

FYZIKA A DOPRAVNÍ NEHODY

Lenka Czudková, Přírodovědecká fakulta MU, Brno

O dopravních nehodách informují sdělovací prostředky velmi často. Aktuálně upozorňují řidiče na jimi tvořené překážky v silničním provozu, statistikami a obrazovým materiálem varují před tragickými následky neopatrné či riskantní jízdy. Téměř nikdy ale nenaznačí, co obnáší vyšetřování, které vždy stojí za krátkým sdělením o průběhu konkrétní nehody. V nejobecnějším smyslu přitom nejde o nic jiného než o praktické využívání fyzikálních poznatků: zákonům fyziky je totiž bez výjimky podřízen veškerý pohyb a žádným způsobem je – na rozdíl od dopravních předpisů – nelze porušit nebo obejít.

Článek ukazuje, že při zjišťování příčin dopravních nehod se mohou významně uplatnit i středoškolské poznatky z mechaniky. Vyšetřování dopravních nehod se tak řadí do souboru témat, jež mohou pomoci překlenout častou propast mezi teoretickými znalostmi studentů a širokými aplikacemi fyziky v běžném životě.

1. Vyšetřování dopravních nehod

Dopravní nehodou označujeme nečekanou (i když do jisté míry předvídatelnou) událost, která je spojena s provozem dopravních prostředků a vede ke hmotné škodě, úrazu nebo smrti. Podle druhu dopravy rozdělujeme i nehody na silniční, železniční, letecké, plavební, příp. kosmické. Zde se však budeme zabývat pouze prvně jmenovanými událostmi, protože se silničním provozem mají občané nejvíce zkušeností: účastní se jej takřka denně v rolích řidičů, cestujících, chodců a v poslední době stále častěji také v roli cyklistů. V dalším tedy máme pod pojmem „dopravní nehoda“ automaticky na mysli dopravní nehodu silniční.

Každou dopravní nehodu provází vyšetřování. Jeho úkolem je vytvořit co nejreálnější představu o průběhu o příčinách nehody, prokázat míru zavinění jednotlivých účastníků, rozhodnout, zda adekvátně reagovali na blížící se nebezpečí, případně také posoudit, jakým způsobem by bylo možné nehodě zabránit nebo alespoň zmírnit její následky (vyhnutím, včasnějším a silnějším brzděním atd.). Základním – a oproti svědeckým výpovědím nezpochybnitelným – materiálem, z něhož vyšetřovatelé vycházejí, jsou stopy zanechané vozidly nebo chodci v bezprostředním okolí nehody. Úplnou klasifikaci stop lze spolu s jejich vypovídací hodnotou nalézt např. v [3] a [4], na tomto místě uvedeme pouze stopy důležité pro analýzu pohybu vozidel před nehodou. Jde o:

- Stopy jízdy, které zanechávají volně se otáčející kola. Bývají zřetelné jen na podkladu s tvárným povrchem (např. bláto, sníh, prašná vozovka), otisk vzorku pneumatiky na vozovce je stejný jako ve skutečnosti.
- Stopy brzdné, které vznikají brzděnými, ale stále se ještě otáčejícími koly. V důsledku deformace brzděných kol se otisk vzorku pneumatiky na vozovce rozmazává ve směru jízdy a tvar jednotlivých obrazců vzorku je větší než ve skutečnosti. Protože se při brzdění zvyšuje tlaková síla předních kol na vozovku (podrobněji část 2.), bývají brzdné stopy patrné i na tvrdším podkladě.

- Stopy blokovací, v něž přecházejí stopy brzdné v případě, že brzdící moment vzhledem k ose kola překročí moment adhezní síly mezi pneumatikou a vozovkou, kolo se přestává otáčet a smýká se po vozovce¹. Při tom se zahřívá horní vrstva vozovky i pneumatika, z níž se oddělují částičky gumy, a proto je blokovací stopa velmi výrazná – má podobu několika tmavých pruhů.

