

Vektory $\mathbf{p}$ a $\mathbf{v}$ mají stejný směr. Pro velikost hybnosti platí vztah

$$p = mv,$$

z něhož vyplývá jednotka hybnosti, $[p] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednotkou hybnosti je *kilogram metr za sekundu*. Je to hybnost hmotného bodu o hmotnosti 1 kg, který se pohybuje rychlostí o velikosti $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Hybnost $\mathbf{p}$ hmotného bodu má stejný směr jako jeho okamžitá rychlost $\mathbf{v}$. To znamená, že hybnost má vždy směr tečny k trajektorii, po níž se hmotný bod pohybuje. Při pohybu hmotného bodu po přímce leží hybnost v této přímce. Při rovnoměrném přímočarém pohybu je hybnost konstantní. **Hybnost charakterizuje pohybový stav tělesa nebo hmotného bodu v dané vztažné soustavě.**

Úlohy

- 1 Automobil o hmotnosti 1 000 kg jede rychlostí $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jak velká je hybnost automobilu? Při jaké rychlosti má stejně velkou hybnost automobil o hmotnosti 3 000 kg? $[25\,000 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}]$
- 2 Jak velká byla rychlost střely o hmotnosti 20 g, měla-li střela hybnost o velikosti $12 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$? $[600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$
- 3 Jak velkou hybnost má kámen o hmotnosti 0,5 kg po 3 sekundách volného pádu? Za tíhové zrychlení dosadte $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. $[15 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

3.6 Změna hybnosti

Podle druhého pohybového zákona je výslednice sil působících na hmotný bod rovna součinu hmotnosti hmotného bodu a jeho zrychlení, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. V kinematice jsme definovali zrychlení hmotného bodu jako podíl změny rychlosti a doby, za kterou změna nastala, tedy $\mathbf{a} = \Delta\mathbf{v}/\Delta t$. Dosadíme-li takto vyjádřené zrychlení do druhého pohybového zákona, dostaneme

$$\mathbf{F} = m \frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}.$$

Předpokládáme, že hmotnost m je konstantní. Na hmotný bod působí konstantní síla $\mathbf{F}$ po dobu Δt . Vlivem této síly se rychlost hmotného bodu změní z $\mathbf{v}_1$ na $\mathbf{v}_2$, jeho hybnost z $\mathbf{p}_1 = m\mathbf{v}_1$ na $\mathbf{p}_2 = m\mathbf{v}_2$. Změna hybnosti za dobu Δt

je $\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1$ nebo po vytknutí konstantní hmotnosti

$$\Delta\mathbf{p} = m(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) = m\Delta\mathbf{v}.$$

Tento vztah vyjadřuje, že změna hybnosti hmotného bodu je rovna součinu jeho hmotnosti a změny rychlosti.

Druhý pohybový zákon můžeme vyjádřit vztahem

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

Výsledná síla působící na hmotný bod je rovna podílu změny hybnosti hmotného bodu a doby, po kterou síla působila.

Takto formulovaný druhý pohybový zákon platí zcela obecně, lze jej použít i v případě, že se hmotnost během pohybu mění. Ke změně hmotnosti dochází např. u dopravních prostředků spotřebou paliva. Výrazně se může měnit hmotnost rakety, z níž unikají plyny při raketovém pohonu.

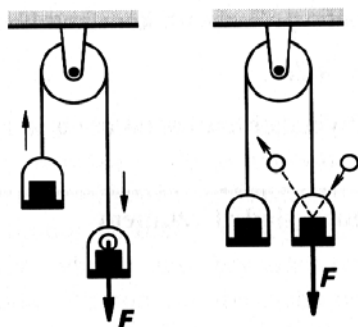
Vynásobme nyní vztah vyjadřující obecný tvar druhého pohybového zákona dobou Δt . Dostaneme vztah

$$\mathbf{F}\Delta t = \Delta\mathbf{p}.$$

Součin $\mathbf{F}\Delta t$ síly a doby, po kterou síla působila, je **impuls síly**. Je to vektorová fyzikální veličina s jednotkou $\text{N} \cdot \text{s}$ (*newtonsekunda*). Snadno se přesvědčíme, že $\text{N} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; jednotka impulsu síly je stejná jako jednotka hybnosti.

Impuls síly vyjadřuje **časový účinek síly**. Uvažujme jednoduchý případ, kdy konstantní síla $\mathbf{F}$ uvádí hmotný bod z klidu do pohybu, přičemž hmotný bod dosáhne za dobu t rychlosti $\mathbf{v}$. Pak velikost impulsu síly je Ft , velikost změny hybnosti je mv . Platí tedy vztah $Ft = mv$. Je zřejmé, že hmotný bod můžeme uvést z klidu do pohybu o rychlosti v buď malou silou působící po dlouhou dobu, nebo velkou silou působící po krátkou dobu. Rozhodující je součin síly a doby, po kterou síla působí, tedy impuls síly.

