	5
Elektromagnetická indukce	6
„Matfyzácký úklid“ (alias jeden ze způsobů likvidace dusíku)	6
Co jsem ještě raději nikdy nedělal	6
Kapalný kyslík	6

Obecné pomůcky pro pokusy

Dewarova nádoba na přepravu dusíku, případně termoska s provrtaným otvorem; polystyrenová nádoba na dusík

Základní fakta ohledně (kapalného) dusíku

- Buďte opatrní!
- Teplota varu 77 K (−196 °C) – má cca tuto teplotu při všech pokusech.
- Přepravuje se v Dewarových nádobách. Jsou to vlastně propracovanější termosky (tj. odsátý vzduch, více plátů...). Pozor! Dewarova nádoba, na rozdíl od běžné termosky, netěsní, ale přesně naopak se klidně může samotné víko snadno zdvíhat tlakem plynu. To je, aby nenastal případ „Bomba“ popsáný dále.
 - Kdyby vás zajímalo, na kolik vyjde taková „dewarka“, tak ceny obvykle začínají kolem 20 tisíc Kč – viz [http://www.heureka.cz/?h\[fraze\]=dewarova+n%C3%A1doba](http://www.heureka.cz/?h[fraze]=dewarova+n%C3%A1doba), ale pokud někoho přemluvíte, aby vám dal dusík (viz níže), tak se dá často uhlavit přímo u nich, že vám ji půjčí.
- Co pozorujeme nad nádobou s dusíkem? Páru ne – pára není vidět (můžeme ji pozorovat nepřímou jako tetelení vzduchu těsně nad vařicí konvicí (ale dál od ní už je zase mlha), „fata morgánu“ apod.), vidíme mlhu – kondenzované částičky vody ve vzduchu; mlha se obvykle rychle rozplývá.
- Říkáme ideálně „kapalný dusík“ a ne „tekutý dusík“ (je pravda, že je i tekutý, ale zajímavější je to, že je kapalný, tekutý je i ten plynný).
- Složky vzduchu kapalní či tuhnu při teplotách