Právě vyjmenované stopy reflektují režim jízdy vozidel před nehodou. Ukazují, kdy řidiči začali brzdit, kdy se brzdění zesílilo natolik, že kola blokují a kde došlo ke střetu vozidel. Hlavně však umožňují změřit celkovou brzdnou dráhu, z níž lze aplikací obecných poznatků o pohybu brzděného vozidla odhadnout jeho původní rychlost.

2. Brzdění vozidla

Brzděním rozumíme záměrné snižování rychlosti vozidla. Pro základní analýzu takového pohybu budeme uvažovat zjednodušenou situaci, kdy automobil jede po přímé vodorovné silnici, zanedbáme odpor vzduchu a rovněž nebudeme uvažovat valivý odpor daný deformací kol a jízdní dráhy.

V souvislosti s brzděním má v dopravní problematice klíčový význam dráha potřebná k zastavení vozidla. Skládá se ze dvou částí:

- Reakční vzdálenosti, kterou urazí nebrzděné vozidlo za reakční dobu řidiče a za dobu prodlevy brzd.
 - Reakční doba řidiče je doba, která uplyne od okamžiku, kdy řidič zpozoruje blížící se nebezpečí do okamžiku, kdy přenese nohu na brzdový pedál. Orientační hodnoty reakční doby udává tab. 1.

Zkušený řidič připravený brzdit	0,6 – 0,7 s
Pozorný řidič, který nečeká překážku	0,7 – 0,9 s
Řadící nebo předjíždějící řidič	1,0 – 1,2 s
Nepozorný řidič	1,4 – 1,8 s
Indisponovaný řidič (únavou, nemocí, požitím alkoholu)	1,6 s a více

Tab. 1 (podle [1]; podrobnější roztřídění lze najít např. v [3] a [4])

¹ Adhezní síla je síla působící tečně v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou. Protože je pneumatika na rozdíl od modelu dokonale tuhého kola pružná, je adheze jev složitější než běžné tření. Pro maximální velikost adhezní síly mezi otáčejícím se kolem a vozovkou ale platí podobně jako pro maximální velikost statické třecí síly vztah

$$F = \mu_0 N,$$

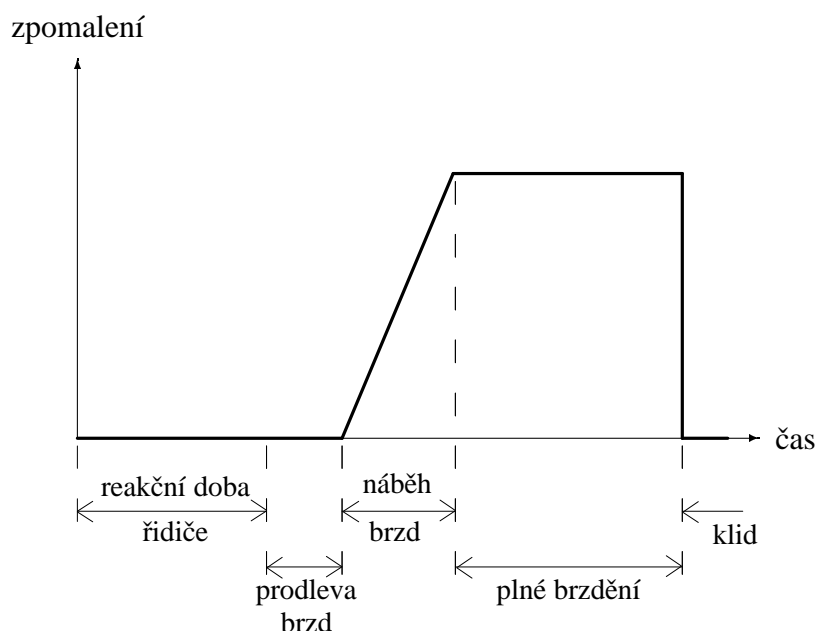
kde N označuje velikost tlakové síly kola na vozovku a μ_0 je koeficient adheze, který závisí na jakosti vozovky i pneumatiky a na rychlosti jízdy. Podobně pro velikost adhezní síly mezi smýkajícím se (blokováním) kolem a vozovkou platí vztah

$$F = \mu N,$$

kde koeficient adheze μ je za jinak stejných podmínek obecně menší než μ_0 (podrobněji např. [3], [4]).

