

16 Turnaj mladých fyziků:
Úloha č. 17:
Prometheus Problem

Tým řešitelů Gymnázia Christana Dopplera Praha

18. března 2003

Obsah

1	Zadání úlohy	1
2	Tření	1
2.1	Vznik tření	1
2.1.1	Smykové tření	1
2.1.2	Valivý odpor	2
2.1.3	Kapilární tření	2
2.1.4	Obtékání tělesa tekutinou	2
2.2	Projevy tření	2
2.2.1	Zahřívání	2
2.2.2	Vznik statické elektřiny	3
2.2.3	Odštěpení látky z povrchu	3
2.2.4	Narušení vnitřní struktury	3
3	Metody rozdělávání ohně	3
3.1	Rozdělávání ohně třením dřev	3
3.1.1	Výběr dřeva	3
3.1.2	Způsoby rozdělávání ohně třením dřev	3
3.2	Rozdělávání ohně křesáním	4
3.2.1	Materiál pro vytvoření jiskry	4
3.2.2	Pomůcky pro metodu	5
4	Odhad času nutného k rozdělání ohně třením	5
4.1	Rozdělávání ohně třením dřev	5
4.2	Rozdělávání ohně křesáním	7
5	Experiment	7
5.1	Provedené pokusy	7
5.1.1	Křesání křemenem o ocílku	7
5.1.2	Tření dřevěného hrotu o podložku	8
6	Závěr	8

1 Zadání úlohy

Describe and demonstrate the physical mechanism, based on friction, which allowed our ancestors to make fire. Estimate the time needed to make fire in this way.

2 Tření

2.1 Vznik tření

2.1.1 Smykové tření

Smykové tření mezi nerovnými povrchy

Tření mezi nerovnými plochami je způsobeno deformací třecích ploch. Tato deformace je nepružná, tudíž je velká část energie potřebné k deformaci ploch převedena na energii teplotou či elektrickou (statická elektřina). Také může být vzniklá energie využita k odštěpení látky z povrchu či k narušení vnitřní struktury.

Smykové tření mezi „dokonale“ hladkými povrchy

Toto tření je způsobeno účinky přitažlivých sil mezi atomy svrchních vrstev obou povrchů. Účinky těchto sil klesají přibližně s kvadrátem vzdálenosti a proto tento typ tření vzniká pouze u dokonale hladkých povrchů. Při pohybu vrstev dochází vlivem gravitačních sil k narušení struktury povrchu a v mnoha případech k uvolnění iontů. Tyto ionty následně způsobují vznik elektrických sil mezi povrchovými vrstvami, což vede k vytváření vazby mezi nimi. Energie nutná k porušení vazby se projevuje vznikem třecích sil. V tomto případě se energie projevuje vznikem statické elektřiny, třením či zářením.

Pro tření je znám vztah

$$F_t = F_n \cdot f, \quad (1)$$

kde F_t je třecí síla, F_n je normálová síla působící v daném místě a f je součinn smykového tření.

Nutno podotknout, že třecí síla působí vždy proti směru průmětu výslednice rozdílů ostatních sil působících na obě tělesa do třecí plochy a že třecí síla má velikost maximálně daného průmětu. Toto pravidlo platí i pro valivý odpor.

2.1.2 Valivý odpor

Toto tření je způsobeno deformací podložky při kutálení přemětu, kde se povrch podložky deformuje tak, že se před kutáleným tělesem vytváří „navalenina“ (hmota, která tam byla kutáleným předmětem vytlačena), a tato hmota vytváří předmětu energetickou bariéru, kterou musí překonat, čímž dochází k úbytku energie reprezentovanému valivým odporem.

Základním vztahem pro valivý odpor je vztah

$$F_t = F_n \frac{\xi}{r}, \quad (2)$$

kde F_t je třecí síla, F_n je normálová síla, r je poloměr kutáleného předmětu a ξ je poloměr valivého odporu.

