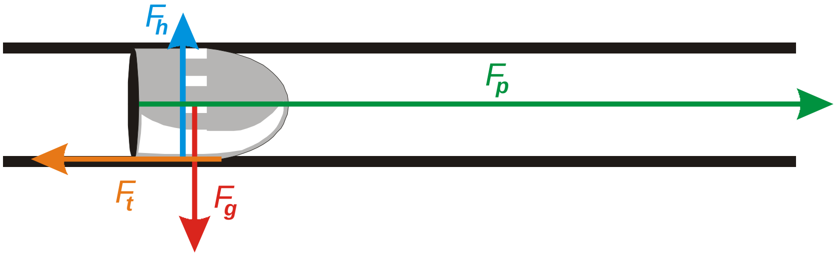
1.2.15 Zákon zachování hybnosti I

Předpoklady: 1207

Dneska se budeme zabývat střelbou z palných zbraní.
Při výstřelu získá střela obrovskou rychlost a zbraň odskočí na druhou stranu. Proč?

Př. 1: Na obrázku je nakreslena střela uvnitř hlavně pušky. Nakresli síly, které na ní působí.



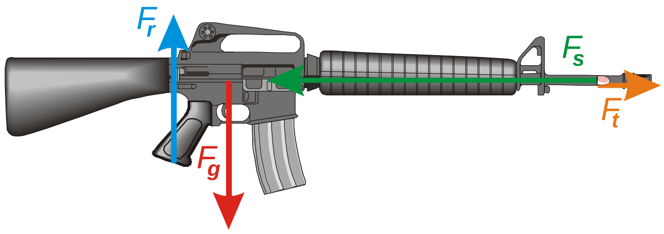
Působící síly:

- gravitační síla F_g kolmo dolů,
- tlaková síla F_h hlavně, kolmo nahoru,
- třecí síla F_t mezi nábojem a hlavní,
- vystřelovací síla pušky F_p urychlující střelu z hlavně.

Poměry velikostí sil neodpovídají skutečnosti. Síla F_p je vzhledem k silám F_g a F_h daleko větší.

Zkoumáme pohyb střely ve vodorovném směru, „vystřelovací“ síla pušky je zdaleka největší
$\Rightarrow$ ostatní síly zanedbáme.
$\Rightarrow$ Vystřelovací síla pušky působí na střelu a uděluje jí hybnost směrem doprava.
Předpokládáme, že po dobu Δt se velikost síly nemění (zvolíme si tak malé Δt, aby to byla s velkou přesností pravda) $\Rightarrow$ pro změnu hybnosti náboje platí: $\Delta \boldsymbol{p}_s = \boldsymbol{F}_p \cdot \Delta t$.

Př. 2: Rozeber, jaké síly působí během výstřelu na pušku. Jak se mění její hybnost. Zabývej se pouze silami působícími ve vodorovném směru a proveď zanedbání obdobná zanedbáním při rozboru působení sil na náboj. Předpokládej, že střelec nemá během výstřelu pušku opřenou o rameno (což je samozřejmě chyba), pouze ji zespodu podepírá rukou.



Působící síly:

- gravitační síla F_g,
- podpírací síla ruky F_r,
- síla od střely F_s (partnerská síla k síle, kterou puška urychluje střelu),
- tření mezi kulkou a hlavní F_t (partnerská síla k třecí síle, která zpomaluje kulku).

První dvě síly působí ve svislém směru, čtvrtá síla je zanedbatelně malá v porovnání se třetí silou $\Rightarrow$ po zanedbání působí na pušku ve vodorovném směru pouze síla F_s $\Rightarrow$ změna hybnosti pušky $\Delta \boldsymbol{p}_p$: $\Delta \boldsymbol{p}_p = \boldsymbol{F}_s \cdot \Delta t$.

Síly $\boldsymbol{F}_s$ a $\boldsymbol{F}_p$ tvoří partnerskou dvojici ze 3. Newtonova zákona $\Rightarrow$ platí: $\boldsymbol{F}_s = -\boldsymbol{F}_p$. Co to znamená pro změny hybnosti?

$\Delta \boldsymbol{p}_s = \boldsymbol{F}_p \cdot \Delta t = -\boldsymbol{F}_s \cdot \Delta t = -\Delta \boldsymbol{p}_p$

$\Delta \boldsymbol{p}_s = -\Delta \boldsymbol{p}_p$ $\Rightarrow$ Pokud puška změní hybnost střely v jednom směru, změní střela o stejnou hodnotu hybnost pušky v opačném směru $\Rightarrow$ puška se začne pohybovat směrem doleva = **zpětný ráz**.

Př. 3: Které veličiny ovlivňují velikost zpětného rázu pušky?

Platí: $\Delta \boldsymbol{p}_s = -\Delta \boldsymbol{p}_p$ $\Rightarrow$ velikost zpětného rázů pušky je stejná jako velikost změny hybnosti střely. Jak velká je změna hybnosti střely?