- Kyslík – kapalný při 90 K (−183 °C) – při dlouhodobě otevřené dewarce není radno zkoušet hořlavost dusíku, může tam být kyslík (namodralá kapalina)
- Argon – kapalný při 87 K (−186 °C) a tuhne při 84 K (−189 °C)
- Vodní pár – jak dobře víme, je pěkně tuhá
- Oxid uhličitý – teplota sublimace 195 K (−78 °C) – můžete ho znát jako suchý led, manipulace s ním ale přijde autorovi složitější, sehnání z hlediska MFF UK také a přitom má nižší teplotu, takže používám jenom kapalný dusík a ne suchý led.
- Ostatní plyny jsou zastoupené ve vzduchu relativně mizivě, ale často jsou také kapalné/tuhé při teplotě kapalného dusíku. To neplatí pro vodík a helium.
- Hustotu by měl mít 808 kg m^{−3}, tedy plave na vodě. To se dá ostatně ukázat – viz Mlžný opar.
 - Plynný dusík při pokojové teplotě má pak za atmosférického tlaku hustotu 1,25 kg m^{−3}, tedy vypařením se jeho objem zvýší cca 650 krát.
- Proč do něj můžeme ponořit ruku? Protože na něj vlastně přímo nesaháme – viz Leidenfrostův jev.
 - To ale neznamená, že bychom neměli dávat pozor na to, co tam ponoříme a lít to na sebe. Prstýnky, náplasti a podobné věci musí být zakázané! Stejně tak nelít na oblečení, nepít, nic takového.
- Kde se používá?
 - Logicky – pro chlazení, velkým příkladem je CERN – tam se používal i při stavbě – vymražení spodních vod, následně se používá jako mezistupeň chlazení mezi oblastí chlazenou kapalným heliem a nechlazenou oblastí – tam jsou nízké teploty potřebné pro supravodiče prvního typu, které vedou elektrický proud v řádech tisíců ampérů, obecně se používá k chlazení detektorů pro snížení šumu (třeba Ondřejov – detektor v hlavním dalekohledu chladí kapalným dusíkem).
 - Zdravotnictví – místní nekrotizace tkání – např. bradavice (mívají tam Dewarku cca dva týdny – za o něco kratší dobu se jim prakticky sama vyvaří s tím, že se nějaké malé množství použije právě na ty bradavice a spol.), uchovávání tkání či spermií
- Kde se dá sehnat?
 - Dobrá otázka – někdo ho získává z vysokých škol, kde se používá pro různé experimenty (na Matfyzu se dá vymluvit u Katedry fyziky nízkých teplot, když vysvětlíte, že je to na pokusy pro ZŠ/SŠ zájemce o fyziku a když slíbíte, že se nikomu nic nestane), někdo ho získává třeba u inseminátorů dobytka... Firmy ho nakupují u firmy Linde, ale je otázka, jestli se dá udělat malá objednávka (nezkoušel jsem, asi by to šlo, ale asi s vlastní dewarkou)...
- Jaká je jeho cena?
 - Řádově nízké desítky korun – říká se jako cena mléka.
 - Existují však obchody s molekulární kuchyní, které by z vás nejraději sedřely kůži... <http://www.molekularnikuchyne-eshop.cz/products/tekuty-dusik-1-1/>
- **Co se může stát, když nebudete opatrní?**
 - Do hodně větrané dewarky se může nechytat kyslík ze vzduchu – kapalný kyslík je hodně nebezpečné okysličovadlo. Takže nenechávejte ji zbytečně dlouho nezakrytou.
 - I když nějakou dobu Leidenfrostův jev zabrání promražení ruky, nevydrží to věčně. Takže tam zase nedržte ruku dlouhé minuty. Nebezpečí se zvyšuje, když jste nešikovní a jste schopní na někoho část nádoby zvrhnout – to nedělejte – oblečení saje, dusík se lépe dostane ke kůži...
 - Některé experimenty jsou s kladivem – tam obvykle létají malé kousky – řekněte lidem, že si mají dávat pozor (aspoň na oči).
 - Zadušení – tak ano, je to možné. Teoreticky. Potřebovali byste ale na to nevětranou, ideálně hermeticky uzavřenou místnost. Obvyklý obsah kyslíku ve vzduchu je 21 %. Pokud klesne pod 18 %, nastává u člověka pokles duševní a fyzické činnosti. Ztráta vědomí a nebezpečí úmrtí nastává až pro 11 % a nižší koncentraci kyslíku ve vzduchu. Smrt je už docela pravděpodobná pod 8 % (resp. jistá při neposkytnutí první pomoci) a pod 6 % jsou prakticky jisté následky poškození mozku i v případě první pomoci. Pokud máme tedy místnost např. 3 m × 4 m × 2,5 m = 30 m³, pak bychom hrubým odhadem potrebovali vypařit najednou víc jak 5 litrů dusíku a mít tu místnost vůbec nevětranou. Obvykle jsou místnosti větší, obvykle máte 7 l dewarku a lijete to postupně, místnost větrá. Není tedy důvod mít obavy, pokud nezvrhnete celou dewarku a nerozhodnete se zavřít východy a vyvolat paniku...

- Mnohem nebezpečnější je tedy suchý led, protože oxid uhličitý se drží u země kvůli své vyšší hustotě a může být tak nebezpečný i menším množstvím, zejména pro ty, co by leželi na zemi v nevětrané místnosti, kde by unikal ve větším množství. Bezvědomí a smrt může nastávat od 8 %.

Jídelní, a tedy oblíbené, experimenty

„Vařený pomeranč“ – aneb nejrychlejší zmrzlina

Pomůcky: oloupaný pomeranč (nebo jiný citrus), něco tvrdého (kladivo), ubrousek

Hodíme jeden „stroužek“ z oloupaného pomeranče nebo jiného citrusového plodu do dusíku, necháme, než se to přestane vařit (dusík) a následně pomeranč vytáhneme a rozbijeme na co nejmenší kousky. Ideálně kladivem a zabalený do ubrousku, abychom nesmíchali zbytky z jiných pokusů s pomerančem. Dáváme ochutnávat s varováním, že to lepi a nemají si toho brát hodně. Nejlepší jsou citrusy, protože se krásně rozpadnou na jednotlivé kousíčky.

Zmrzlina – efektní výroba

Pomůcky: miska, vařečka, suroviny (smetanová – např. půl litru smetany na šlehání, půl litru mléka, vanilinový cukr, nastrouhané čokoláda na vaření, hodně cukru), lžičky pro publikum a případně i malé misky

Pomocí dusíku se dá velice rychle připravit zmrzlina – během tak pěti minut – na rozdíl od obvyklé přípravy, kdy se mrazí několik hodin.

Recept používám co nejjednodušší – jsou v zásadě možné dvě alternativy

Smetanový základ – ten vede k normální smetanové zmrzlině

Tvarohový základ – ten vede k něčemu jako Míša

Další suroviny jsou pak hlavně cukr (a to spíš víc cukru než míň, protože se původně sladká směs zdá méně sladká, když se z ní udělá zmrzlina) a nějaká ochucující přísada jako například (ale nedávat současně příliš přísad) vanilinový cukr, skutečná vanilka, nastrouhaná čokoláda, nadrobená sušenka, skořice, kakao...