Účinek impulsu síly na změnu hybnosti tělesa můžeme ukázat pokusem znázorněným na obr. 3-5. Na nit vedenou přes kladku zavěsíme misky a na ně položíme dvě stejná závaží. Na jedno závaží položíme míček pro stolní tenis. Míček působí na misku velmi malou silou, přesto se však misky dají do pohybu a za určitou dobu dosáhnou značné rychlosti. Podruhé týmž



3-5 Pokus k účinku impulsu síly na změnu hybnosti tělesa

míčkem prudce udeříme na jedno závaží. Síla, kterou míček na misku působí, je nyní mnohem větší, misky se však téměř nepohnou, neboť síla působí po velmi krátkou dobu (jen asi tisícinu sekundy).

Úlohy

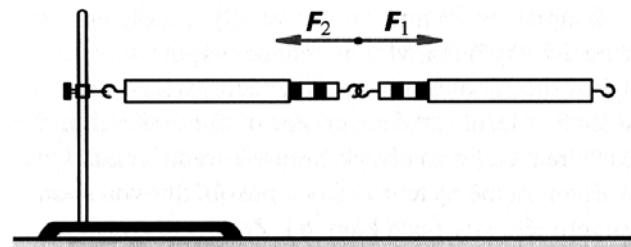
1. Automobil o hmotnosti 800 kg zvýšil při jízdě na přímé silnici svou rychlost z $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ během doby 5 s . Jak velká výsledná síla na něj působila? [800 N]
2. Míč o hmotnosti $0,20 \text{ kg}$ dopadl kolmo na pevnou stěnu rychlostí $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a odrazil se rychlostí $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Náraz trval po dobu $0,005 \text{ s}$. Jak velkou silou působila po dobu nárazu stěna na míč? [1 400 N]

3.7 Třetí Newtonův pohybový zákon

Silové působení těles je vždy vzájemné. Zvedáme-li závaží, působíme na ně silou, závaží však působí rovněž silou na naše ruce. Roztlačujeme-li vozík, působíme na něj silou, vozík současně působí silou na nás.

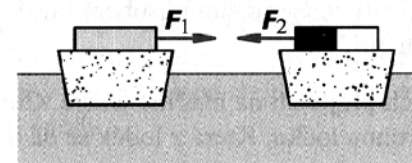
Položme si nyní otázku, jaké vlastnosti mají síly vzájemného působení mezi tělesy. Udělejme následující pokus: Na stojan zavěsíme siloměr a připojíme k němu druhý siloměr (obr. 3-6). Když zatáhneme za jeden siloměr, ukazují oba siloměry stejnou hodnotu síly. Síly F_1 a F_2 , kterými siloměry na sebe navzájem působí, jsou stejně velké a mají opačný směr. Platí tedy $F_1 = -F_2$. Při pokusu můžeme také pozorovat, že obě síly současně vznikají i zanikají.

Při pokusu se siloměry jsme porovnávali síly na základě jejich deformačních účinků. Ke stejnému závěru dospějeme, budeme-li síly porovnávat na základě



3-6 Dvě tělesa na sebe navzájem působí stejně velkými silami opačného směru

jejich dynamických účinků. Na vodní hladinu položíme dvě stejné polystyrenové destičky. Na jednu destičku dáme magnet, na druhou ocelovou tyčinku. Destičky se začnou pohybovat k sobě (obr. 3-7). Síla F_1 , kterou působí magnet na ocelovou tyčinku, je stejně velká jako síla F_2 , kterou působí tyčinka na magnet, má však opačný směr. Platí opět $F_1 = -F_2$.



3-7 Vzájemné působení těles prostřednictvím magnetického pole

Bylo vykonáno mnoho podobných pokusů, při nichž byly sledovány velikosti sil vzájemného působení mezi tělesy, směry těchto sil i okamžiky jejich vzniku a zániku. Pokusy byly zaměřeny na deformační i pohybové účinky sil, sledovalo se vzájemné působení těles přímým stykem i prostřednictvím silových polí.

Newton zobecnil výsledky těchto pokusů a vyslovil **třetí pohybový zákon**:

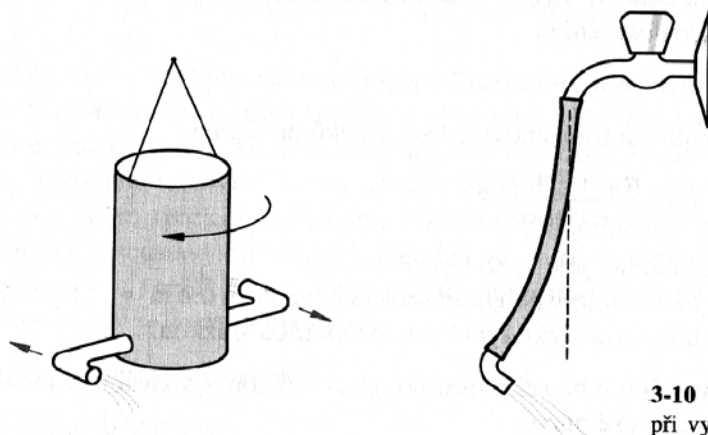
Dvě tělesa na sebe navzájem působí stejně velkými silami opačného směru. Tyto síly vznikají a zanikají současně.

