1.3. Dynamika

V kapitole 1.2 Kinematika jsme se zabývali popisem pohybu těles, aniž bychom se zajímali o to proč k pohybu dochází. O příčině pohybu pojednává část mechaniky zvaná dynamika.

1.3.1. Síly

1. Definovat základní veličiny: hmotnost, síla, moment síly, hybnost, včetně jednotek SI.
2. Umět určit výslednici sil a provést rozklad síly do složek v různých případech (graficky i početně).
3. Definovat sílu jako vektorovou veličinu a znát její jednotku.
4. Vědět, že síla způsobuje změnu pohybu.
5. Rozlišovat působení síly přímým stykem a na dálku, uvést příklady.
6. Vysvětlit statický a dynamický účinek síly.
7. Vysvětlit posuvné a otáčivé účinky síly.

Lidé neznalí fyziky si myslí, že pohybuje-li se nějaké těleso, musí na něj působit síla. Ale vystřelený puk se pohybuje po ledě pohybem rovnoměrným přímočarým a žádná síla na něj po vystřelení již nepůsobí. Kdyby nebylo tření a odporu vzduchu, pohyboval by se takto neomezeně dlouho. Tělesa uvedená do pohybu se pohybují rovnoměrně přímočaře **setrvačností.** Na tato tělesa působí setrvačné síly.

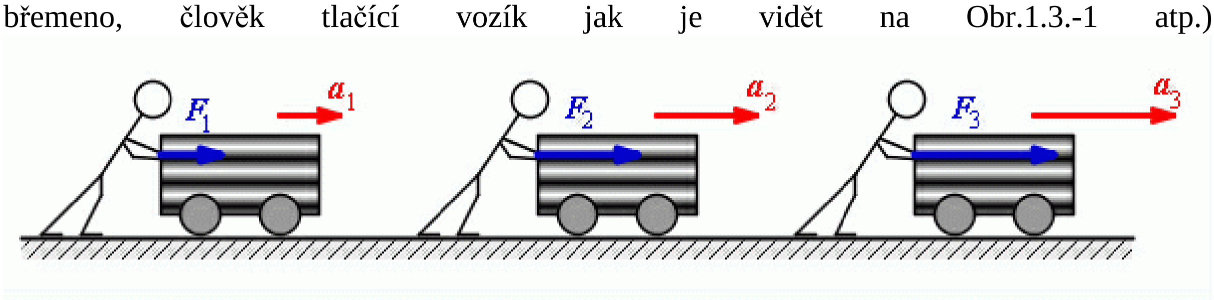
Aby se takto puk pohyboval, musíme jej nejdříve uvést z klidu do pohybu. A zde je role síly.

Síla není příčinou pohybu, ale **způsobuje změnu pohybového stavu**.

Působíme-li na těleso silou, uvádíme ho z klidu do pohybu nebo zrychlujeme jeho pohyb (měníme jeho pohybový stav). Silou také zpomalíme pohyb, nebo uvedeme těleso do klidu. Silou zakřivíme trajektorii jeho pohybu, můžeme jejím působením měnit tvar tělesa. Ale silou působí také magnet na kovový předmět, nebo Slunce na planety.

Z uvedených příkladů silového působení vyplývá, že **síla se projevuje vždy při vzájemném působení dvou těles**, a že působení sil je dvojího druhu:

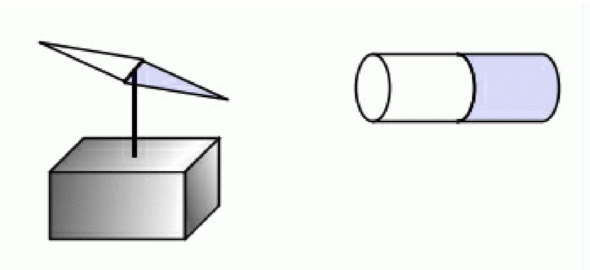
- Vzájemné působení těles **přímým stykem** (hokejka vystřelující puk, ruka zdvihající břemeno, člověk tlačící vozík jak je vidět na Obr.1.3.-1 atp.)

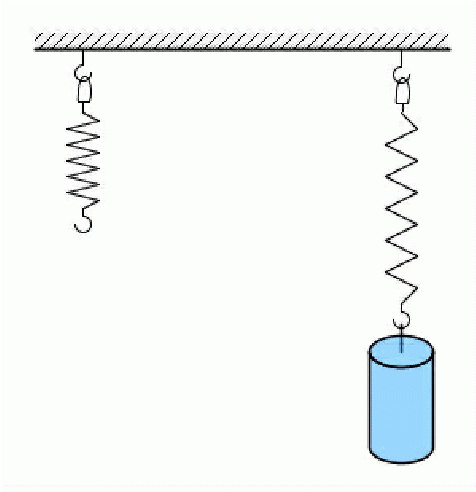


Obr.1.3.-1.

- Vzájemné působení těles **na dálku prostřednictvím silových polí** (silové pole magnetu působící na střelku kompasu jak ukazuje Obr.1.3.-2, gravitační pole Slunce.)

Obr.1.3.-2





- A když už jsme u dělení působení sil, uveďme si ještě dělení sil podle jejich účinků:
- **Statický účinek síly** jako je protažení pružiny závažím (Obr.1.3.-3), nebo tlaková síla působící na podložku (kniha na stole).

Obr.1.3.-3

- **Dynamický účinek síly**, který se projevuje tím, že se mění směr nebo velikost rychlosti pohybujícího se tělesa (motor auta).

A právě dynamickými účinky sil se zabývá **dynamika** (z řeckého *dynamis*, což znamená síla).

Účinky síly závisí nejen na její velikosti, ale také na směru jejího působení a na tom, kde působí. Z toho vyplývá, že:

Síla *F* je vektorová veličina určená velikostí, působištěm, směrem a orientací.

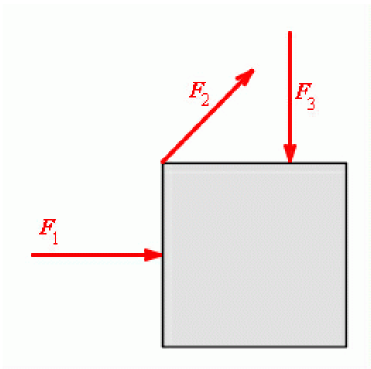
Jednotkou síly je newton označovaný písmenem N. Tato jednotka rozepsaná pomocí základních jednotek soustavy SI je $N = kg.m.s^{-2}$.

S pojmem síla je úzce spjata veličina **hmotnost.** Hmotnost *m* s jednotkou kg charakterizuje setrvačné vlastnosti těles. Ze zkušenosti víte, že podstatně snáze zastavíte vozík s nákladem 10 kg než stejně rychle se pohybující vozík naložený 200 kg. Totéž platí při uvedení vozíku do pohybu.

A ještě jednu veličinu spojenou s pojmem síla si budeme definovat. Přemisťujeme-li vozík po nějaké trajektorii pak hovoříme, že síla má účinky **posuvné** (translační). Otočíme-li volantem auta, pak naše ruce vyvíjejí účinky **otáčivé** (rotační). Otáčivé účinky charakterizujeme veličinou zvanou **moment síly *M*** (blíže v kapitole 1.6.2)

U 1.3.-1. *Uveďte* aspoň dvě další situace, kdy síla působí na dálku.

U 1.3.-2. Na obrázku Obr.1.3.-4 máte nakreslený gumový kvádr, na který působí tři stejně veliké síly. *Účinky které síly se projeví deformací, posuvem, otáčením kvádru*?



Obr.1.3.-4

1.3.2. Newtonovy pohybové zákony

Je to až neuvěřitelné, že základní zákony pohybu, které se dosud používají při řešení základních technických problémů, zformuloval Isaac Newton již před více než třemi sty léty. Je nutné je zvládnout, protože se uplatňují nejen v mechanice, ale i v jiných odvětvích fyziky. Pomocí pohybových zákonů řešíme také pohyb náboje v elektrickém poli, sílu mezi dvěma proudovodiči a tak dále.

1. Znát slovní definici zákona setrvačnosti, uvést příklady působnosti tohoto zákona.
2. Vysvětlit rozdíl mezi inerciálními a neinerciálními vztažnými soustavami.
3. Znát slovní a matematickou formulaci zákona síly v diferenciálním tvaru.
4. Vysvětlit pojem pohybové rovnice, umět je sestavit a řešit pro různé případy (volný pád, vrhy, pohyb po nakloněné rovině,..)
5. Umět sestavit pohybové rovnice ve zrychlené soustavě.
6. Vypočítat rychlost a dráhu uraženou tělesem, na které působí síly.
7. Vysvětlit rozdíl mezi tíhovou silou a tíhou tělesa.
8. Znát účinky třecí síly, vědět na čem tato síla závisí.
9. Řešit pohyb tělesa po nakloněné rovině, působí–li na něj smykové tření.
10. Vědět na čem závisí odporová síla valivého odporu.
11. Srovnat odporové síly smykového tření a valivého odporu.
12. Vyslovit zákon akce a reakce, dokumentovat jeho působnost na praktických příkladech.
13. Vysvětlit pojem setrvačná síla. Vědět, za jakých podmínek tato síla vzniká.
14. Definovat dostředivou a odstředivou sílu, znát vztah pro její výpočet u kruhového pohybu.

Newton zformuloval tři základní zákony klasické dynamiky ve slovní podobě, později byly formulace doplněny i matematickými zápisy. Začneme tedy od počátku od prvého zákona.