Cukr je potřeba pořádně rozmíchat a dosáhnout toho, že je směs chuťově přesladená, pokud chceme, aby to bylo pocitově sladké i po zchlazení

Do předem připravené rozmíchané směsi pozvolna přiléváme dusík za stálého míchání, přičemž je potřeba, aby zmrzlina sice skoro ztuhla, ale v podstatě najednou – námrazy na kraji vmíchávat dovnitř. Je to namáhavé, ale snažit se. Pozor na přimrzání hrnce k podložce. Občas se může stát, že zmrzlina „vzkypí“ – takže jak kvůli tomu, tak kvůli snadnějšímu držení hrnce, je vhodné mít výrazně větší objem hrnce než připravované zmrzliny (aspoň tak 5 krát).

Efektní jezení keksu

Pomůcky: vhodné sušenky (savé, bez náplně a polevy) nebo marshmallow

Je potřeba vyzkoušet, jestli je sušenka vhodná na vlastní nebezpečí, než to někomu dáte. Musí být tak akorát savá – tj. trochu ano, ale zase ne moc, aby nezmrzila jedlíka.

Sušenka (nebo marchmallow) se namočí do dusíku, nechá se jím nasát. Vytáhneme ji, vhodně oklepeme, aby vytekla přebytečný dusík, a jíme se zavřenou pusou. Jedlíkovi bude nosem unikat „mlha“.

Netradiční pomazánka pro dospělé

Pomůcky: vodka či jiný tvrdý alkohol

Zchlazením v dusíku po dobu tak akorát se současným mícháním se dá vytvořit pomazánka, kterou si můžete namazat na chleba. Ale jedí to jenom alkoholici a šílenci, protože je to podchlazené řádově alespoň na -30°C , takže to pěkně studí a případně to začne tát a téci.

Síla plynu, stavová rovnice plynu...

Balónek – stavová rovnice

Pomůcky: pouťový balonek

Nafoukneme balonek tak, aby se dal ponořit do polystyrenové konvice. Potom ho ponoříme. V kapalném dusíku se plyn v balonku zchladí a tím klesne tlak v balonku a ten se smrští. Dokonce dochází i ke zkapalňování a tuhnutí některých složek vzduchu v balonku (může zkapalnit i dusík, určitě kapalní a tuhne argon (var 87 K, tuhnutí 83 K), kapalní kyslík (var 90 K), tuhnou vodní páry...). Takže se může objem balonku zmenšit na zanedbatelný vůči původnímu.

Zajímavá obměna je připravit si předem do nádoby s dusíkem několik, třeba 10, prochlazených balónek (ideálně vyzkoušených takových, co moc nepraskají) a pak je začít postupně vytahovat.

Reaktivní pohon – pingpongový míček

Pomůcky: pingpongový míček s vhodně udělanou dírkou špendlíkem vhodné velikosti a vhodně našikmo; místo, kde se bude moct míček pohybovat, aniž by uletěl; nějaké kleště na míček

Pokud ponoříme dobře připravený míček do dusíku tak, že dírka je pod hladinou, může nastat nasávání kapalného dusíku do míčku. Ovšem jednak kvůli Leidenfrostovu jevu to nastane víc až po chvíli chlazení a pak dírka musí být dost malá, což vede k tomu, že to zase trvá déle. Je potřeba tam míček držet tak aspoň minutu. Pak ho stačí vytáhnout a on se bude roztáčet – otáčet se začne kolem své hlavní osy.

Míček může vzlétnout či explodovat. Pravděpodobnost exploze můžeme zvýšit tím, že ho budeme dávat do akvária s vodou, která pak může namrznat u dírky...

Gejzír

Pomůcky: trubička či hadička

Ponoříme trubičku či hadičku, která má pokojovou teplotu do dusíku. Vzhledem k její teplotě a teplotě kapalného dusíku nastane bouřlivý var, díky kterému se začnou vystříkovat kapičky dusíku.

Nemířit s hadičkou na lidi – nemají to rádi.

Mlžný opar (možný způsob likvidace dusíku)

Pomůcky: např. stačí i dech, dá se použít umyvadlo s tekoucí vodou, akvárko či ještě lépe rychlovarná konvice

Pokud do dusíku dýcháme, tak vidíme mlhu. Ta se vytvoří díky zchlazení a zkapalnění vodních par z našeho dechu. Ty normálně vidíme pouze v zimě, ale díky kapalnému dusíku je můžeme zviditelnit i v létě. Okolní vzduch pak ovšem obvykle není nasycený vodní parou (pokud to opravdu neděláte v mrazu), takže se mlha velice rychle rozpouští.