Jednu z těchto sil nazýváme obvykle **akce**, druhou **reakce**. Třetí pohybový zákon se proto také někdy nazývá **zákon akce a reakce**. Musíme si uvědomit, že akce a reakce jsou síly, které působí na různá tělesa, proto se ve svých účincích navzájem neruší. Nazveme-li u pokusu s polystyrenovými destičkami akci sílu, kterou působí magnet na ocelovou tyčinku, pak reakcí je síla, kterou

soustavy dvou těles, jsou-li rychlosti těles a) v téže přímce a mají stejný směr, b) v téže přímce a mají opačný směr, c) navzájem kolmé.

[a) $26 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b) $10 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; c) $20 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

- 2 Střela o hmotnosti $0,01 \text{ kg}$ je vystřelena rychlostí $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z pušky o hmotnosti 4 kg . Vypočtěte zpětnou rychlost pušky. [$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- 3 Prázdný nákladní železniční vůz o hmotnosti $1 \cdot 10^4 \text{ kg}$ se pohybuje rychlostí $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ po vodorovné trati a narazí na naložený vůz o hmotnosti $2 \cdot 10^4 \text{ kg}$, který je v klidu. Při nárazu jsou oba vozy spolu spojeny. Určete, jakou společnou rychlostí se pohybují. [$0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$]



3-9 Segnerovo kolo

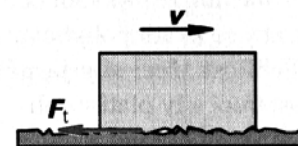
3-10 Účinek reakce při vytékání vody z ohnuté trubice

3.9 Smykové tření a valivý odpor

Při výkladu prvního pohybového zákona jsme poznali, že experimentální ověření tohoto zákona v praxi není možné, neboť na pohybující se těleso působí vždy silami jiná tělesa. Jestliže je těleso v přímém styku s jiným tělesem a pohybuje se tak, že se posouvá neboli smýká po povrchu tohoto tělesa, vzniká na styčné ploše obou těles **třecí síla**, která směřuje vždy **proti směru rychlosti tělesa**.

Smykové tření je fyzikální jev, jehož původ je především v nerovnostech stykových ploch těles. Při posouvání jednoho tělesa po povrchu druhého tělesa nerovnosti obou ploch na sebe narážejí, deformují se a obrušují. Tak vzniká

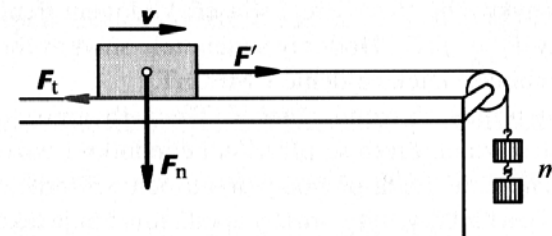
třecí síla F_t , jejíž působiště je na stykové ploše obou těles (obr. 3-11). Jsou-li stykové plochy hladké, je třecí síla menší, nikdy však není nulová.



3-11 Vznik smykového tření

Podle třetího pohybového zákona působí stejně velká síla opačného směru také na druhé těleso. Obvykle však bývá toto těleso pevně spojeno se Zemí, proto se pohybový účinek třecí síly u tohoto tělesa neprojeví.

Vlastnosti třecí síly můžeme zjistit pokusem znázorněným na obr. 3-12. Na vodorovnou podložku položíme dřevěný kvádr, k němuž připojíme vláknem vedeným přes kladku závaží. Vlákno působí na kvádr silou F' . Uvedeme-li kvádr do pohybu, působí proti směru pohybu třecí síla F_t . O tom, jaký pohyb kvádr koná, rozhoduje výslednice obou sil, jejíž velikost je $F = |F' - F_t|$. Jsou-li obě síly stejně velké, je výslednice nulová a kvádr se po podložce pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem. Dáme-li tedy na vlákno takové závaží, aby se kvádr po mírném postrčení pohyboval rovnoměrně přímočaře, je $F_t = F'$. V tomto případě je síla F' rovna tíhové síle působící na závaží, platí tedy $F_t = mg$. Tak můžeme měřit velikost třecí síly.



3-12 Pokus k zjištění vlastností třecí síly

Položíme kvádr na podložku nejprve stěnou s největším obsahem plochy, pak stěnou s menším obsahem plochy. Zjistíme, že se velikost třecí síly nezměnila. **Třecí síla nezávisí na obsahu stykových ploch.**

Pokusem také zjistíme, že **třecí síla nezávisí na rychlosti**, kterou se tělesa po sobě posouvají. Tento závěr platí jen přibližně, při velkých rychlostech se třecí síla zmenšuje.