- Doba prodlevy brzd je určena intervalem, který uplyne od okamžiku řidičova kontaktu s brzdovým pedálem do okamžiku, kdy brzdy začínají účinkovat. Je závislá na typu a stavu brzd, průměrně činí 0,05 s ([3], [4]).
- Dráhy brzděného vozidla, která se dělí na dráhu, v níž nabíhá účinek brzd, a dráhu plně brzděného vozidla.
 - Doba náběhu brzděného účinku je dána intervalem od okamžiku, kdy brzdy začínají účinkovat do okamžiku dosažení maximálního zpomalení². Obvykle se počítá s hodnotou 0,15 s ([3], [4]).
 - Dráha plně brzděného vozidla se v praxi ztotožňuje s délkou brzdných stop, přestože nějaký čas trvá, než plně brzděná kola začnou na vozovce zanechávat stopy. Tato skutečnost mluví při odhadu původní rychlosti vozidla ve prospěch řidiče.

Fáze pohybu brzděného vozidla schematicky znázorňuje obr. 1



Obr. 1

Samotné brzdění vozidla zajišťují adhezní síly \vec{F}_{b1} , \vec{F}_{b2} mezi pneumatikami kol přední a zadní nápravy (obr. 2). Celková brzdná síla je jejich vektorovým součtem, tj.

$$\vec{F}_b = \vec{F}_{b1} + \vec{F}_{b2}.$$

Další rozbor závisí na tom, zda se brzděná kola otáčejí nebo blokují.

Pro otáčející se kola platí $F_{b1} \leq \mu_0 N_1$ a $F_{b2} \leq \mu_0 N_2$, kde N_1 a N_2 jsou celkové tlakové síly vozovky na kola přední a zadní nápravy. Potom

$$F_b = F_{b1} + F_{b2} \leq \mu_0 (N_1 + N_2) = \mu_0 mg = ma_{max},$$

²Průměrné zpomalení se zde zpravidla bere jako polovina zpomalení maximálního.

kde m označuje hmotnost vozidla, g tíhové zrychlení a $a_{max} = \mu_0 g$ je maximální dosažitelné zpomalení. Výpočet konkrétní hodnoty zpomalení a již ale mírně přesahuje středoškolský rámec, protože musíme formulovat první a druhou impulsovou větu pro automobil a kola (viz obr. 2):

- První impulsová věta pro automobil:
(druhý Newtonův zákon pro pohyb těžiště automobilu)

$$ma = F_{b1} + F_{b2} \quad (1)$$

$$mg = N_1 + N_2 \quad (2)$$

- Druhá impulsová věta pro automobil:
(podmínka rovnováhy momentů sil vzhledem k vodorovné ose, která prochází těžištěm automobilu a je rovnoběžná s osami otáčení kol)

$$N_1 x_1 - N_2 x_2 - (F_{b1} + F_{b2}) h = 0 \quad (3)$$

- Druhá impulsová věta pro každé z dvojice kol přední nápravy:
(výsledný moment sil působících na kolo o poloměru r a momentu setrvačnosti J vzhledem k jeho ose otáčení mu udílí úhlové zpomalení $\varepsilon = \frac{a}{r}$)

$$J \frac{a}{r} = M_{b1} - \frac{F_{b1}}{2} r \quad (4)$$

- Druhá impulsová věta pro každé z dvojice kol zadní nápravy:

$$J \frac{a}{r} = M_{b2} - \frac{F_{b2}}{2} r, \quad (5)$$

kde M_{b1} a M_{b2} označují po řadě brzdné momenty, jimiž brzdový mechanismus působí na jednotlivá kola přední a zadní nápravy. Sečtením (4) s (5) a dosazením z (1) získáme obecný výsledek

