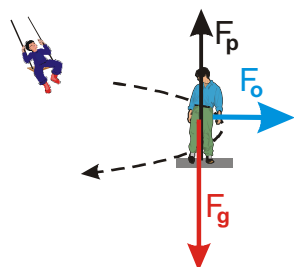


1.4.5 Rotující vztažné soustavy II

Předpoklady: 1404

Vrátíme se zpátky na pout'.

Př. 1: Nakresli síly, které působí na tatínka z pohledu chlapce na kolotoči. Vysvětlují tyto síly jeho pohyb?



Na tatínka působí tři síly:

- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla podložky F_p svisle vzhůru,
- odstředivá síla F_o směrem od středu kolotoče.

Výsledná síla působící na tatínka se rovná odstředivé síle F_o .

Působící síly nevysvětlují pohyb tatínka, který se složitě s měnícím se poloměrem otáčí kolem chlapce na kolotoči. Na tátu by měla působit dostředivá síla (měnící se) směrem ke středu kolotoče s okamžitou velikostí $F = m \frac{v^2}{r}$, místo toho na něj působí síla přesně opačného směru se stejnou velikostí $F = m \frac{v^2}{r}$ (ještě horší situace než, kdybychom odstředivou sílu nepoužívali).

Pedagogická poznámka: Část žáků do obrázku odstředivou sílu nenakreslí. Kvůli tomu uděláme kontrolu sil a pak si ještě necháme chvíli na rozmyšlení před tím, než se bavíme o tom, zda vysvětlují pohyb, který chlapec pozoruje.

Přidáním odstředivé síly jsme situaci nevyřešili, ale ještě zhoršili.

- Původní stav: Na tatínka, který se otáčí okolo kolotoče by měla působit dostředivá síla $F = m \frac{v^2}{r}$, ale výsledná síla je nulová.
- „Vylepšený“ stav po přidání odstředivé síly: Na tatínka, který se otáčí okolo kolotoče by měla působit dostředivá síla $F = m \frac{v^2}{r}$, ale získaná výsledná síla má sice správnou velikosti $F = m \frac{v^2}{r}$ opačný směr.

⇒ Samotné odebrání odstředivé síly od předmětů, které se neotáčejí s kolotočem, situaci neřeší (a nebylo by správné, protože by šlo o nesystémový krok).

Situaci vyřešíme přidáním další síly.

Př. 2: Najdi podmínky, které musí splňovat další síla, kterou přidáme do popisu světa z hlediska neinerciální vztažné soustavy spojené s klukem na kolotoči.

Přidaná síla musí splňovat dvě podmínky:

- musí působit na otce směrem ke středu kolotoče a mít velikost $F = 2m\frac{v^2}{r}$ (aby vyrušila odstředivou sílu a zajistila potřebnou výslednici),
- její velikost pro předměty, které se otáčejí s kolotočem musí být nulová (aby nenarušila stav, který jsme zajistili přidáním odstředivé síly a který odpovídá pozorování).

Pedagogická poznámka: Většina studentů předchozí příklad samozřejmě zcela nevyřeší, ale na jeho část přijít mohou.

Předchozí podmínky sílu v podstatě určují: na tatínka působí další setrvačná síla (Coriolisova) směrem ke středu kolotoče o velikosti $F_C = 2m\frac{v^2}{r}$.

Proč je tato síla pro chlapce na kolotoči nulová?

Upravíme vzorec: $F_x = 2m\frac{v^2}{r} = 2mv\frac{v}{r} = 2mv\omega$.

Rozhoduje význam jednotlivých veličin:

- m - hmotnost tělesa,
- ω - úhlová rychlost otáčení vztažné soustavy,
- v - rychlost pohybu sledovaného tělesa vůči vztažné soustavě (ta je pro všechny děti na kolotoči nulová, u tatínka nulová není a neustále se mění).

⇒ Zdánlivě neuskutečnitelného požadavku, aby se síla projevovala pouze u tatínka a ne u hocha na kolotoči se nám podařilo dosáhnout poměrně snadno tím, že Coriolisova síla závisí na veličině, která je pro děti na kolotoči nulová.

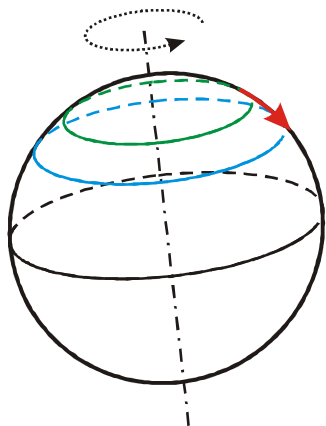
Coriolisova síla patří mezi setrvačné síly ⇒ nejde o skutečnou sílu a efekty, které způsobuje, musíme být schopni vysvětlit z inerciální vztažné soustavy bez ní.

Nejpřirozenější otáčející se vztažnou soustavou je naše Země, která se neustále otáčí východním směrem s periodou jednoho dne.

