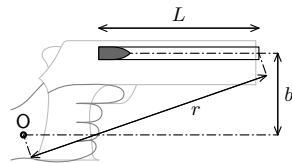


## Úloha I.5 ... zpětný ráz

4 body; průměr 2,33; řešilo 33 studentů

Při výstřelu z pistole zpětný ráz pistolí trhne a střela vyletí jiným směrem, než kam původně mířila hlaveň. O jak velký úhel se jedná? Uvažujte, že vliv gravitace je po celou dobu výstřelu kompenzován svaly v ruce a bod otáčení je v zápěstí. Znáte moment setrvačnosti pistole s rukou vzhledem k bodu otáčení, hmotnost a ústovou rychlost projektilu a vzdálenosti popsané v obrázku. Hodnoty těchto veličin můžete zkusit odhadnout a výsledek číselně dopočítat.



Obr. 1

Vymyslel odstřelovač, který si přál zůstat anonymní.

Nejprve bychom se měli zamyslet, co se při výstřelu děje. Kulka v hlavni postupně zrychluje a na pistoli působí reakční síla. Protože ale osa otáčení není v ose hlavně, tak její moment není nulový. Dále ještě na pistoli působí gravitační síla, ale ta je dle zadání plně kompenzována svaly v ruce.

Nejprve určíme, jakou rychlostí se bude pohybovat hlaveň v okamžiku výstupu kulky z hlavně. Jako v mnoha dalších případech můžeme i zde použít zákony zachování. Protože celkový moment sil, který působí na pistoli s rukou, je nulový (pistole je před výstřelem v klidu), zachovává se moment hybnosti celé soustavy. Budeme jej uvažovat vzhledem k ose otáčení O, mohli bychom uvažovat libovolný jiný, ale tento je nejvhodnější. Označíme-li  $v_{\text{ust}}$  ústovou rychlost projektilu o hmotnosti  $m$ , z druhého Newtonova zákona dostáváme

$$mbv_{\text{ust}} = I\omega_0,$$

kde  $\omega_0$  je úhlová rychlost otáčení pistole okolo zápěstí v okamžiku, kdy náboj opouští hlaveň, a  $I$  je moment setrvačnosti pistole vzhledem k ose otáčení. Proto pro rychlost konce hlavně  $v_{\perp}$  platí

$$v_{\perp} = \frac{mbr}{I}v_{\text{ust}}. \quad (1)$$

Tuto rychlost budeme muset nakonec vektorově přičíst k ústové rychlosti projektilu, avšak ještě musíme určit, o kolik se „nadvzvedne“ hlaveň během výstřelu.

Nyní se tedy pokusme určit úhel otočení hlavně okolo bodu O během zrychlování náboje. V každém okamžiku musí platit zákon zachování momentu hybnosti, tj. vztah (1). Můžeme nyní použít definici rychlosti, tj. že jde o poměr změny polohy a uplynulého času

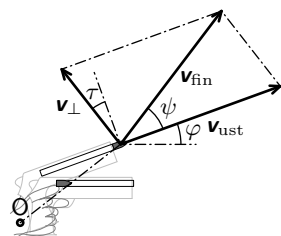
$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = v_{\perp} = \frac{mbr}{I}v_{\text{ust}} = \frac{mbr}{I} \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

kde  $\Delta x$  je posunutí náboje v hlavni a  $\Delta y$  je posunutí konce hlavně. Z tohoto vidíme (po vynásobení  $\Delta t$ ), že změna polohy konce hlavně je přímo úměrná změně polohy náboje, proto i celkové posunutí konce hlavně  $H$  je přímo úměrné poloze náboje a platí

$$H = \frac{mbr}{I}L.$$

Pro úhel otočení ( $\varphi$  v radiánech) platí

$$\varphi = \frac{R}{r} = \frac{mbL}{I}.$$



Obr. 2: Směr výletu kulky

Nyní již musíme pouze dát dohromady všechny vlivy. Celá situace je uvedena na obrázku 2. Protože je rychlost pohybu pistole vzhledem k rychlosti pohybu kulky malá, nebude mít téměř vliv na velikost rychlosti  $v_{\text{fin}}$ , ale bude mít vliv na její směr. Průmět rychlosti  $v_{\perp}$  do směru kolmého k ose hlavně je  $v_{\perp} \cos \tau$ , ale podíváme-li se na obrázek ze zadání 1, tak zjistíme, že  $\sin \tau = b/r$ , tj.  $\cos \tau = \sqrt{1 - b^2/r^2}$ . Změna směru výstřelu odpovídající tomuto vlivu je rovna

$$\psi \approx \sin \psi = \frac{v_{\perp} \sqrt{1 - b^2/r^2}}{v_{\text{ust}}} = \frac{mbr}{I} \sqrt{1 - b^2/r^2} = \frac{mb}{I} \sqrt{r^2 - b^2}.$$

Celková změna směru letu  $\delta$  je rovna součtu úhlu otočení koltu a odchylce způsobené právě nenulovou rychlostí otáčení koltu. Platí

$$\delta = \varphi + \psi = \frac{mb}{I} \left( \sqrt{r^2 - b^2} + L \right).$$

Nyní ještě zkusme odhadnout hodnoty jednotlivých parametrů. Pro hodnoty  $m = 2 \text{ g}$ ,  $b = 7 \text{ cm}$ ,  $r = 20 \text{ cm}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$  a  $I = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  dostáváme  $\delta = 4,72 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 0^{\circ} 1' 37''$ . Odchylka je velmi malá, což bychom očekávali, ale při střelbě na 100 m vzdálený cíl je takto vzniklá odchylka rovna 4,7 cm, což pro odstřelovače již nemusí být zanedbatelné.

*Lukáš Ledvína*  
lukasl@fykos.cz

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

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