$\Delta \boldsymbol{p}_p = \boldsymbol{F}_s \cdot \Delta t$ - součin působící síly a času, po který puška kulku urychlovala – to nejsou zrovna parametry, které by výrobci zbraní udávali.

Jiná možnost: $\Delta \boldsymbol{p}_p = m \cdot \Delta v$ - součin hmotnosti střely a změny rychlosti = konečné (úsťové) rychlosti (střela zrychluje z klidu) – základní údaje u každé zbraně.

$\Rightarrow$ Čím je střela těžší a čím je rychleji vystřelená, tím větší je zpětný ráz zbraně.

Známe ze zkušenosti: vzduchovka (malý zpětný ráz), malorážka (trochu to cuká) a samopal (drží se špatně). Kulomet už v ruce udrží málokdo.

Zpětný ráz není možné obejít:

- Ruční zbraně větších kalibrů mají nožičky pro opření.
- Není možné neomezeně zvětšovat ráži děl u tanků (převrácení, věž).
- Klasická děla mají zpětné opěrné bodce a zákluz (hlaveň může popojet dozadu a tím se prodlouží doba, kdy tělo děla tlumí zpětný ráz hlavně).
- Největší běžná děla se montovala do námořních lodí.

Zpětný ráz pušky můžeme snadno spočítat.

Př. 4: Střela o hmotnosti 10 g je vystřelena z pušky o hmotnosti 4 kg rychlostí 800 m/s. Vypočti zpětnou rychlost pušky.

$m_s = 10\text{ g} = 0,01\text{ kg}$ $m_p = 4\text{ kg}$ $v_s = 800\text{ m/s}$ $v_p = ?$

Podle předchozího odvozování platí, že změna hybnost střely musí být stejná jako změna hybnosti pušky:

Změna hybnosti střely: $\Delta \boldsymbol{p}_s = m_s \Delta \boldsymbol{v}_s = m_s v_s$ (rychlost střely se zvětšovala z nuly).

Změny hybnosti pušky: $\Delta \boldsymbol{p}_p = m_p \Delta \boldsymbol{v}_p = m_p v_p$ (rychlost pušky se zvětšovala z nuly).

Obě změny se rovnají: $\Delta \boldsymbol{p}_s = -\Delta \boldsymbol{p}_p$.

$$m_s v_s = -m_p v_p$$

$$v_p = -\frac{m_s v_s}{m_p}$$

Dosadíme: $v_p = -\frac{m_s v_s}{m_p} = -\frac{0,01 \cdot 800}{4}\text{ m/s} = -2\text{ m/s}$.

Puška získá kvůli zpětnému rázu rychlost 2 m/s.

Pedagogická poznámka: Pokud studenti příklad vyřeší bez používání delt nebo naopak budou používat delty po celou dobu, rozhodně je nechte a nenuťte jim postup z učebnice.

Př. 5: Jak se změní během výstřelu celková hybnost soustavy puška+střela?

Nemusíme nic počítat, víme, že platí $\Delta \boldsymbol{p}_s = -\Delta \boldsymbol{p}_p \Rightarrow \Delta \boldsymbol{p} = \Delta \boldsymbol{p}_s + \Delta \boldsymbol{p}_p = \Delta \boldsymbol{p}_s - \Delta \boldsymbol{p}_s = 0$.

Společné těžiště soustavy puška+střela se ani po výstřelu vůbec nehýbe a stojí na místě.

Naše úvahy o střele a pušce platí i při ostatních dějích, kde působí pouze vzájemné síly mezi předměty $\Rightarrow$ pokud při libovolném fyzikálním ději nepůsobí na soustavu vnější síly, celková hybnost sledované soustavy se nezmění. Získali jsme jeden ze základních fyzikálních zákonů - **zákon zachování hybnosti**.

Pro klasické znění si potřebujeme vyjasnit pojem izolovaná soustava: **Izolovanou soustavu tvoří tělesa, na která působí pouze vzájemné síly a nepůsobí na ně vnější síly.**

Zákon zachování hybnosti: Celková hybnost izolované soustavy těles se zachovává.

Dokonale izolovanou soustavu bychom hledali těžko. Například soustavu puška+střela můžeme při výstřelu považovat za izolovanou soustavu pouze v případě, že nemáme pušku opřenou o rameno (puška se tak může po výstřelu volně pohybovat dozadu) a zajímáme se pouze o děje ve vodorovném směru.

Zákon zachování hybnosti můžeme aplikovat i na soustavy, které nejsou zcela izolované pokud:

- Předměty na sebe vzájemně působí pouze velmi krátkou dobu a vzájemně působící síly jsou velmi velké v porovnání s vnějšími silami (existence vnějších sil se tak projeví až za delší dobu, kdy se díky delšímu časovému úseku zvětší impuls síly $F \cdot \Delta t$).
- Vnější síly působí v jiném směru než, který studujeme.