2.1.3 Kapilární tření

Kapilární tření je smykové tření mezi vrstvami kapaliny pohybujícími se různou rychlostí.

2.1.4 Obtékání tělesa tekutinou

Obtéká-li tekutina těleso, dochází ke křížení proudnic, což vede ke zvýšení chaotického pohybu. Proudnice se kříží jak před obtékaným tělesem z důvodu nutné změny trajektorie částic, tak za tělesem, kde v mnoha případech vzniká podtlak, který jednak zpomaluje pohyb tekutiny („vrací“ těleso zpět vůči tekutině), ale také vede ke křížení proudnic.

Tetno chaotický pohyb a fakt, že těleso mění tvar proudnic, vedou k tomu, že kapalina vyvíjí větší tlak na těleso a to vede ke zvýšení tření mezi kapalinou a tělesem.

2.2 Projevy tření

2.2.1 Zahřívání

Nejčastěji se tření projevuje zahříváním. Zahřívání při tření využijeme i při řešení této úlohy, neboť právě zahříváním můžeme nejnázne docílit vznětu zapalované látky.

2.2.2 Vznik statické elektřiny

Vlivem tření často dochází k uvolňování látky z povrchu, jež často bývá elektricky nabitá. Tento náboj, jsou-li látky nevodivé, způsobí statickou elektřinu. Tento jev je velice dobře zřetelný, třeme-li ebonitovou tyč liščí ohonem. Nemáme-li však ebonitou tyč a liščí ohon a potřebujeme třením vytvořit statickou elektřinu, můžeme použít skleněnou tyč a přírodní kůži.

2.2.3 Odštěpení látky z povrchu

Vlivem tření může také dojít k odštěpení látky z povrchu. To je způsobeno velice silným propojením částí povrchů obou látek, případně tím, že jeden předmět je schopen vyvinout takový hrotový tlak, že se část povrchu oddělí. Toto je v úloze využito k výrobě dřevěných pilin.

2.2.4 Narušení vnitřní struktury

Tření může při prudkých pohybech dvou povrchů o sebe způsobit narušení struktury nejen na povrchu, ale i uvnitř předmětu.

3 Metody rozdělování ohně

3.1 Rozdělování ohně třením dřev

3.1.1 Výběr dřeva

Potřebujeme-li rozdělat oheň, potřebujeme dřevo, jež má největší součin smykového tření. Obecně platí pravidlo, že čím měkké dřevo, tím větší je součin smykového tření. U nás je nejlépe dostupné měkké dřevo dřevo lipové či březové.

Další výhodou měkkého dřeva je to, že čím tvrdší dřevo, tím více se štípe a tím větší piliny tvoří, a protože záplná teplota pilin klasá s klesající velikostí, je měkké dřevo pro rozdělování ohně výhodnější.

3.1.2 Způsoby rozdělování ohně třením dřev

Tření dvěvětého hrotu o podložku

Vezmeme relativně hladkou dřevěnou desku a vyvrtáme v ní drobný důlek. Dále použijeme klacík, na jehož konci vytvoříme hrot. Následně přiložíme

klacík hrotem do důlku a klacík roztočíme. Naši předkové k roztáčení klacíku používali ruku či tětívu nataženého luku. Rotačním pohybem vyvineme třecí sílu, jež způsobí zahřívání postupně vedoucí k zažehnutí plamene. Při rozžehávání ohně dochází vlivem tření na styčné ploše k odštěpování částí povrchu (pilin) majících nižší zápalnou teplotu a zjednodušujících rozdělávání ohně. Pro tuto metodu je velice vhodné mít ostrý hrot, protože se vlivem tření ohřívá menší fragment povrchu a tím se zefektivňuje zahřívání.

Jiná situace nastává, jestliže použijeme troud, což je drť z velice suchého a velice ztrouchnivělého dřeva. S troudem je totiž výhodnější mít větší styčnou plochu, neboť zápalná teplota troudu je velice nízká, ale výhřevnost troudu je také nízká, čili je potřeba zažehnout větší množství troudu pokud možno současně, aby bylo větší teplo získané z hoření troudu a větší šance na zažehnutí pilin.