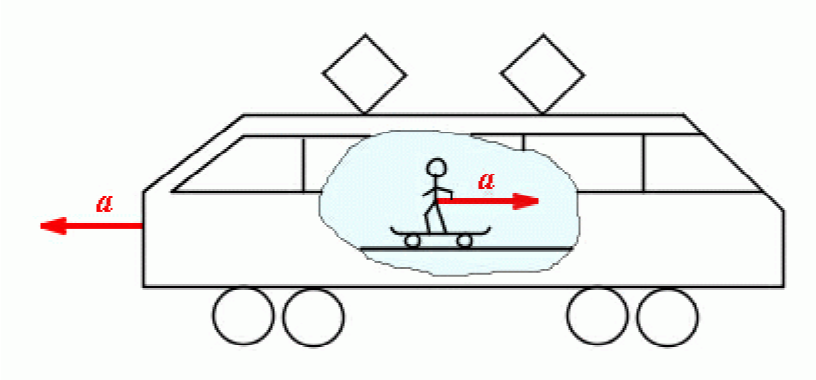
První Newtonův pohybový zákon – zákon setrvačnosti

Newton v originále formuloval svůj zákon poněkud komplikovanějšími slovy, v současnosti se vyslovuje takto:

Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud není vnějšími silami donuceno tento svůj stav změnit.

Ze zkušenosti to známe. Stojíme-li na skateboardu, musíme se odrazit (působit silou našich svalů), abychom se rozjeli. A jedeme-li po rovině, jedeme stejnou rychlostí, i když se neodrážíme. Samozřejmě v praxi se pohyb zpomaluje a časem se zastavíme, ale to už na nás působí vnější síly, jako je odpor vzduchu a tření.

Ale stejně to vždy neplatí. Představte si, že jste na tom skateboardu ve stojící tramvaji jak je vidět na Obr.1.3.-5. V okamžiku, kdy se tramvaj začne rozjíždět s jistým zrychlením, začnete se i vy pohybovat se stejným zrychlením vůči tramvaji, ale v opačném směru. Kdyby jste se stihli podívat ven, zjistíte, že jste v klidu vůči okolí. A poslední zjištění. Pokud se tramvaj bude pohybovat rovnoměrným přímočarým pohybem, zůstaneme na skateboardu v klidu i vůči tramvaji.

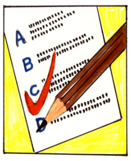


Obr.1.3.-5

Jaký je závěr z tohoto pokusu. Newtonův zákon setrvačnosti platí, vztahujeme-li svůj pohyb vůči okolí tramvaje, ale neplatí, posuzujeme-li pohyb vůči **rozjíždějící se** tramvaji. Narazili jsme na problém diskutovaný v kinematice – problém vztažných soustav. Musíme si tedy definovat vztažné soustavy, ve kterých platí Newtonovy pohybové zákony. Z pokusu se skateboardem plyne, že zákony budou platit tehdy, jestliže tramvaj stojí, nebo se pohybuje pohybem rovnoměrným přímočarým.

Newtonovy pohybové zákony platí ve vztažných soustavách, které jsou vůči sobě v klidu, nebo se vůči sobě pohybují pohybem rovnoměrným přímočarým. Takovéto soustavy se označují jako **inerciální** nebo **setrvačné.**

Se setrvačností těles se denně setkáváme. Projevuje se při rozjezdu automobilu, pozorujeme ji při jeho zastavování, při nárazu na překážku atd. Ještě se k setrvačnosti vrátíme.



TO 1.3.-1. *Proč* při klopýtnutí padáme dopředu, uklouzneme-li, padáme dozadu?

TO 1.3.-2. *Proč* při prudkém zatočení auta doleva jsou cestující přitlačení k pravým dveřím?

TO 1.3.-3. *Jakou funkci mají* bezpečnostní pásy a airbagy v autě?

TO 1.3.-4. Na podlaze vagónu, který jede po přímé vodorovné trati stálou rychlostí, leží kulička. V určitém okamžiku je vagón zabrzděn a jeho pohyb je dále rovnoměrně zpomalený. Tření mezi kuličkou a podlahou vagónu neuvažujte. *Jak se od tohoto okamžiku pohybuje kulička vzhledem k vagónu?*

a) rovnoměrně směrem k přední stěně vagónu

b) rovnoměrně směrem k zadní stěně vagónu

c) rovnoměrně zrychleně směrem k přední stěně vagónu

d) rovnoměrně zrychleně směrem k zadní stěně vagónu

TO 1.3.-5. Na podlaze vagónu, který jede po přímé vodorovné trati stálou rychlostí, leží kulička. V určitém okamžiku je vagón zabrzděn a jeho pohyb je dále rovnoměrně zpomalený. Tření mezi kuličkou a podlahou vagónu neuvažujte. *Jak se bude kulička pohybovat vzhledem k povrchu Země?*

a) rovnoměrně ve směru jízdy vagónu

b) rovnoměrně proti směru jízdy vagónu

c) rovnoměrně zrychleně ve směru jízdy vagónu

d) rovnoměrně zrychleně proti směru jízdy vagónu

Druhý Newtonův pohybový zákon – zákon síly

Již nějakou dobu se zabýváme silou, hovoříme o síle svalů, síle motoru uvádějící do pohybu auto, o síle vystřelující puk. Ale fyzici jsou zvyklí přesně veličinu definovat. Při definování síly jako fyzikální veličiny vyjdeme z několika praktických pozorování.

U sportovního auta (Ferrari) silný motor vyvine sílu, která udělí rychlost 100 km/h za 5 až 6 sekund. To odpovídá zrychlení asi 5,5 m.s^{-2}. Motor běžné slabší Fabie zrychlí auto na 100 km/h přibližně za 12 sekund. Zrychlení tohoto vozu je tedy přibližně 2,3 m.s^{-2}.

Z příkladu je patrné, že **kolikrát bude větší síla působící na těleso, tolikrát větší bude jeho zrychlení.**

Jiný příklad z oblasti automobilismu. Každý automobilista ví, že s plně naloženým vozem se rozjíždí „pomaleji“, tedy s menším zrychlením, než s prázdným autem. A při tom má pod kapotou stejný motor.

Kolikrát větší bude hmotnost tělesa, tolikrát bude při stejné působící síle motoru menší jeho zrychlení.

Shrneme-li obě předchozí pozorování, můžeme vyslovit závěr:

Zrychlení *a*, které uděluje síla *F* tělesu o hmotnosti *m*, je přímo úměrné velikost této síly a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa.

$$a = \frac{F}{m}$$

Vyslovili jsme tak **druhý Newtonovův pohybový zákon – zákon síly.**

Častěji se tento zákon zapisuje ve tvaru:

$F = ma$

Zformulujme si tento zákon již se znalostí derivačního počtu. Vyjádřeme si zrychlení jako první derivaci rychlosti podle času

$$\boxed{F = m\,a = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}}. \qquad 1.3.\text{-}1$$

Je sice pravda, že většinou budete používat sílu danou tímto vztahem. Ale tato rovnice platí pouze v případě, že hmotnost je konstantní (běžná praxe). Ale v případě velkých rychlostí pohybujícího se objektu (srovnatelných s rychlostí světla) se hmotnost mění (relativistika). Jestliže se ale hmotnost mění, pak ji nutně musíte zahrnout do diferenciálu v čitateli.

$$F = \frac{\mathrm{d}(mv)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}.$$

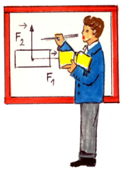
Ale jak hybnost, tak síla jsou vektorové veličiny. Proto přepíšeme poslední vztah do obecné vektorové formy:

$$\boxed{\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}} \quad [\mathrm{N} = \mathrm{kg.m.s^{-2}}] \qquad 1.3.\text{-}2$$

Další slovní vyjádření **druhého Newtonova zákona** tedy zní:

Síla působící na hmotný objekt způsobí časovou změnu jeho hybnosti.

Pokud $\boldsymbol{F} = 0$, je $\mathrm{d}\boldsymbol{p} = 0$ a tedy $\boldsymbol{p}$ = konst. Jinak řečeno hmotný objekt v tomto případě setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu (zákon setrvačnosti).



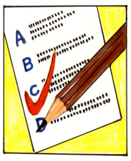
Vyjádřete jednotku 1 N pomocí základních jednotek soustavy SI.

Vyjdeme ze vztahu pro sílu vyjádřenou pomocí hmotnosti a zrychlení

$F = ma$ a dosadíme jednotky jednotlivých veličin. $\mathrm{N} = \mathrm{kg.m.s^{-2}}$.

V předešlých odstavcích jsme hovořili o síle působící na těleso, Výsledkem této činnosti je, že se mění pohybový stav tělesa. Ale co když působí na toto těleso sil více? Vozík táhne více osob?

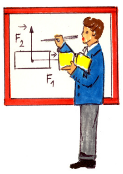
Při působení více sil na těleso je musíme sčítat. Ale protože síla je vektorová veličina, **musíme síly sčítat vektorovým součtem**.



TO 1.3.-6. Na těleso o hmotnosti 2 kg, které je v dané inerciální vztažné soustavě v klidu, začne působit stálá síla o velikosti 4 N. *Jak velké zrychlení tato síla uděluje?*

a) 0,5 $\mathrm{ms^{-2}}$ b) 2 $\mathrm{ms^{-2}}$ c) 4 $\mathrm{ms^{-2}}$ d) 8 $\mathrm{ms^{-2}}$

TO 1.3.-7. Při pokusu se rozjížděl vozíček se zrychlením 30 $\mathrm{cm.s^{-2}}$. *Jaké bude jeho zrychlení*, zvětší-li se na dvojnásobek a) působící tažná síla, b) hmotnost vozíčku?

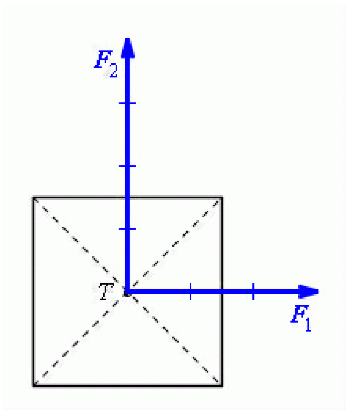


Automobil o hmotnosti 1 t se rozjíždí z klidu a za dobu 20 s dosáhne rychlosti 90 km/h. *Jak velkou tažnou sílu vyvinul motor automobilu?*

Označíme hmotnost automobilu m = 1 t = 1 000 kg, jeho konečnou rychlost v = 90 km/h = 25 m/s, počáteční rychlost $v_o = 0$, čas t = 20 s a hledanou sílu F.