$$a = \frac{2r (M_{b1} + M_{b2})}{4J + mr^2}. \quad (6)$$

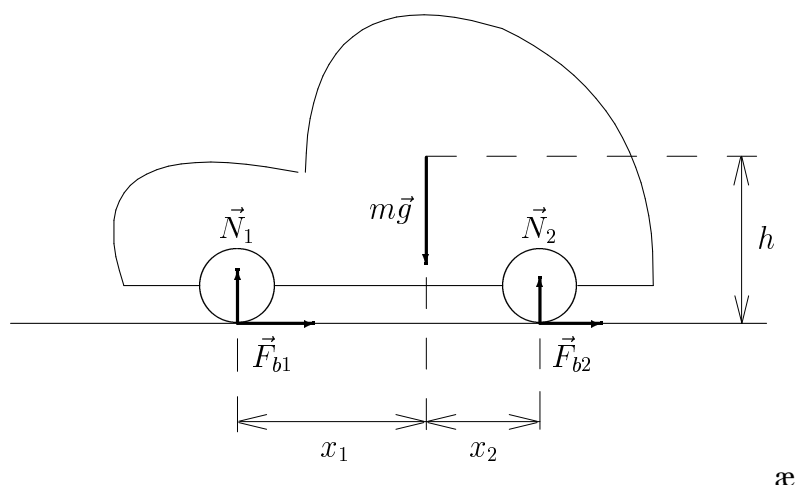
Abychom tedy výpočtem zjistili zpomalení automobilu, potřebujeme znát parametry kol (poloměr a moment setrvačnosti) a technické údaje pro daný typ brzd (hodnoty brzdných momentů M_{b1} a M_{b2} pro konkrétní intenzitu brzdění). Připomeňme však, že i při sebeúčinnějších brzdách nikdy nelze překročit hodnotu $a_{max} = \mu_0 g$.

Z (1), (2), (3) a (6) dále dostáváme vzorce pro zatížení přední a zadní nápravy

$$N_1 = \frac{m}{x_1 + x_2} (gx_2 + ah) = \frac{m}{x_1 + x_2} \left[gx_2 + \frac{2rh (M_{b1} + M_{b2})}{4J + mr^2} \right],$$

$$N_2 = \frac{m}{x_1 + x_2} (gx_1 - ah) = \frac{m}{x_1 + x_2} \left[gx_1 - \frac{2rh (M_{b1} + M_{b2})}{4J + mr^2} \right],$$

z nichž je přímo vidět, že pro brzděné vozidlo je zatížení přední nápravy větší než pro vozidlo nebrzděné ($a = 0 = M_{b1} = M_{b2}$).



Obr. 2

Podstatně jednodušší je výpočet zpomalení vozidla v případě, že všechna čtyři kola blokují. Potom

$$ma = F_b = F_{b1} + F_{b2} = \mu (N_1 + N_2) = \mu mg \Rightarrow a = \mu g.$$

Může ovšem nastat i složitější situace, kdy blokují jenom přední kola a zadní se otáčejí nebo naopak, popř. jsou brzděna jenom některá kola. V tom případě získáme zpomalení vozidla kombinováním obou uvedených postupů.

3. Stanovení původní rychlosti vozidla

Předpokládáme-li, že se brzděné vozidlo pohybuje s konstantním zpomalením, vyjádříme jeho původní rychlost v_0 z kinematických vzorců pro dráhu a rychlost rovnoměrně zpomaleného pohybu, a to v závislosti na délce brzdných či blokovacích stop l a na rychlosti vozidla v v okamžiku srážky (o určení v pojednáme v části 4.). Vychází

$$v_0 = \sqrt{2al + v^2}. \quad (7)$$

Vztah (7) ovšem platí pouze přibližně. Jednak není možné zcela přesně vymezit počátek brzdných či blokovacích stop a tím dráhu l , takže odhadujeme jen určité rozpětí rychlosti v_0 . Dále víme, že vozidlo se pohybuje s náběhovým a krátce poté s plným zpomalením (viz obr. 1), a to ještě dříve, než začnou brzděná kola na vozovce zanechávat stopy. Vztah (7) tedy udává dolní odhad rychlosti, což ovšem plně postačuje k důkazu o případném překročení maximální povolené rychlosti. Konečně je také potřeba zdůraznit, že zpomalení vozidla není ve skutečnosti konstantní, neboť koeficient adheze závisí na rychlosti vozidla a v případě blokováných kol se mění s jejich rostoucí teplotou. V širokém rozmezí běžně dosahovaných rychlostí však dobře vystačíme se zjednodušujícím předpokladem $a = \text{konst.}$