V létě 1943 po porážce v největší tankové bitvě u Kurska se definitivně změnil poměr sil na východní frontě v neprospěch Německa. Němci se snažili na tuto skutečnost reagovat změnou strategie – pokusili se vybudovat opevněnou linii (Východní val), jehož dobývání mělo stát Sovětský svaz tolik sil, že by došlo k opětovnému vyrovnání sil. Hlavní oporou Východního valu měla být třetí největší evropská řeka Dněpr. Značná část jejího toku poskytovala pro Němce ideální přírodní podmínky: pozvolný a nízký východní břeh, široké koryto řeky a vysoký a strmý západní břeh, který by Němcům umožňoval pohodlné sledování a odstřelování sovětských vojsk na druhé straně.

Proč jsou břehy Dněpru (a mnoha dalších řek) tak nesouměrné?

Dněpr teče přibližně jižním směrem. Podíváme se na situaci na globu.



Voda v řece se otáčí se Zemí a oběhne za jeden den jeden celý kruh.

Na severu je však dráha, kterou musí voda za den oběhnout kratší a proto se voda otáčí okolo zemské osy menší rychlostí.

Jak řeka teče na jih dostává se dále od zemské osy a měla by obíhat větší rychlostí (místo po zelené dráze po dráze modré) \Rightarrow je v pohybu na východ pomalejší než okolní povrch \Rightarrow naráží na západní břeh od kterého se odráží \Rightarrow voda vymílá více západní břeh než východní.

Pedagogická poznámka: Vysvětlování by mělo probíhat se skutečným globem v ruce.

Míra uvedeného efektu se zvětšuje:

- s úhlovou rychlostí otáčení Země (úhlová rychlost otáčení ω),
- s rychlostí, se kterou se mění vzdálenost vody od osy otáčení Země (rychlost vzhledem k ose otáčení v),

\Rightarrow chová se stejně jako Coriolisova síla ze vzorce $F_C = 2mv\omega$.

Podarilo se nám objevit efekt, který je možné vysvětlit z inerciální soustavy bez použití Coriolisovy síly a jehož velikost závisí na stejných veličinách.

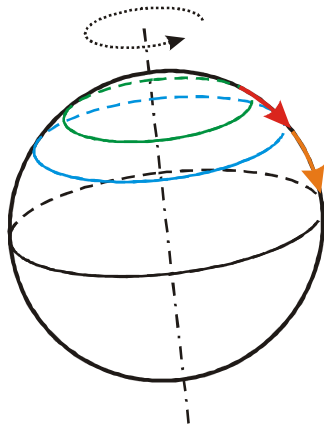
Na všechny předměty, které pozorujeme z neinerciální rotující vztažné soustavy působí Coriolisova síla $F_C = 2mv\omega$, kde ω je úhlová rychlost otáčení, v je rychlost, kterou se těleso pohybuje vůči této vztažné soustavě. Pro předměty, které vůči této vztažné soustavě stojí (nebo se pohybují ve směru osy otáčení a nemění se jejich vzdálenost od osy), je Coriolisova síla nulová.

Dodatek: Přesný vztah pro Coriolisovu sílu $F_s = 2mv \times \omega$ je vektorový a využívá operaci, která se nazývá vektorový součin (ze dvou nerovnoběžných vektorů vytvoří vektor, který je k oběma kolmý). Vektor úhlové rychlosti má směr shodný s osou otáčení a orientován je tak, aby platilo pravidlo pravé ruky (když prsty pravé ruky obepínají osu otáčení, vztyčený palec ukazuje směr úhlové rychlosti. V případě otáčení Země má úhlová rychlost směr zemské osy a směřuje na sever). Směr Coriolisovy síly získáme z vektorů rychlosti a úhlové rychlosti opět pomocí pravé ruky, kterou nastavím tak, aby její prsty ukazovaly popořadě směr rychlosti a úhlové rychlosti a vztyčený palec pak ukazuje směr Coriolisovy síly. Ve všech příkladech, které jsou v této učebnici uvedeny, je jednodušší získat směr Coriolisovy síly úvahou z pohledu z inerciální vztažné soustavy.

Př. 3: Jednou z největších řek Jižní Ameriky je argentinská řeka Paraná, která teče na jižním směrem a ústí do Atlantického oceánu. Který z jejich břehů by měl být více vymletý?

Řeka teče na jižní polokouli jižním směrem \Rightarrow postupně se přibližuje zemské ose \Rightarrow obvodová rychlost míst, do kterých voda přitéká je čím dál nižší \Rightarrow voda je rychlejší než okolní povrch \Rightarrow naráží na a vymílá východní břeh.

Př. 4: Rozhodni, zda nerovnoměrné vymílání břehů řek bude silnější u řek, které tečou jihoseverním směrem v oblastech s nižší nebo vyšší zeměpisnou šířkou.