Automobil bude konat vlivem konstantní síly rovnoměrně zrychlený pohyb. K výpočtu síly musíme vypočítat zrychlení ze vztahu pro rychlost $v = v_o + a\,t$ (kapitola 1.2.5) a z ní vyjádříme zrychlení:

$$a = (v - v_o)/t$$

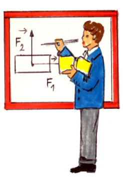


Obr.1.3.-6

Toto zrychlení uděluje automobilu síla daná 2.Newtonovým pohybovým zákonem:

$$F = m\,a = m\,(v - v_o)/t = 1\,000\,(25 - 0)/20 = \underline{1\,250\ \mathrm{N}}.$$

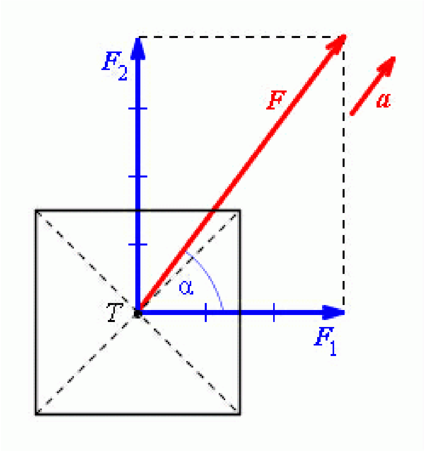
Automobilový motor vyvinul tažnou sílu 1 250 N.



Na krychli hmotnosti 2 kg působí dvě síly $\boldsymbol{F_1}$ a $\boldsymbol{F_2}$. Velikost prvé síly je 3 N, velikost druhé je 4 N. Síly jsou na sebe kolmé. *Určete zrychlení* způsobené oběma silami působícími současně.

Nejdříve si nakreslíme obrázek. Působiště obou sil umístíme do těžiště kvádru, jedna ze sil ať působí ve směru osy x. Ověřte si svůj náčrt na Obr.1.3.-6

Do obrázku zakreslete výslednici obou sil. Hledané zrychlení bude mít směr této výslednice. Opět si ověřte svůj výsledek na Obr.1.3.-7.

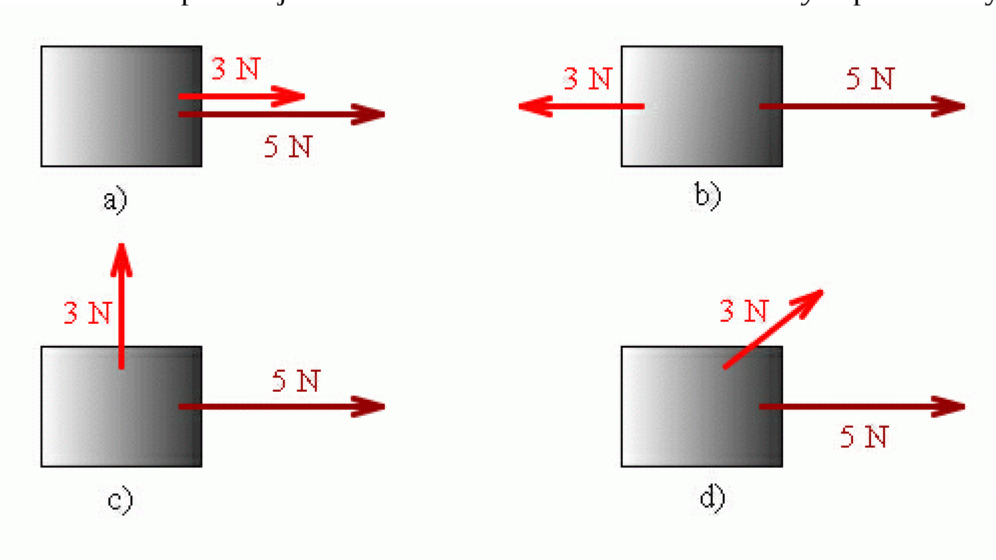


Obr.3.1.-7

A teď již můžeme začít počítat. Nejdříve si stanovíme výslednou sílu $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F_1} + \boldsymbol{F_2}$. Z druhého obrázku vyjádříme její velikost jako výslednici vektorového součtu obou sil: $F = \sqrt{\left(F_1^2 + F_2^2\right)} = \sqrt{\left(3^2 + 4^2\right)} = 5\ N$.

Zrychlení vypočítáme z definičního vztahu pro sílu $F = ma$ jako podíl výsledné síly a hmotnosti krychle $a = \dfrac{F}{m} = \dfrac{5}{2} = 2{,}5$ m.s^{-2}.

U 1.3.-3. Na obrázcích Obr.1.3.-8 jsou znázorněny dvě různě veliké síly působící v různých směrech na kvádr pohybující se po podložce bez tření. *Seřaďte obrázky* a), b), c), d) za prvé podle velikosti výslednice sil od největší po nejmenší. Za druhé *seřaďte obrázky* podle zrychlení kvádru.



Obr.1.3.-8

U 1.3.-4. Automobil o hmotnosti 1 200 kg jel rovnoměrně zpomaleným pohybem a zastavil za dobu 5 s na dráze 25 m. a) *Jak velká byla počáteční rychlost automobilu?* b) *Jak velká byla brzdící síla?*

U 1.3.-5. Nákladní automobil o hmotnosti 3 t začne brzdit při rychlosti 90 km/h a zastaví za dobu 10 s. a) *Jak velkou brzdící sílu vyvinou brzdy automobilu*? b) *Jakou brzdnou dráhu přitom automobil ujede?*

TO 1.3.-8. Síla působící na hmotný bod má směr dráhy a je konstantní co do směru i velikosti. *Pohyb hmotného bodu je* v tomto případě

a) rovnoměrný přímočarý

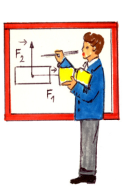
b) rovnoměrný křivočarý

c) rovnoměrně zrychlený přímočarý
d) rovnoměrně zrychlený křivočarý
e) klid

TO 1.3.-9. Síla působící na hmotný bod má konstantní velikost, ale její směr se neustále mění. *Pohyb hmotného bodu je* v tomto případě
a) rovnoměrný přímočarý
b) rovnoměrný křivočarý
c) rovnoměrně zrychlený přímočarý
d) rovnoměrně zrychlený křivočarý
e) klid

TO 1.3.-10. Výslednice sil působících na hmotný bod je $\boldsymbol{F}$ = 0 N. *Pohyb hmotného bodu je* v tomto případě
a) rovnoměrný přímočarý
b) rovnoměrný křivočarý
c) rovnoměrně zrychlený přímočarý
d) rovnoměrně zrychlený křivočarý
e) klid

TO 1.3.-11. Na těleso hmotnosti 2 kg působí síla $F = 4t - 1$ konstantního směru. *Jaký pohyb bude vykonávat těleso* ?
a) rovnoměrný přímočarý
b) rovnoměrně zrychlený přímočarý
c) nerovnoměrný přímočarý
d) rovnoměrně zrychlený křivočarý
e) rovnoměrný křivočarý



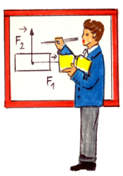
Těleso hmotnosti 2 kg se pohybuje rychlostí 10 m/s. V čase t = 0 s na něj začne působit síla 5 N ve směru rychlosti. *Vypočítejte rychlost tělesa v čase t = 2 s.*

Protože se jedná zřejmě o pohyb přímočarý – síla působí ve směru rychlosti, můžeme používat vztahy pro velikosti zadaných vektorů. Dalším předpokladem je neměnící se hmotnost – rychlost pohybu je malá.

Nejdříve si stanovíme ze známé síly a hmotnosti objektu velikost zrychlení. Ze zákona síly $F = m\,a$ vyjádříme zrychlení $a = F/m$.

A jsme již v kinematice. Z definice zrychlení $a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ vyjádříme rychlost a vztah integrujeme pomocí určitého integrálu

$$v = \int_0^2 a\,\mathrm{d}t + v_o = \frac{1}{2}at\Big|_0^2 + v_o = \frac{1}{2}\frac{F}{m}t\Big|_0^2 + v_o \text{ a po dosazení } v = \frac{1}{2}\frac{5}{2}2^2 + 10 = \underline{15\ \mathrm{m.s^{-1}}}.$$



Na těleso hmotnosti 10 kg začne působit síla $F = 10 - 20t$ (N,s). Napište rovnici rychlosti tohoto tělesa za předpokladu, že počáteční rychlost je nulová $v_o = 0$ m.s^{-1}.

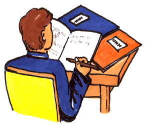
Z rovnice pro sílu vidíme, že se síla mění s časem, není konstantní. Podělíme rovnici hmotností (považujeme ji za konstantní) a dostaneme rovnici pro zrychlení v závislosti na čase $a = F/m = 1 - 2t$.

A teď řešíme kinematický problém. Z definičního vztahu pro zrychlení $a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ vyjádříme diferenciál rychlosti dv a obě strany rovnice integrujeme. Po dosazení do integrálu na pravé straně za zrychlení obdržíme vztah

$v = \int (1-2t)\mathrm{d}t + v_o$

Integrál vyřešíme a protože počáteční rychlost je nulová dostaneme pro rovnici rychlosti v závislosti na čase vztah

$v = t - t^2$ (m.s^{-1},s).



U 1.3.-6. Těleso hmotnosti 1 kg se pohybuje rychlostí $v = 2t^2 + 3t + 2$ (m/s,s) *Určete sílu*, která tento pohyb způsobuje. F =

U 1.3.-7. Na těleso hmotnosti 2 kg, které je v klidu, začne působit síla $F = 4t - 1$. *Napište rovnici rychlosti* tohoto tělesa. v =

U 1.3.-8. Na těleso hmotnosti 2 kg, které je v klidu, začne působit síla F = 4t - 1 (N,s). *Jaká je rychlost* tohoto tělesa ve 4 sekundě ? v =

Pohybové rovnice

Ještě si důkladněji probereme druhý Newtonův pohybový zákon – zákon síly.