Tření dvou dřevěných tyček

Další, spíše vyjmečně používanou metodou je tření dvou dřevěných tyček či klacíků o sebe. Zde se snažíme docílit co nejmenších třecích ploch při zachování co největší rychlosti a co největšího přitlaku (tj. silou, kterou přitlačujeme tyčky sobě). Tato metoda má výhodu, že jsou-li vhodné podmínky, tak i člověk, který nemá cvik v rozdělávání ohně třením dřev, může být snadno schopen oheň rozdělávat.

3.2 Rozdělávání ohně křesáním

3.2.1 Materiál pro vytvoření jiskry¹

Použití tvrdých kamenů

Při této metodě se jiskru snažíme vytvořit prudkým křísnutím dvou kamenů, obvykle křemenů, o sebe. Tato metoda není až tolik úspěšná, ale má výhodu v tom, že křemen je relativně dostupný kámen.

Křesání pomocí ocílky

Pro vytvoření zápalné jiskry se také velice často používá křesání ocílky o křemen či ocílky o ocílku. Tato metoda je velice rychlá a úspěšná, neboť třením ocílky o ocílku či o křemen vzniká mnoho velice horkých jisker. Nevýhodou je, že v přírodě asi ocílku moc často nenajdeme :-).

¹Jiskra je pojem pro horkou, často elektricky nabitou částici látky, se kterou křesáme.

3.2.2 Pomůcky pro metodu

Při této metodě vytváříme pouze malou jiskru — ta sice má vysokou teplotu, ale nese malé užité teplo, neboť má malou hmotnost. Tudíž potřebujeme látku, jež má nízkou zápalnou teplotu a dostatečnou výhřevnost. V tomto případě nejlépe zužitkujeme drobné, nejlépe třením vytvářené piliny z měkkého dřeva.

4 Odhad času nutného k rozdělení ohně třením

4.1 Rozdělování ohně třením dřev

U těchto metod je čas nutný k rozdělení ohně celkem vysoký, podle atmosférických podmínek se pohybuje od několika minut do několika hodin (viz Tabulka 1).

Element	Význam elementu
Teplota	Nemá velký vliv, čím vyšší, tím lépe
Vlhkost	Výrazný element, ideální kolem 20% rel.
Vítr	Významný vliv, je nutno jej eliminovat

Tabulka 1: Věci mající vliv na čas rozdělování ohně třením dřev

Přibližný výpočet času

Nechť zápalná teplota pilin je o T vyšší než teplota dřeva. K rozžehnutí ohně potřebujeme zapálit m dřeva. Součin smykového tření dřeva je f a jeho měrná tepelná kapacita je c . Budeme předpokládat metodu krouživého pohybu se styčnou plochou tvaru kruhu o poloměru R s tím, že dosáhneme úhlové rychlosti ω a tlačít budeme hrot k desce silou F . Účinnost celého procesu stanovíme na η . Do účinnosti bychom měli zahrnout především ztráty energie do prostředí.

Abychom zapálili m dřeva, Potřebujeme mu dodat teplo $Q = mcT$, což znamená vykonat práci

$$W = \frac{Q}{\eta} = \frac{mcT}{\eta}. \quad (3)$$

Třecí síla $F_t = fF$ způsobuje tlak

$$p = \frac{F_t}{S} = \frac{fF}{\pi R^2}. \quad (4)$$

Nyní zpočtu výkon jako integrál součinu Fv podle poloměru styčné plochy:

$$P = \int_0^R p S(r) v(r) dr \quad (5)$$

$$S(r) = 2\pi r dr \quad (6)$$

$$v(r) = \omega r \quad (7)$$

$$P = \int_0^R \frac{fF}{\pi R^2} \cdot 2\pi r dr \cdot \omega r \quad (8)$$

$$P = \frac{2fF\omega}{R^2} \left[\frac{r^3}{3} \right]_0^R \quad (9)$$

$$P = \frac{2}{3} fF\omega R \quad (10)$$

Výsledný čas τ nutný k zapálení je podílem práce W a výkonu P :

$$\tau = \frac{\frac{mcT}{\eta}}{\frac{2}{3} fF\omega R} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{3mcT}{2\eta fF\omega R} \quad (12)$$

Hodnoty odhadů výsledného času pro různé typické vstupní hodnoty jsou v Tabulce 2.