Pokud chcete efekt trochu větší, tak je možné lít kapalný dusík do umyvadla s vodou – pozor ale na to, abyste to nepřehnali a nelili to tam hodně a bez vody – pak by mohly zamrznout trubky. Lepší je si nalít vodu a zašpuntovat to – dusík se bude držet nad vodou. Ještě lepší je mít horkou vodu – třeba v rychlovarné konvici – efekt je pak výraznější. Ale také pozor na to, že když to přeženete, tak vám tam zmrzne krusta, což by mohlo poškodit konvici. Tak používejte radši tu, co už chcete vyměnit.

Puma

Pomůcky: hrnec s horkou vodou

Je vhodné provádět venku nebo ve velmi vysoké místnosti. Připravíme si co nejteplejší vodu do hrnce, dáme na zem, co nejrychleji vlijeme velké množství dusíku (jednu polystyrenovou nádobku, otočíme dnem vzhůru) a čekáme velký gejzír (je vhodné chránit si oči, publikum mít daleko). Je to trochu podobné voskovému výbuchu, i když plamenný voskový výbuch je efektnější o ten oheň a může být i větší.

Bomba

Pomůcky: PET lahev na zničení

Do PET lahve nalijeme několik cm kapalného dusíku, rychle a pevně uzavřeme, hodíme ji daleko od sebe (a daleko od něčeho, co by mohl poškodit výbuch; neházet do rybníků kvůli rybám) a utečeme pryč. Za chvíli lahev exploduje. Pevným lahvím to ale může trvat několik minut.

Rozhodně se nepřibližovat k lahvi, když neexploduje. (To už raději po ní střílet vzduchovkou.)

Světelné efekty (2015 – Mezinárodní rok světla)

Svící diody

Pomůcky: vyzkoušené LED diody, které mění barvu při změně teploty, napájení diod (+ ochranný odpor)

Různé LED diody mají tendenci měnit barvu, pokud je ponoříme do dusíku. Ale tento jev bohužel zatím není úplně vysvětlený, protože někdy se vlnová délka, na které dioda svítí, zkracuje a někdy se zvyšuje. Nefunguje to ovšem viditelně u všech diod a je proto si opravdu potřeba vyzkoušet, co které budou dělat. Některé diody třeba v dusíku jenom zhasnou.

Zhasínající světýlko – rychlost chemické reakce

Pomůcky: tyčinka Lightstick (chemické světlo)

Pokud se ponoří světýlko, tak zhasne, protože chemická reakce při nízké teplotě ustane. Když se povede zase zahřát bez poškození, tak zase začne svítit.

Rozbitá žárovka

Pomůcky: žárovka s odstraněným sklem (stačí část) (ideálně jedna připravená + 2 celé)

Pokud nemáme o žárovky nouzi, jednu rozbijeme, připojíme k napětí a na vzduchu necháme spálit. Pak můžeme druhou rozbít, ponořit do dusíku a ukázat, že v dusíku svítí. Vidíme tedy, že v žárovce není obyčejný vzduch, ale inertní atmosféra.

Další zajímavé efekty

Leidenfrostův jev

Pomůcky: ideálně rovná plocha se zvýšeným okrajem

Leidenfrostův jev nastává, pokud se kápne kapalina na povrch, který má daleko vyšší teplotu než teplotu varu dané kapaliny, tak se spodní vrstvička kapaliny ihned odpaří a kapalina tak ztratí kontakt s podložkou, začne se pohybovat po podložce – jezdí vlastně na „polštáři z par“. Vrstvička par se pod kapičkou stále udržuje vypařováním. U dusíku to funguje za pokojové teploty, u vody za teploty nad $\sim 180^\circ\text{C}$.

Kapičky mají tendenci si zachovávat rychlost, pokud jsou na rovném povrchu – to vede k tomu, že jezdí ze stolu pryč a na lidi, co to nemají rádi, když na ně něco lítá...

Tento jev nás také chrání při tom, když ponoříme ruku do kapalného dusíku. Díky vrstvičce par ruka chladne výrazně pomaleji, než kdyby byla v přímém kontaktu s dusíkem. Proto pozor – neponořovat do dusíku ruce s prstýnkami, náplastmi apod. Také trochu pozor na záděry – ty se také pěkně vymrazí!