Interpretaci definice $\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}$ je nutné upřesnit. Správně by zápis měl znít

$$\sum \boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}. \qquad 1.3.\text{-}3$$

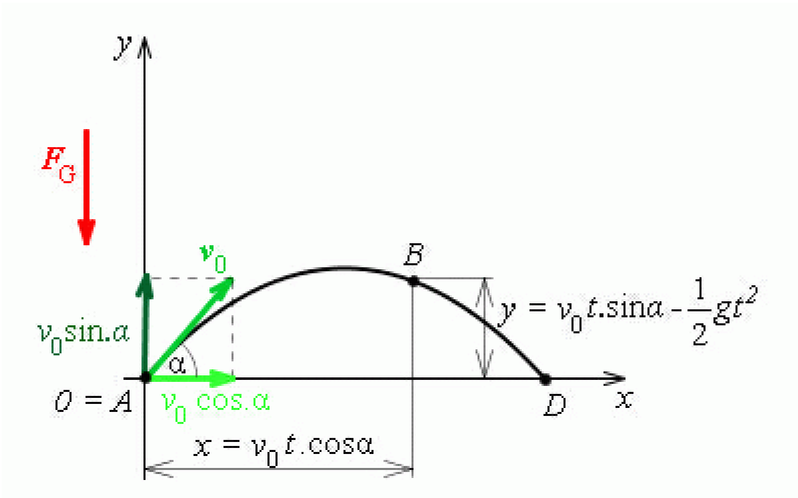
Slovně by se měl tento zákon vyjadřovat jako

Vektorový součet všech sil působících na těleso způsobí časovou změnu hybnosti tohoto tělesa.

Poslední rovnice, jako každá vektorová rovnice, je ekvivalentní třem rovnicím skalárním proložky síly $\boldsymbol{F}$:

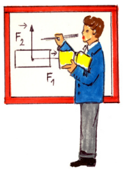
$$\sum F_x = \frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t}, \quad \sum F_y = \frac{\mathrm{d}p_y}{\mathrm{d}t}, \quad \sum F_z = \frac{\mathrm{d}p_z}{\mathrm{d}t}. \qquad 1.3.\text{-}4$$

Vektorový rovnici pro působící síly (žlutě vybarvená) se říká **pohybová rovnice.** Pohybové rovnice se zpravidla zapisují ve skalárním tvaru pro určité směry jako jsou tři výše uvedené rovnice pro směry x, y a z v pravoúhlé souřadné soustavě. Ale zvolené směry mohou být jiné, třeba pro pohyb kruhový se volí směr tečny a normály a pod. Obr.1.3.-9



Stanovte rovnici trajektorie a vztahy pro dobu výstupu, výšku výstupu a délku vrhu vrhu šikmého vzhůru pod úhlem α s počáteční rychlostí v_o.

Použijeme pohybových rovnic, které napíšeme pro směry souřadných os x a y jak je vidět na Obr.1.3.-9. Začneme se směrem x. Neuvažujeme-li odpor



prostředí, pak v tomto směru nepůsobí na vržené těleso žádná síla. Pohybová rovnice tedy bude vypadat následovně:

$0 = \frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t}$. Protože se jedná o pohyb s malými rychlostmi, tedy hmotnost se nemění, můžeme vytknout hmotnost před derivační znaménko a celou rovnici podělit nenulovou hmotností a dostaneme $0 = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}$. Jestliže je časová derivace rychlosti ve směru x rovna nule, pak tato rychlost musí být konstantní po celé dráze šikmého vrhu a rovna x-ové složce počáteční rychlosti $v_x = v_{\mathrm{ox}}$. Vyjádříme si nyní tuto rychlost pomocí dráhy $v_{ox} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$, napíšeme rovnici pro $\mathrm{d}x = v_{ox}\,\mathrm{d}t$ a integrujeme:

$$\int \mathrm{d}x = \int v_{ox} \mathrm{d}t + C\,.$$

Po integraci dostáváme rovnici $x = v_{ox}.t + C$. Pro stanovení integrační konstanty C vyjdeme z „počátečních podmínek“. V našem případě známe situaci na počátku vrhu, tedy v čase $t = 0$, kdy těleso je v počátku a tedy také $x = 0$. Integrační konstanta je tedy také nulová, jak zjistíme po dosazení do rovnici pro dráhu x. Dosadíme-li nyní za $v_{ox} = v_o \cos \alpha$ dostaneme konečně rovnici pro složku dráhy ve směru x:

$x = v_o\, t \cos \alpha.$

Teď se podívejme na směr y. V tomto směru nám již působí síla a to tíha $F_G = mg$ (pokud zase neuvažujeme odpor prostředí). Pohybová rovnice pro směr y tedy bude vypadat následovně: $-mg = \frac{\mathrm{d}p_y}{\mathrm{d}t}$ (- znaménko na levé straně znamená, že orientace vektoru tíhy a osy y je opačná). Opět můžeme rovnici vykrátit m, vyjádřit $\mathrm{d}v_y$ a integrovat:

$\int \mathrm{d}v_y = \int -g\ dt + C_1$ a po integraci

$v_y = - gt + C_1.$

Z počátečních podmínek opět zjistíme, že konstanta C_1 je rovna y-ové složce počáteční rychlosti, tj. $v_{oy} = v_o \sin \alpha$. Rychlost ve směru y se s časem bude měnit podle rovnice: $v_y = -gt + v_o \sin \alpha.$

Zase již naučeným postupem si vyjádříme $v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$, z tohoto vztahu vyjádříme $\mathrm{d}y$, dosadíme za v_y, integrujeme pomocí neurčitého integrálu, určíme integrační konstantu (bude nulová) a dostaneme pro y-ovou složku dráhy:

$y = - 1/2\, g\, t^2 + v_o\, t \sin \alpha$.

Získali jsme tedy následující vztahy:

a) $v_x = v_{ox} = v_o \cos \alpha$

b) $x = v_o\, t \cos \alpha$

c) $v_y = - gt + v_o \sin \alpha.$

d) $y = - 1/2\, g\, t^2 + v_o\, t \sin \alpha$

A konečně se můžeme dostat k odpovědi na zadání.

Rovnice trajektorie.

Z rovnice b) vyjádříme čas *t* dosadíme do rovnice d). Dostanete rovnici paraboly

Doba výstupu.

Když se podíváte na vržený objekt ve směru osy *x*, pak objekt nejdříve stoupá rychlost v_y, zastaví se v nejvyšším bodě a začne klesat. Tedy platí, že v nejvyšším bodě je *y*-ová složka rychlosti nulová: Tuto podmínku dosadíme do rovnice c) $v_y = -gt_v + v_o \sin\alpha = 0$. Z této podmínky stanovíme příslušnou dobu výstupu jako $t_v = \dfrac{v_o \sin\alpha}{g}$.

Výška výstupu.

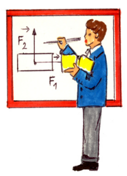
Jestliže tento čas dosadíme do rovnice d), dostaneme nejvyšší výšku dráhy $y_{\max} = \dfrac{v_o^2 \sin^2\alpha}{2g}$.

Délka vrhu.

A konečně délku vrhu dostaneme z rovnice pro *x* (b)), když za čas dosadíme takový čas, který odpovídá nulové výšce ($y = 0$). Tedy nejdříve řešíme rovnici $0 = -1/2\, g\, t^2 + v_o\, t \sin\alpha$ pro čas, kdy nám vyjdou dvě řešení (je to kvadratická rovnice). Prvé řešení odpovídá počátku hodu $t = 0$, druhé je pak náš hledaný čas, který dosadíme do rovnice $x = v_o\, t \cos\alpha$ a vyjde nám

$$y_{\max} = \frac{v_o^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Poznámka: Možná se vám zdál postup příliš složitý, zejména v prvé části při výpočtu složek dráhy, ale uvědomte si, že jste potřebovali jenom vědět co je pohybová rovnice a znát obecnou definici okamžité rychlosti a okamžitého zrychlení, nic víc. Na většině středních škol pak po vás chtěli znalost devíti konkrétních vzorců.



Těleso hmotnosti 2 kg se pohybuje účinkem své tíhy po nakloněné rovině $\alpha = 30^o$ bez tření směrem dolů. *Vypočítejte zrychlení* tělesa po dvou sekundách jeho pohybu.

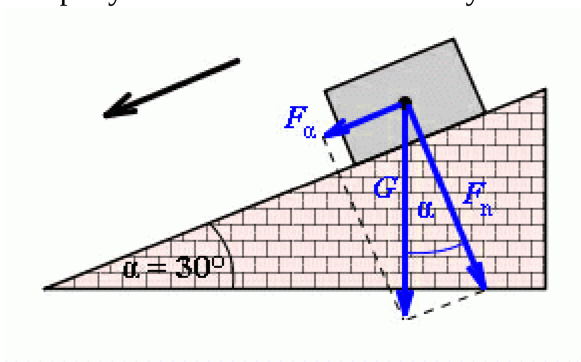
Jedná se o použití pohybové rovnice. **Nejdříve si musíme stanovit směr**, ve kterém budeme pohybovou rovnici psát. Podívejte se na Obr.1.3.-10. V tomto případě nejsou nejvhodnější směry os *x* a *y*, ale směr pohybu – směr nakloněné roviny.

Takže si napíšeme pohybovou rovnici pro v obrázku šipkou vyznačený směr.

$$\sum F = \frac{dp}{dt} = m\frac{dv}{dt}.$$

V naznačeném směru nakloněné roviny působí jen složka tíhy $F_\alpha = G \sin\alpha = m\, g \sin\alpha$ (pohybujeme se bez tření). Můžeme tedy pohybovou rovnici konkretizovat:

$$mg \sin\alpha = m\frac{dv}{dt} = ma.$$



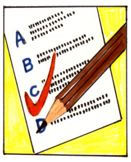
Obr.1.3.-10

Z této rovnice vyjádříme vztah pro zrychlení:

$a = g \sin\alpha$.

Vidíme, že zrychlení je konstantní. V kterémkoliv čase (tedy i v čase 2 s) bude zrychlení rovno <u>5 m.s^{-2}</u>.