Ke stanovení v_0 zbývá zjistit zpomalení a (resp. koeficienty adheze μ_0 nebo μ) pro dané obutí vozidla a daný povrch. Tyto hodnoty se určují experimentálně. Metoda spočívá buď v grafickém záznamu okamžitého zpomalení testovacího vozidla přístrojem, který reaguje na setrvačnou sílu (např. [3]), nebo v měření dráhy a času od sešlápnutí brzdového pedálu do zastavení.

Druhou variantu lze aplikovat i s běžně dostupnými pomůckami – stopkami a pásmem, ke získání přesnějších výsledků je potřeba speciální vybavení, např.: Na zadní nárazník zkušebního vozidla se umístí odpalovací zařízení spojené se stopkami a s brzdovým pedálem. Ve vozidle sedí kromě řidiče obsluha zařízení, která v jistém okamžiku odpálí první palník. V okamžiku, kdy řidič sešlápne brzdový pedál, se pak automaticky odpálí druhý palník. Časový interval mezi odpálením prvního a druhého palníku a vzdálenost stop zanechaných odpalovacím zařízením na vozovce určují reakční dobu řidiče a reakční vzdálenost. Ze vzdálenosti stojícího vozidla a místa, v němž byl odpálen druhý palník, se užitím vztahu (7) vyjadřuje průměrné brzdné zpomalení. Experiment se opakuje pro několik počátečních rychlostí v_0 . Použije-li se při něm současně metoda grafického záznamu zpomalení, lze navíc jednak odhadnout chybu, které se dopustíme při výpočtu v_0 z délky brzdných stop, jednak podle vztahu (6) usuzovat na velikost brzdných momentů a tím také na technický stav vozidla.

Hodnoty koeficientů adheze pro brzděná otáčející se kola a nejběžnější povrchy uvádí tab. 2.

VOZOVKA		μ_0
beton	suchý	0,8 – 1,0
	mokrý	0,5 – 0,8
asfalt	suchý	0,6 – 0,9
	mokrý	0,3 – 0,8
dlažba	suchá	0,6 – 0,9
	mokrá	0,3 – 0,5
makadam	suchý	0,6 – 0,8
	mokrý	0,3 – 0,5
polní cesta	suchá	0,4 – 0,6
	mokrá	0,3 – 0,4
sníh		0,2 – 0,4
náledí		0,1 – 0,3

Tab. 2 (podle [3] a [4])

Rozdíl v hodnotách koeficientů adheze pro bloková a otáčející se kola činí přibližně 4 až 7% ([8]).

4. Stanovení rychlosti vozidla těsně před srážkou

Možností, jak stanovit rychlost v vozidla těsně před srážkou, se nabízí hned několik, v praxi se ale podle situace uplatňují pouze některé. Protože je detailní analýza střetu dvou vozidel (příp. vozidla a pevné překážky) značně obtížná a přesně matematicky neproveditelná, vychází se při ní z četných předpokladů a výsledků empirických zkoušek, které se více nebo méně blíží realitě. Rychlost v tedy zpravidla nelze zjistit zcela přesně, ale je možné určit interval, v němž leží. Využívá se přitom:

- Zákona zachování energie, kdy se poměrně komplikovaným způsobem vyhodnocuje deformace vozidel a poškození jejich bezprostředního okolí.