Z obrázku je vidět, že v nižších zeměpisných šířkách (blíže k rovníku) se vzdálenost od osy při uražení stejné vzdálenosti po povrchu koule změní daleko méně \Rightarrow v nižších zeměpisných šířkách je nerovnoměrné vymílání břehů slabší než ve vyšších zeměpisných šířkách.

Př. 5: Základní cirkulace vzduchu na Zemi určuje několik převládajících směrů větrů. Na obou polokoulích (severní i jižní) proudí vzduch od oblastí kolem 30° severní (jižní) šířky k rovníku. Proč tyto větry nevanou čistě jižním (severním) směrem? Jakým směrem se tyto větry stáčí?

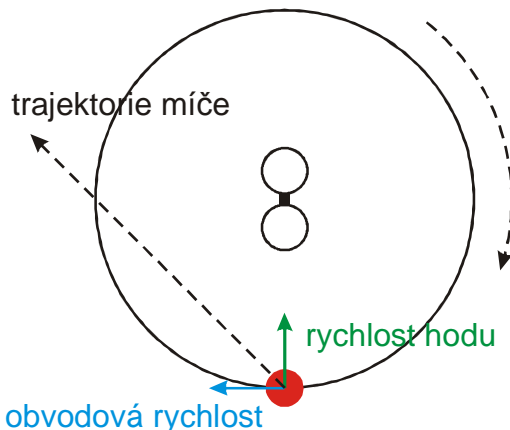
Jde o podobný jev jako u řek.

Vzduch proudí na severní polokouli na jih \Rightarrow dostává se do oblastí, které jsou dále od zemské osy a pohybují se rychleji. Vzduch nemůže zvýšit svou rychlost (nemá se od čeho odstrčit) \Rightarrow zpožďuje se oproti zemskému povrchu a stáčí se tak na západ.

Vzduch proudí na jižní polokouli na sever \Rightarrow dostává se do oblastí, které jsou dále od zemské osy a pohybují se rychleji. Vzduch nemůže zvýšit svou rychlost (nemá se od čeho odstrčit) \Rightarrow zpožďuje se oproti zemskému povrchu a stáčí se tak na západ.

Př. 6: Jednou z pouťových atrakcí je lochneska. Některé lochnesky mají uprostřed basketbalový koš a návštěvníci se pak do něj během jízdy snaží trefit míčem. Každý trefený koš pak znamená další jízdu zdarma. Jakým způsobem má návštěvník na koš střílet, aby se trefil? Vysvětli jak z pohledu inerciální soustavy (mimo kolotoč), tak z pohledu neinerciální soustavy spojené s otáčející se lochneskou.

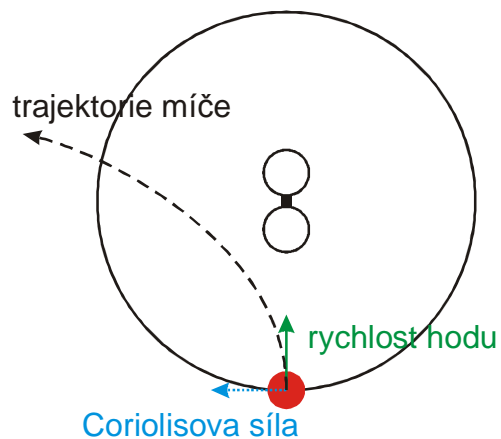
Inerciální vztažná soustava



Vidíme, že se lochneska i se střílejícím návštěvníkem otáčí \Rightarrow v okamžiku hození míče má míč kromě rychlosti udělené střelcem i obvodovou rychlost kvůli otáčení lochnesky \Rightarrow jeho celková rychlost má jiným směr než jakým návštěvník hází \Rightarrow míč poletí za koš.

Návštěvník musí počítat s obvodovou rychlostí a házet ne na koš, ale před něj (proti směru obvodové rychlosti).

Neinerciální vztažná soustava lochnesky



Vidíme, že se lochneska i se střílejícím návštěvníkem stojí, ale víme, že se otáčí \Rightarrow vzdálenost míče od osy otáčení se během letu ke koši mění \Rightarrow během letu působí na míč Coriolisova síla směrem doleva \Rightarrow míč poletí za koš.

Návštěvník musí počítat s působením Coriolisovy síly a házet ne na koš, ale před něj.

Dodatek: Místa v prostoru, ve kterých se míč při letu nacházel, jsou při obou pohledech stejná, ale trajektorie se liší podle toho, v jaké soustavě souřadnic je měříme (trajektorie v dolní části obrázku je ovlivněna tím, že místo, odkud návštěvník míč vyhodil zůstává na místě a zbytek vesmíru i s místy, kde se nachází míč, se kolem lochnesky otáčí).

Shrnutí: Kromě odstředivé síly přidáváme při popisu z rotující vztažné soustavy na tělesa i Coriolisovu sílu, která je nenulová u těles, která se pohybují vzhledem k ose otáčení.