Poznámka: do vztahu pro zrychlení jsme dosadili za tíhové zrychlení přibližnou hodnotu g = 10 m.s^{-2}. Toto zjednodušení se velice často používá pro orientační výpočty.



TO 1.3.-12 Těleso se pohybuje účinkem své tíhy po nakloněné rovině bez tření směrem dolů. *Pohyb tělesa je*

a) rovnoměrně zrychlený
b) nerovnoměrný zrychlený
c) rovnoměrný přímočarý
d) nerovnoměrný zpomalený

TO 1.3.-13 Těleso hmotnosti 1 kg se pohybuje účinkem své tíhy po nakloněné rovině α = 30^{o} bez tření směrem dolů se zrychlením 3 m.s^{-2}. *Z těchto údajů*

a) plyne, že na těleso kromě tíhy musí působit ještě další síly
b) plyne, že těleso se pohybuje pouze pod vlivem své tíhy
c) nelze rozhodnout, zda na těleso působí kromě tíhy ještě další síly

Tíhová síla a tíha tělesa

V předchozím Řešeném příkladu jste používali pojem tíhová síla. Osvěžme si tento pojem ze středoškolské fyziky.

Jednou ze sil, se kterými se běžně setkáváme je síla, kterou na nás působí gravitační pole Země. Pokud nestojíme na Zemi, nebo nejsme nějak připoutáni, pak padáme – pohybujeme se volným pádem. Jak jsme si již řekli v kinematice, volný pád je rovnoměrně zrychlený pohyb s konstantním zrychlením $\boldsymbol{g}$ nazývaným **tíhové zrychlení.** V některých učebnicích najdete tíhové zrychlení označované symbolem $\boldsymbol{a}_G$.

Vynásobíme-li tíhové zrychlení g hmotností m tělesa, dostaneme podle druhého Newtonova pohybového zákona sílu, která způsobuje volný pád tohoto tělesa. Tato síla se nazývá **tíhová síla $\boldsymbol{F_G}$** a její velikost je dána vztahem:

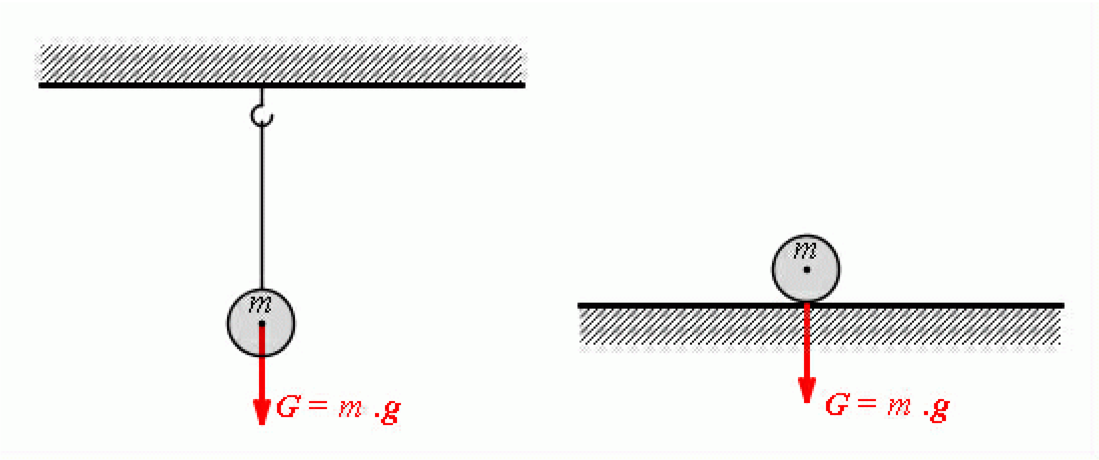
$F_G = m\,g$

Tíhová síla má vždy směr svisle dolů, kolmo na povrch Země.

Tíhová síla se neprojevuje pouze na Zemi. Třeba na Měsíci působí na astronauta tíhová síla 6 krát menší než na Zemi. Je to dáno tíhovým zrychlením na Měsíci, které je 6 krát menší.

Tíhová síla nemá vždy na těleso účinek pohybový, jak bylo ukázáno na volném pádu. Visíme-li na laně nebo stojíme na pevné zemi, pak na nás také působí tíhová síla (Obr.1.3.-11). K pohybu však nedochází, síla působí v případě lana jako **tahová síla**, v druhém případě jako **síla tlaková.**

.

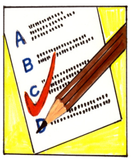


Obr.1.3.-11

Tíhovou sílu, kterou působí nehybné těleso na vodorovnou podložku nebo na svislý závěs nazýváme **tíhou tělesa *G***.

Je-li těleso v klidu, má tíha a tíhová síla stejný směr i stejnou velikost, tj. $\boldsymbol{G = F_G}$. Můžeme tedy napsat:

$$G = m\,g. \qquad 1.3.\text{-}5$$



TO 1.3.-14 *Jak velká tíhová síla působí na člověka* o hmotnosti 100 kg na povrchu Země a na povrchu Měsíce?

TO 1.3.-15 *Jak velká je tíha člověka* v obou případech předešlé testové otázky.

Odporové síly

Jedeme-li na saních z kopce dolů, zpomalují náš pohyb hned dvě síly. Našemu pohybu brání odpor vzduchu a tření.

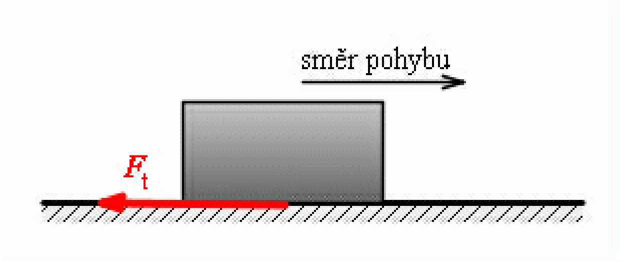
Odporové síly působí proti směru pohybu tělesa a brzdí jeho pohyb.

Nejznámější odporové síly jsou třecí síla, odporová síla valivého odporu a odporová síla prostředí.

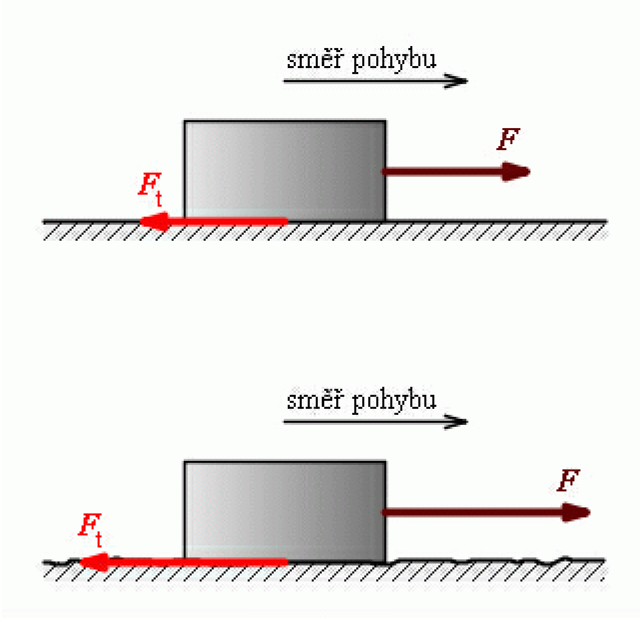
Jestliže se těleso posouvá po povrchu jiného tělesa (podložky), dochází ke **smykovému tření.** Odporová síla, která pohyb brzdí se nazývá **třecí síla** $\boldsymbol{F_t}$ a působí na stykové ploše pohybujícího se tělesa a podložky jak je vidět na Obr.1.3.-12.

Ze zkušenosti víme, že bednu taženou po hladké podložce posuneme s menším úsilím (menší silou) než po betonu viz Obr.1.3.-13. Větší sílu musíme vynaložit na těžší bednu (Obr.1.3.-14).. Trochu s překvapením bychom zjistili, že nezáleží na velikosti třecích ploch jak je

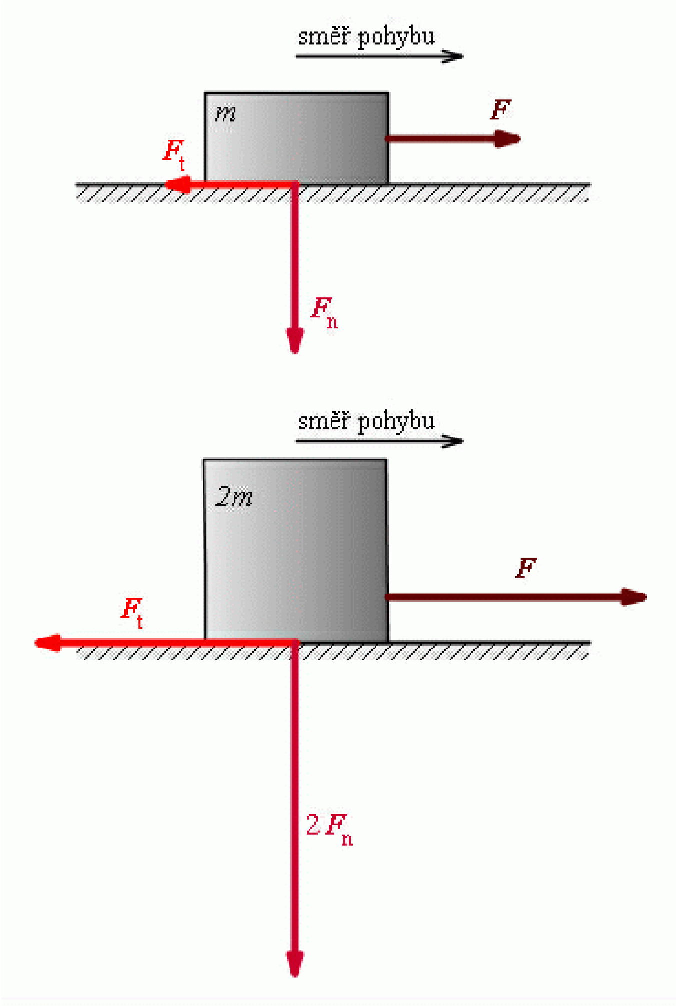
znázorněno na Obr.1.3.-15. A konečně největší sílu musíme vynaložit do uvedení bedny do pohybu. Z těchto pozorování můžeme udělat následující závěry:



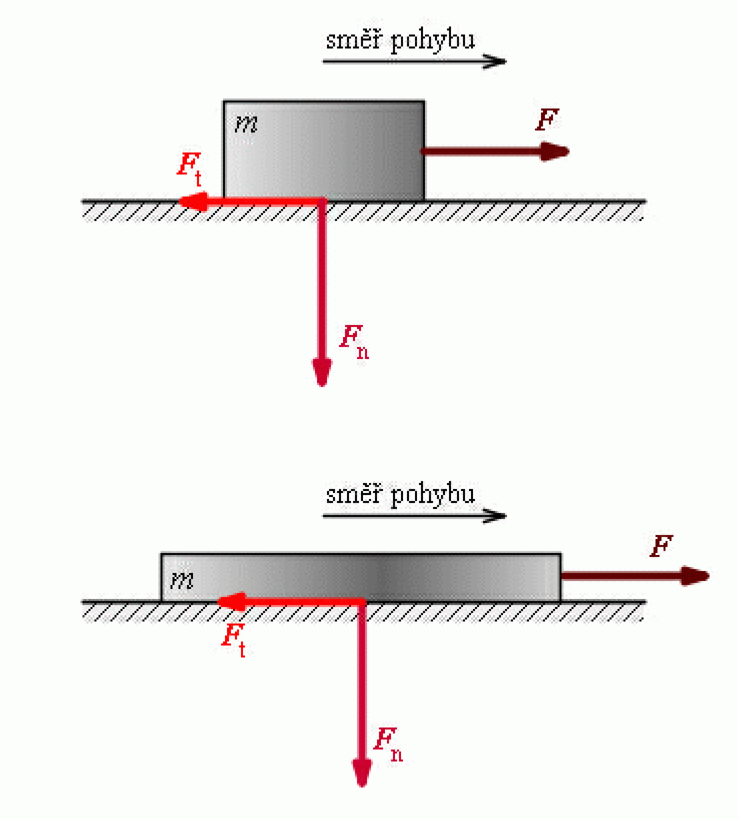
Obr.1.3.-12



Obr.1.3.-13



Obr.1.3.-14



Obr.1.3.-15

- **Třecí síla je přímo úměrná tlakové síle F_n,** kterou působí těleso kolmo na podložku. Konstantou úměrnosti je **součinitel smykového tření** *f*.

$F_t = f F_n$. 1.3.-6

Součinitel (nebo koeficient) smykového tření je bezrozměrné číslo. V tabulkách se udává vždy pro dvojici materiálů, které se po sobě posouvají (viz tabulka Součinitel smykového tření).

Tlaková síla je velice často dána tíhou tělesa.

- **Velikost třecí síly nezávisí na velikosti stykových ploch**.
- **Klidová třecí síla je větší, než třecí síla působící při pohybu.**

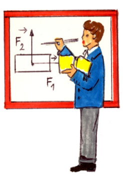
Kdo jste četli knížku Jacka Londona Bílý tesák, možná jste si všimli tohoto jevu v episodě o sázce. Hlavní hrdina se vsadil, že jeho pes uveze na saních neuvěřitelný náklad. Kritickým momentem byla snaha psa „odtrhnout“ sáně od sněhu, tedy vyvinout dostatečnou sílu k překonání klidové třecí síly. V okamžiku, kdy se daly sáně do pohybu, měl vyhráno.

Součinitel smykového tření

f_0 - součinitel smykového tření, začíná-li pohyb z klidu

f – součinitel smykového tření v pohybu

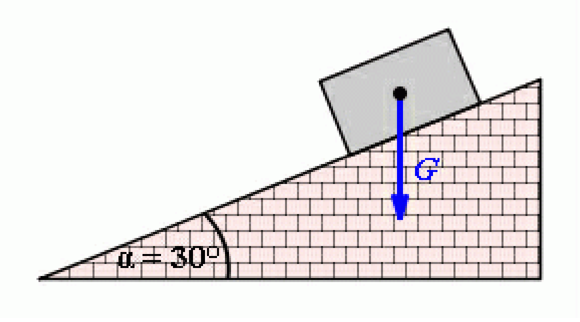
Látka	f_0	f
kalená ocel na kalené oceli	0,15	0,10
mazáno	0,1 až 0,12	0,05 až 0,1
měkká ocel na měkké oceli	0,13	0,10
mazáno	0,11	0,09 až 0,10
železniční kolo na kolejnici	0,25	0,18
vlhké	0,2 až 0,1	0,018
kalená ocel na šedé litině	0,3	0,27 až 0,13
měkká ocel na šedé litině	0,19	0,18
mazáno	0,05 až 0,15	0,075
kalená ocel na ledě	0,03	0,01
ocel na dřevě	0,65	0,5 až 0,4
kůže na šedé litině	0,3 až 0,5	0,56
pryž na betonu	0,7 až 1,0	0,7
pryž na asfaltové vozovce	0,5 až 0,75	0,71
vlhké	0,25 až 0,6	0,2 až 0,3
pryž na dlažbě	0,6 až 0,8	
dřevo na dřevě	0,50	0,34
vlhké	0,33	0,15
korek na oceli		0,45
nylon na oceli		0,3
polystyrén na oceli		0,5
teflon na oceli		0,05

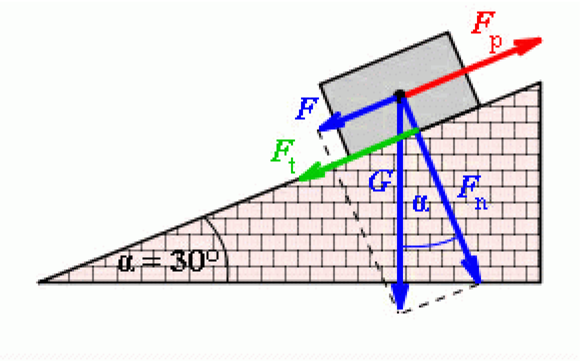


S jakým zrychlením se bude pohybovat bedna hmotnosti 10 kg tlačená vzhůru po prkně silou 100 N. Prkno má sklon 30°, koeficient smykového tření mezi bednou a prknem je 0,1.

Nejdříve si nakreslíme obrázek. Zkuste si nakreslit základní schéma sami. Ověřte si svůj nákres na Obr.1.3.-16. Teď si do obrázku zakreslete všechny působící síly.

Ve směru pohybu musí působit síla 100 N, kterou si označte jako F_p. Proti pohybu bude působit síla tření $F_t = f\,F_n$ a složka tíhy F působící ve směru nakloněné roviny. Srovnejte si svůj obrázek s Obr.1.3.-17.





Obr.1.3.-16

Obr.1.3.-17

Vytvořili jsme si tak základní předpoklad pro vlastní výpočet. Síla F_v, kterou bude posunována bedna nahoru po nakloněné rovině, bude dána silou F_p zmenšenou o třecí sílu F_t a složku tíhy F.

$F_v = F_p - F_t - F.$

Třecí síla je dána součinem koeficientu tření f a tlakové síly na podložku $F_n = G\cos\alpha$. Složka tíhy F, která by způsobovala posuv dolů po nakloněné rovině, kdybychom nepůsobili silou F_p je $F = G\sin\alpha$ Po dosazení do rovnice pro síly dostáváme

$F_v = F_p - f\,m\,g\cos\alpha - m\,g\sin\alpha$.

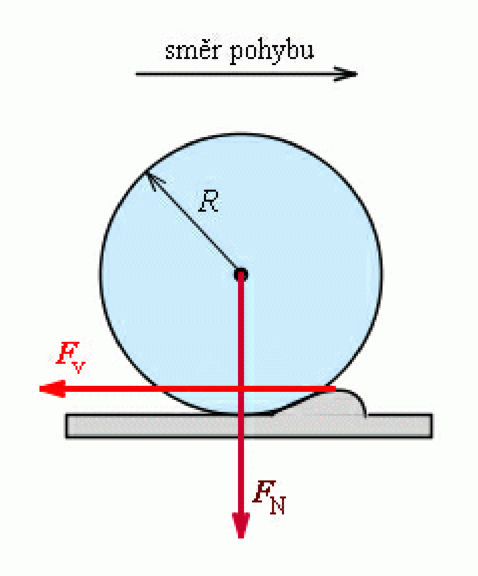
A dosazením číselných hodnot

$F_v = 100 - 0{,}1.10.9{,}81.\cos 30^{\circ} - 10.9{,}81.\sin 30^{\circ} = 42{,}46$ N.

Ale to ještě nejsme na konci. Úkolem bylo vypočítat zrychlení pohybu bedny. To vypočítáme z druhého Newtonova pohybového zákona (zákona síly) $F = m\,a$. Z toho plyne pro zrychlení

$$a = \frac{F}{m} = \frac{42{,}46}{10} \cong 4{,}2\,\mathrm{m.s^{-2}}.$$

Další odporovou silou, kterou si probereme, je odporová síla valivého odporu. O valivém odporu mluvíme tehdy, jestliže se těleso s kruhovým průřezem (např. válec) **valí** po pevné podložce. Při tomto pohybu dochází ke stlačování a deformaci podložky před valícím se tělesem, někdy i k deformaci samotného tělesa. Většinou tyto deformace nepozorujeme. Příčinou tohoto jevu je zase kolmá tlaková síla F_n . Situace je znázorněna na Obr.1.3.-18.

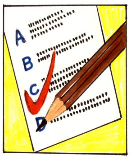


Obr.1.3.-18

Odporová síla valivého odporu F_v **je přímo úměrná kolmé tlakové síle** F_n působící na podložku **a nepřímo úměrná poloměru** R tělesa. Konstantou úměrnosti je **rameno valivého odporu** ξ (ksí).

$$F_v = \xi \frac{F_n}{R} \,. \qquad 1.3.\text{-}7$$

Rameno valivého odporu (dříve se používal logičtější název součinitel valivého tření) se vyjadřuje v metrech. Zase se jedná o tabelované hodnoty.