Křehká krása

Pomůcky: květiny (např. karafiáty)

Ukážeme, že květina je do jisté míry pružná. Když s ní švihnu o desku stolu, tak se nerozbije. Ale když ji necháme zmrazit kapalným dusíkem, tak voda v ní ztuhne a i po relativně slabém úderu se rozbije.

Supravodič (případně i vláček)

Pomůcky: vysokoteplotní supravodič (např. $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7\text{Y}$), neodymový magnet, káča na magnet, může být ohmmetr, případně i vláček

Vysokoteplotní supravodiče jsou látky, u nichž nastává supravodivost i za relativně vysokých teplot, jako je teplota kapalného dusíku. Například často používaný supravodič $Ba_2Cu_3O_{7Y}$ má teplotu, při které přechází do supravodivého stavu, zhruba 90 K. Jedná se o supravodič druhého typu, supravodič prvního typu (obvykle čisté kovy) by potřeboval výrazně nižší teploty v jednotkách kelvinů.

Supravodič 2. typu ze svého objemu skoro vytlačuje magnetické siločáry (do supravodiče tohoto typu se ovšem dostávají formou drobných vírů). Můžeme si to ukázat tak, že díky tomu levituje magnet nad supravodičem. Případně supravodič pod magnetem.

Pokud máme vláček s magnetickou kolejničkou (mají na KFNT), můžeme demonstrovat princip magnetických levitačních vlaků přímo na malém modelu vláčku. Vláček sám má supravodič, který je potřeba podchladit. Magnety jsou v kolejničce uspořádány přesně tak, že by nejrady od sebe uletěly (stejně polarity k sobě), ale jsou tam napevno.

Pokud měříme odpor v supravodivém stavu, tak bychom měli naměřit pouze odpor přírodních vodičů.

Elektromagnetická indukce

Pomůcky: neferomagnetická kovová trubka (měděná, hliníková), hodně silná rukavice (ne savá)

Máme kovovou trubku, která však není feromagnetická. Nejdříve se podíváme na to, jak rychle skrz ní propadne tužka či nějaký malý předmět. Vypadne za ~ 1 s, tedy velice rychle. Pak to zkusíme s magnetem, ovšem až potom, že si ukážeme, že magnet není k trubce přitahovaný. Propadne významně pomaleji. To je díky vířivým proudům, které tečou v trubce. Ty jsou vytvářeny pohybem magnetu u vodiče. Proudů jsou tím větší, čím je nižší odpor trubky. Pokud trubku ochladíme, snížíme odpor a magnet padá ještě pomaleji.

„Matfyzácký úklid“ (alias jeden ze způsobů likvidace dusíku)

Pomůcky: stačí dusík, ideální je rovná podlaha s nějakými menšími nečistotami

Tomuto „pokusu“ se říká často Matfyzácký úklid či jenom úklid – jde prostě o to, že v jednu chvíli, třeba i trochu nečekaně, obrátíte polystyrenovou nádobu s dusíkem a vylijete ji na podlahu. Pro jistotu ale ne celou, ale jenom tak čtvrtinu či třetinu a dále od lidí, aby jim to neskončilo (moc) v botách/pantoflích. No a proč úklid? Kapičky se (díky Leidenfrostově jevu) rozjedou do všech stran a společně s sebou začnou sbírat prach a nějaké menší nečistoty, které unesou a odnesou je ke krajům místnosti. Takže jde o takový pseudoúklid, kde nám nepořádek zůstane, ale změnili jsme jeho distribuci.

Co jsem ještě raději nikdy nedělal

Kapalný kyslík

Pomůcky: tepelně vodivá nádoba (kovová) kuželového tvaru, po jejímž vnějším okraji může stékat dusík + stativový materiál pro připevnění této nádoby, vatička/kosmetický tampon na sbírání kapaliny, kovové kleště, sirky/zapalovač + špejle

Chce to mít na to speciálně připravenou sadu. Do nádoby se nalije dusík, který zchladí stěny prakticky na teplotu kapalného dusíku. Na vnější stěně nádoby pak jednak tuhnou vodní páry, tuhne argon a také kondenzuje kyslík, který po ní stéká, a můžeme ho chytat do vatičky/kosmetického tamponu, který jsme si předem podchladili v dusíku. (Nebo dovnitř druhé nádoby, která je zvenjšku chlazená dusíkem.) Měli bychom vidět lehce namodralé zabarvení kyslíku. Při přiblížení hořící špejle bychom měli vidět jasnější plamen.

Nicméně toto nemám vyzkoušené a kapalný kyslík může být nebezpečný, takže to je tip pro opravdu pokročilé.