Př. 6: Za jakých podmínek můžeme považovat následující děje za děje v izolované soustavě těles:
a) srážka kulečníkových koulí,
b) vzájemné odstrčení dvou lidí,
c) pohyb astronauta a jeho kosmické lodi na oběžné dráze Země.

a) srážka kulečníkových koulí
Zkoumáme pouze pohyb ve vodorovném směru (ve svislém směru se koule kvůli stolu pohybovat nemohou a působení vnějších sil v něm není zanedbatelné).

b) vzájemné odstrčení dvou lidí
Kosmonauty vznášející se v beztížném stavu můžeme považovat za izolovanou soustavu. Na Zemi nemůžeme uvažovat pohyb ve svislém směru (zde působí gravitační síla) a je třeba, aby bylo možné zanedbat tření $\Rightarrow$ například při pošťuchování na ledě můžeme ve vodorovném směru považovat při odstrčení oba účastníky za izolovanou soustavu.

c) pohyb astronauta a jeho kosmické lodi na oběžné dráze Země
Podobná situace jako u dvou kosmonautů. Za izolovanou soustavu můžeme považovat kosmonauta a loď vždy. Změna rychlosti u lodi bude daleko menší než u kosmonauta, protože loď je daleko těžší.

Př. 7: Akční hrdina (hmotnost 80 kg) skočí při honičce v bývalém podzemním dole na zlato rychlostí 6 m/s (ve vodorovném směru) na stojící nezabržděný kolový vozík o hmotnosti 150 kg. Urči, jakou rychlostí se vozík s hrdinou rozjede.

$m_1 = 80\,\mathrm{kg}$, $v_1 = 6\,\mathrm{m/s}$, $m_2 = 150\,\mathrm{kg}$, $v_2 = 0\,\mathrm{m/s}$, $w = ?$
Akční hrdina doskakuje na nezabržděný vozík $\Rightarrow$ ve vodorovném směru na hrdinu i vozík nepůsobí žádné podstatné síly (tření je malé) $\Rightarrow$ ve vodorovném směru platí pro hrdinu a vozík od jejich dotyku zákon zachování hybnosti.
Hybnost hrdiny a vozíku před skokem: $m_1 v_1 + m_2 v_2$.
Hybnost hrdiny a vozíku po skoku: $m_1 w_1 + m_2 w_2$, hrdina stojí na vozíku, který s ním ujíždí $\Rightarrow$
$w_1 = w_2 = w$ (abychom nemuseli psát index) $\Rightarrow$ $m_1 w_1 + m_2 w_2 = (m_1 + m_2) w$.
Zákon zachování hybnosti: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) w$
$v_2 = 0 \Rightarrow m_1 v_1 = (m_1 + m_2) w$
$$w = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{80 \cdot 6}{80 + 150}\,\mathrm{m/s} = 2{,}1\,\mathrm{m/s}$$
Vozík s hrdinou se rozjede rychlostí 2,1 m/s.

Z předchozího příkladu je vidět největší výhoda zákona zachování hybnosti (a zákonů zachování vůbec). **Nemusíme nic vědět o průběhu srážky, a přesto zjistíme, jak bude vypadat situace po ní.**

Poznámka: V předchozím příkladě i ve zbytku učebnice používáme pro označení rychlostí po srážce (obecně po nějaké události) písmeno *w*. Výhodou tohoto přístupu je jasné oddělení rychlostí před a po a možnost zachování indexů.

Pedagogická poznámka: Není důležité, aby studenti spočítali následující příklad. Hlavní je, aby dobře porozuměli předchozímu příkladu.

Př. 8: Vypočti, jakou sílu má Arnold Schwarzeneger v pravé ruce, když v ní udržel kulomet, který vypálil za 1 s dvacet nábojů o hmotnosti 30 g rychlostí 800 m/s.

$n = 20\,\text{ran}$ $\quad m = 0{,}03\,\text{kg}$ $\quad v = 800\,\text{m/s}$ $\quad t = 1\,\text{s}$ $\quad F = ?$

Příklad můžeme řešit pomocí druhého Newtonova zákona ve tvaru $\Delta p = F \cdot \Delta t$. Protože při výstřelu na sebe působí vzájemně kulomet se střelou, získá kulomet hybnost o stejné velikosti jako střely, které vystřelil, ale v opačném směru. Pokud by jej nikdo nedržel, začal by se zrychleně pohybovat směrem dozadu. Síla, kterou na kulomet působí střelec, musí tuto hybnost vyrušit.

Změna hybnosti pušky za 1 s = hybnost všech nábojů vystřelených za 1 s.

$\Delta p = n \cdot p_k = n \cdot m_k \cdot v_k$

Newtonův zákon: $\Delta p = F \cdot \Delta t$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Dosadíme: $\Delta p = n \cdot m_k \cdot v_k$.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{n \cdot m_k \cdot v_k}{\Delta t}$$

$$F = \frac{n \cdot m_k \cdot v_k}{\Delta t} = \frac{20 \cdot 0{,}03 \cdot 800}{1} = 450\ \text{N}$$

Arnold Schwarzeneger musí držet kulomet silou 450 N.

Shrnutí: Pokud při vzájemném působení předmětů můžeme zanedbat vnější síly, hybnost zkoumané soustavy se nemění.