TO 1.3.-16 Dělník posunuje *rovnoměrným* pohybem bednu o hmotnosti 100 kg. *Jak velkou silou na ni působí,* je-li součinitel smykového tření 0,47?

TO 1.3.-17 *Velikost smykového tření závisí:*

a) na součiniteli smykového tření a kolmé tlakové síle

b) na součiniteli smykového tření, na velikosti styčných ploch a na kolmé tlakové síle

c) na součiniteli smykového tření a na velikosti styčných ploch

d) na velikosti styčných ploch a na kolmé tlakové síle.

TO 1.3.-18 Součinitel smykového tření:

a) je bezrozměrné číslo

b) má rozměr síly

c) má rozměr délky

d) má rozměr plochy

TO 1.3.-19 Rameno valivého odporu

a) je bezrozměrné číslo

b) má rozměr síly

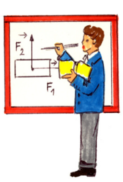
c) má rozměr délky

d) má rozměr rychlosti

U 1.3.-9 Na sedadle vagónu leží kniha a míček. Při rozjíždění vlaku se začal pohybovat míček, zatímco kniha zůstala v klidu. *Vysvětlete.*

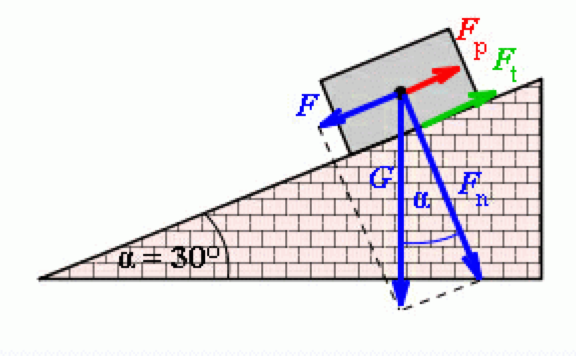
U 1.3.-10 Na korbě nákladního auta jedoucího po přímém vodorovném úseku silnice je bedna. Auto začne brzdit tak, že za dobu 7 s se zmenší jeho rychlost ze 72 km/h na 30 km/h. *Určete mezný součinitel smykového tření f,* při kterém bedna ještě nebude klouzat po podlaze korby.

U 1.3.-11 *Srovnejte síly nutné k přesouvání* bedny hmotnosti 50 kg rovnoměrným pohybem. V prvém případě je bedna posouvána po vodorovné podložce, součinitel smykového tření je 0,2. V druhém případě je bedna podložena válečky o průměru 10 cm. Rameno valivého odporu je v této situaci 0,005 m.



Bedna hmotnosti 5 kg je upevněna na lanu a leží na nakloněné rovině o úhlu 30°. Koeficient tření mezi bednou a nakloněnou rovinou je 0,1. *Jakou silou je napínáno lano?*

Použijeme opět pohybových rovnic, lépe řečeno bude zase stačit jedna. A sice napíšeme pohybovou rovnici pro směr nakloněné roviny. V tomto směru působí následující síly: složka tíhy F = G sinα = mg sinα, dále třecí síla F_t = $F_n\, f$ = mgf cosα a konečně hledaná tahová síla F_p. Vše je znázorněno a Obr.1.3.-19.



Protože bedna je udržována lanem v klidu, bude v pohybové rovnici výsledná síla nulová a pohybová rovnice bude vypadat následovně:

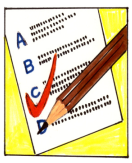
F - F_t - F_p = 0, a po dosazení mg sinα – mgf cosα –F_p = 0.

Po úpravě F_p = mg (sinα – $f$cosα). Po dosazení konkrétních hodnot

F_p = 5 10 (0,5 – 0,1 0,866) = <u>20,7 N</u>

Lano bude napínáno silou 20,7 N.

Obr.1.3.-19



TO 1.3.-20 Těleso se pohybuje účinkem své tíhy po nakloněné rovině s úhlem α. Součinitel smykového tření f je různý od nuly. Víte-li, že platí rovnice $m.g.$sinα = $f.m.g.$cosα, *můžete tvrdit* že

a) pohyb tělesa je rovnoměrný přímočarý
b) pohyb tělesa je rovnoměrně zrychlený
c) pohyb tělesa je nerovnoměrný
d) o druhu pohybu nelze činit žádné závěry

U 1.3.-12. Těleso se pohybuje účinkem své tíhy po nakloněné rovině s úhlem α. *Jakou hodnotu* musí mít součinitel smykového tření f, aby pohyb tělesa byl rovnoměrný přímočarý. f =

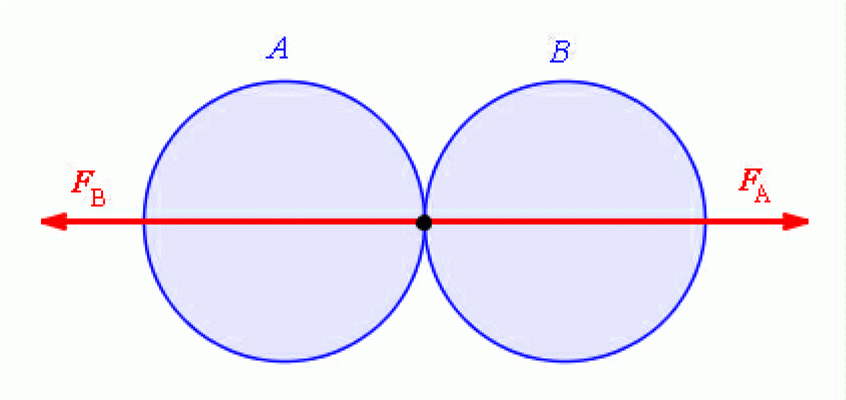
U 1.3.-13. Kámen, který je vržen rychlostí 2 m/s po ledě se zastaví na dráze 20 m. *Vypočítejte velikost součinitele smykového tření* za předpokladu, že je konstantní. f =

Třetí Newtonův pohybový zákon – zákon akce a reakce

V úvodu kapitoly o dynamice jsme si zdůraznili, že síla se projevuje při vzájemném působení těles. Zdviháme-li nějaký předmět, působíme na něj silou ruky. Ale současně tento předmět působí i na ruku. Srazíme-li se s někým člověkem, působíme silou na něj. Ale současně i on působí stejně velikou silou na nás. Z těchto několika ukázek je možné vyvodit několik závěrů:

- Síly, kterými na sebe působí dvě tělesa A a B jsou stejně veliké F_A = F_B.
- Tyto síly jsou stejného směru, avšak opačné orientace $\boldsymbol{F_A} = - \boldsymbol{F_B}$.
- Obě síly současně vznikají a současně zanikají.
- Každá z těchto sil působí na jiné těleso, proto se ve svém účinku neruší.

Uveďme si ještě jeden příklad , na kterém si ukážeme obě působící síly. Vezměme si dvě koule A a B, které se srazí. V okamžiku srážky koule A působí na kouli B silou F_A a současně působí koule B na kouli A silou F_B. Na obrázku Obr.1.3.-20 máme znázorněny obě síly.



Obr.1.3.-20

Pokusy potvrzující tato tvrzení prováděl již Isaac Newton. Na jejich základě formuloval **třetí pohybový zákon:**

Síly, kterými na sebe působí dvě tělesa jsou stejně veliké, stejného směru, opačné orientace a vznikají a zanikají současně.

Někdy se používá ještě jiná formulace. Nazveme-li jednu ze sil **akce** a druhou **reakce,** pak lze napsat:

Každá akce vyvolává stejně velkou reakci stejného směru, ale opačné orientace .

Odtud název pro třetí Newtonů pohybový **zákon akce a reakce.**

U 1.3.-14. Kniha ležící na stole působí na desku stolu silou – v tomto případě je touto silou tíha knihy G. Deska působí na knihu také silou F, silou, která zabraňuje deformaci desky. *Nakreslete schematický obrázek. Která z obou sil je silou akce a která reakce*?

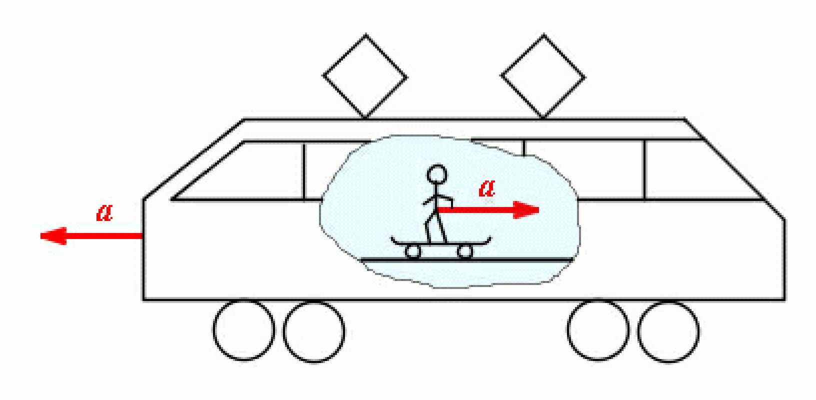
U 1.3.-15. Působí-li dvě stejně veliké síly opačné orientace na jedno těleso, pak se jejich účinky ruší. *Ruší se i účinky sil akce a reakce?*

1.3.3. Síla v neinerciální soustavě

Pod aplikaci pohybových rovnic je výhodné také zařadit téma **Pohyb ve zrychlené soustavě**. Představte si, že v předchozím řešeném příkladě lano vytahuje ne bednu, ale kabinu lanovky. Při rozjezdu se kabina pohybuje pohybem zrychleným a na vás působí zdánlivá síla, která vás „vtlačí“ do sedadla lanovky. Tato síla je dána vzájemným pohybem „vaší“ soustavy – kabinky vůči soustavě spojené se zemí. Síly stejného druhu se projevují u kruhových pohybů (zatáčka) a složených pohybů vůbec.

O Newtonových pohybových zákonech jsme si řekli, že platí pouze v inerciálních soustavách. Jak budeme řešit problémy silového působení v neinerciálních soustavách?