- Rozmístění letících těles (např. střepin), která se během rázu uvolnila z vozidel, v okolí místa nehody. Tato tělesa se do okamžiku kontaktu s vozovkou pohybují velmi jednoduchým způsobem – po trajektorii vodorovného vrhu, další pohyb lze v závislosti na rychlosti před rázem popsat pouze přibližně: tělesa se stejně jako i vozovka deformují, ve svislém směru jsou bržděna tlakovou silou vozovky a současně ve směru vodorovném třecí silou.
- Závěru o druhu a rozsahu zranění osádky vozidla nebo chodců (spolu se specialisty z oboru soudního lékařství).
- Zákona zachování hybnosti a momentu hybnosti – ovšem pouze za předpokladu, že doba trvání rázu je natolik krátká, aby se během něj nestačily výrazněji uplatnit adhezní síly a soustava tvořená vozidly se tak při něm chovala jako izolovaná. Popis obecného rázu pouze užitím zákona zachování hybnosti a momentu hybnosti není možný, proto se opět zavádějí některé zjednodušující předpoklady.

Zvláště jednoduchá je situace v případě středového (obecně šikmého) rázu. Po něm se vozidla – zpravidla stále bržděná – pohybují sice jiným směrem, avšak translačně, tj. nerotují. Z délky brzdných či blokovacích stop lze užitím analogie vztahu (7) stanovit jejich rychlosti bezprostředně po rázu a aplikací zákona zachování hybnosti pak rychlosti těsně před rázem.

Podrobnější informace k uvedeným metodám odhadu rychlosti v , příslušné vzorce a empiricky stanovené grafy lze vyhledat např. v [3], příp. [4].

5. Závěr

V předcházejících odstavcích byla vyložena podstata metody odhadu původní rychlosti havarovaného vozidla, která je srozumitelná i středoškolským studentům. Přestože úplné vyšetřování dopravních nehod je obecně poměrně komplikovanou záležitostí patřící do rukou specialistů, některé dílčí problémy z této oblasti lze řešit i v hodinách fyziky, např.:

- Odhadovat celkovou dráhu potřebnou k zastavení vozidla jedoucího rychlostí v_0 a bezpečnou vzdálenost mezi vozidly jedoucími rychlostmi v_1, v_2 (2. a 3. část tohoto článku, dále [2], [3], [4], [8]).
- Analyzovat předjíždění vozidla a jeho bezpečnost v konkrétních dopravních situacích ([2], [3], [4], [8]).
- Provádět detailní rozbor některých jednodušších dopravních nehod ([1], [7]).
- Obecně i v konkrétních situacích posuzovat srážku automobilů z hlediska zákona zachování hybnosti ([3], [4], [5], [6], [7]).
- Diskutovat míru nebezpečí srážky automobilu pro jeho osádku ([6]).
- Vyjádřit maximální rychlost automobilu pro bezpečný průjezd zatáčkou daných parametrů ([2], [3], [4]).

- Popsat rozdíl ve zpomalení vozidla brzděného na rovině a ve svahu, příp. také v zatáčce ([2], [3], [4]).

Další náměty pak lze najít zejména v publikaci [3], která o vyšetřování dopravních nehod poskytuje velmi podrobné a zasvěcené informace.

Literatura:

- [1] Anslow J. S.: *The analysis of an accident*. Physics Education **33**, 5 (1998) 286–292.
- [2] Bednařík M., Šíroká, M.: *Rychlost a bezpečná jízda*. SPN, Praha 1972.
- [3] Bradáč A. a kol.: *Příručka znalce – analytika silničních nehod*. Dům techniky ČSVTS, Ostrava 1985.
- [4] Porada V. a kol.: *Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi*. Linde, Praha 2000.
- [5] Rauner K.: *Jaká je nejlepší srážka v automobilu?* Školská fyzika **VI.**, mimořádné číslo (1999) 80 – 82.
- [6] Rauner K.: *Jak probíhá srážka automobilu?* Školská fyzika **VI.**, mimořádné číslo (1999) 83–87.
- [7] Tao P. K.: *Traffic accident investigation: a suitable theme for teaching mechanics*. Physics Education **22**, 5 (1987) 284–291.
- [8] Tyl J.: *Jak jezdit bez nehod*. SNTL, Praha 1967.