$\{t\}$	$\{m\}$	$\{c\}$	$\{f\}$	$\{R\}$	$\{\omega\}$	$\{F\}$	$\{\eta\}$	τ	Situace
300	0,010	500	0,5	0,005	100	50	0,3	600 s	Klasicky bez pilin
250	0,015	300	0,8	0,005	100	50	0,3	450 s	Klasicky s pilinami
300	0,010	3000	0,5	0,005	100	50	0,3	3600 s	S navlhlým dřevem

Tabulka 2: Hodnoty odhadů výsledného času rozdělávání ohně pomocí dřevěného hrotu pro různé typické vstupní hodnoty

4.2 Rozdělávání ohně křesáním

Zde je v podstatě velice málo možností:

1. Velice brzy (třeba i do jedné minuty) se nám podaří vytvořit vhodnou jiskru pro zažehnutí ohně
2. Daří se nám vyrábět dobré jiskry, ale látka, již máme připravenou pro pohlcování jisker, se nevzněcuje. V tomto případě můžeme zkusit látku lépe vysušit. Pokud ani toto nepomůže, tak s velkou pravděpodobností i hodinové úsilí nepovede k výsledku.
3. Máme sice dobrý troud či jinou dobře hořlavou látku, ale nedaří se nám vytvořit dobrou jiskru. V tom případě je jedinou možností zachovat trpělivost a vytvářet jiskry tak dlouho, až se nám podaří oheň roznítit. Na rozdělání ohně je zde větší pravděpodobnost než v případě 2.
4. Máme špatné křesadlo² a když už se nám podaří vykřesat dobrou jiskru, tak stejně nezpůsobí vzplanutí zapalované látky. Zde v podstatě není šance na rozdělání ohně.

5 Experiment

Náš experiment spočíval ve vyzkoušení různých metod a následného vyhodnocení výsledků které jsme získali.

5.1 Provedené pokusy

5.1.1 Křesání křemenem o ocílku

Na podložce z hrubě opracovaného lipového dřeva jsme rozsypali trochu troudu a následně jsme nad touto podložkou třeli ocílkou o křemen, čímž docházelo k uvolňování jisker, jež nám roznítily troud. Rozdělávání ohně touto cestou nám trvalo asi 2 minuty, vyžaduje to ale předem připravený troud a musíme mít k dispozici křemen a ocílku.

²Zařízení na křesání jiskry

5.1.2 Tření dřevěného hrotu o podložku

Tato metoda vyžaduje pouze správné dřevo a ostrý nástroj (nůž) na vytvoření hrotu a vyříznutí důlku (zářezu). Zjistili jsme, že nejlepší metodou je do dřevěného prkénka z boční stěny vyříznout v žlábek. Do žlábků následně vyříznout kužel tak, aby osa kužele byla dále od boční stěny prkénka než je vrcholová přímka žlábků a aby kužel sahal přibližně 1 cm do prkénka. Do kužele umístíme dřevěný hrot a s hrotem otáčíme. Hrot i prkénko by měly být hrubě opracované a z měkkého (např. lipového) dřeva.

6 Závěr

Dospěli jsme k závěru, že nejlepší metodou k rozdělání ohně, kterou mohli používat naši předkové je metoda tření dřev, konkrétně metoda dřevěného dřívku, jež otáčíme v důlku u boční stěny dřevěné desky (viz 5.1.2).