Už jsme se této problematiky dotkli v kapitole o prvém Newtonově pohybovém zákonu. Vzpomeňte si na rozjíždějící se tramvaj a jezdce na skateboardu na Obr.1.3.-5. Jezdec je v klidu vůči tramvaji, která se pohybuje pohybem rovnoměrným přímočarým. Soustava spojena s jezdcem a soustava spojená s tramvají jsou inerciální.



Obr.1.3.-5

V okamžiku, kdy tramvaj začne zrychlovat se zrychlením $\boldsymbol{a}$ jsou již obě soustavy **neinerciální.** Skateboardista se začne pohybovat ve směru proti pohybu tramvaje. Člověk v tramvaji, který je vůči ní v klidu (sedí), pozoruje pohyb skateboardisty jako pohyb zrychlený se zrychlením **–** $\boldsymbol{a}$, tedy opačným než je zrychlení tramvaje.

Zrychlení skateboardisty **není vyvoláno silovým působením žádného tělesa**. Sílu, která vyvolává jeho zrychlený pohyb, a **která vzniká v důsledku zrychleného pohybu vztažné soustavy** nazýváme **setrvačná síla** $\boldsymbol{F_s}$.

Někdy se setrvačné síly označují jako síly **zdánlivé.**

Setrvačnou síla, která uděluje jezdci zrychlení opačného směru než je zrychlení $\boldsymbol{a}$ tramvaje vůči povrchu Země je možné vyjádřit vztahem

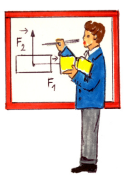
$\boldsymbol{F_s} = - m\,\boldsymbol{a}$. 1.3.-8

V neinerciální vztažné soustavě:

- neplatí zákon setrvačnosti,
- neplatí zákon akce a reakce.

Vidíte, že jsme vynechali druhý Newtonův pohybový zákon – zákon síly. Jak je to s platností tohoto zákona v neinerciální vztažné soustavě?

- Zákon síly je možné v neinerciální vztažné soustavě použít s tím, že setrvačná síla má opačný směr než zrychlení, které ji vyvolává.



Vypočítejte sílu, kterou působí člověk hmotnosti 100 kg na podlahu výtahu když se výtah pohybuje:

a) pohybem rovnoměrným,

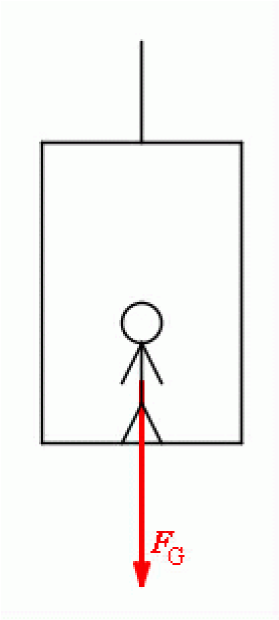
b) zrychleným pohybem směrem nahoru se zrychlením 2 m.s^{-2},

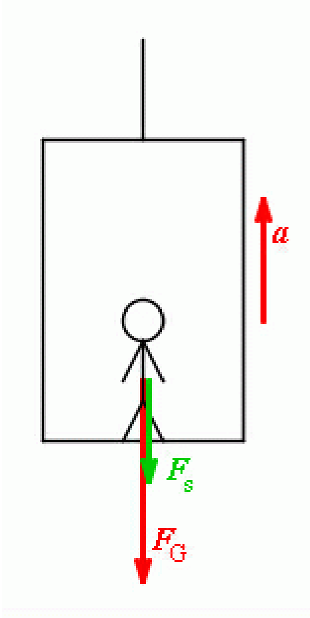
c) zrychleným pohybem směrem dolů se zrychlením 2 m.s^{-2}?

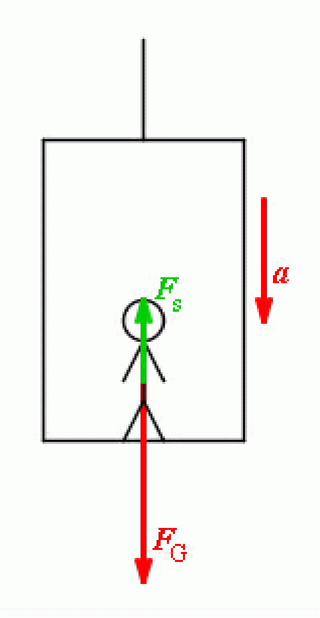
a) Je-li kabina výtahu v klidu, nebo se pohybuje rovnoměrným pohybem, tvoří se zemí inerciální vztažnou soustavu. Na člověka působí pouze jeho tíhová síla $F_G = m\,g$ jak je vidět na Obr.1.3.-22. Touto silou F = 100.9,81 = 981 N působí člověk na podlahu.

b) Při pohybu výtahu nahoru se zrychlením a působí na podlahu jednak tíhová síla člověka F_G, tak setrvačná síla F_s. Tato setrvačná síla má směr opačný než je zrychlení výtahu, směřuje tedy dolů (Obr.1.3.-23). Výsledná síla na podlahu je dána součtem obou sil $F = F_G + F_s = m\,g + m\,a$ = 100.9,81 + 100.2 = 1181 N.

c) Při pohybu výtahu dolů se zrychlením *a* působí na podlahu zase tíhová síla člověka F_G, i setrvačná síla F_s. Tato setrvačná síla má směr opačný než je zrychlení výtahu, tedy v tomto případě směřuje nahoru jak je vidět na Obr.1.3.-24. Výsledná síla na podlahu je teď dána rozdílem obou sil $F = F_G - F_s = m\,g - m\,a = 100.9{,}81 - 100.2 = 781$ N







Obr.1.3.-22 Obr.1.3.-23. Obr.1.3.-24

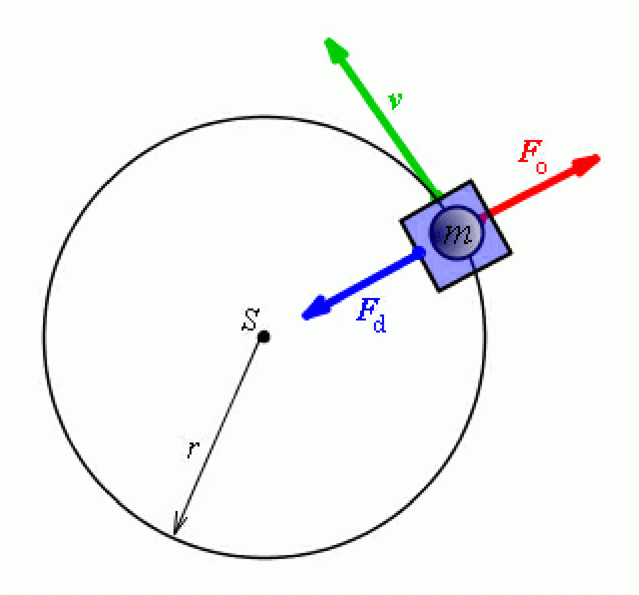
Pokud by se výtah pohyboval se zrychlením $\boldsymbol{a} = -\boldsymbol{g}$ (volným pádem), pak by výsledná síla působící na pasažéra byla nulová. Tímto způsobem je možné simulovat „beztížný stav“.

A ještě s jednou setrvačnou silou se velmi často setkáváte. V předchozí části kapitoly vznikala setrvačná síla při zrychlování nebo zpomalování přímočarého pohybu. Vrátíme se k příkladu tramvaje. Jede-li tramvaj po přímočaré dráze rovnoměrným pohybem a najednou vjede do levotočivé otáčky při nezměněné velikosti rychlosti, jsou cestující vytlačování na pravou stranu tramvaje. Pasažéři jsou podrobeni účinku setrvačné síly, která je důsledkem pohybu po křivočaré trajektorii. Tato setrvačná síla se označuje jako **síla odstředivá**.

Setrvačná odstředivá síla F_o vzniká v neinerciální vztažné soustavě pohybující se po zakřivené trajektorii.

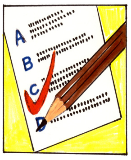
Podívejme se na další příklad – kolotoč. Trajektorií pohybu člověka hmotnosti *m* bude kružnice o poloměru *r*. Pohyb po kružnici je charakterizován dostředivým zrychlením $a_d = \frac{v^2}{r}$, jak jsme si ukázali v kapitole Kinematika. Zakřivení pohybu po kružnici bude způsobeno **dostředivou silou F_d**, kterou si vyjádříme pomocí druhého pohybového zákona ve tvaru $F_d = m\frac{v^2}{r}$. Tato síla bude mířit směrem do středu kružnice (osy kolotoče).

Podle zákona akce a reakce bude akční síla – dostředivá síla působící na sedačku vyvolávat sílu reakční. Tato reakční síla působící na člověka na sedačce bude stejně veliká, stejného směru jako síla akční, ale opačně orientovaná jak je vidět z Obr.1.3.-25. Touto reakční silou je právě setrvačná síla odstředivá. Její velikost si tedy můžeme vyjádřit pomocí velikosti dostředivého zrychlení jako



Obr.1.3.-25

$$F_o = m\frac{v^2}{r}\,.\qquad 1.3.\text{-}9$$



TO 1.3.-21 Inerciální vztažná soustava je taková soustava,

a) v níž platí všechny Newtonovy pohybové zákony

b) která vůči pevnému systému stojí

c) která se vůči pevnému systému pohybuje rovnoměrně přímočaře

d) ve které platí jen zákon setrvačnosti

TO 1.3.-22 Uvažujme čtyři železniční vozy. Vůz 1 stojí v klidu na kolejích, vůz 2 se rozjíždí rovnoměrně zrychleně po přímé trati, vůz 3 jede stálou rychlostí po přímé trati a vůz 4 projíždí kruhovou zatáčkou rovnoměrným pohybem. Vztažnou soustavu spojenou s povrchem Země považujte za inerciální. *Na které vozy působí síly tak, že jejich výslednice je nulová?*

a) jen na 1 b) na 1,2,3 c) na 1,3 d) na 1,3,4

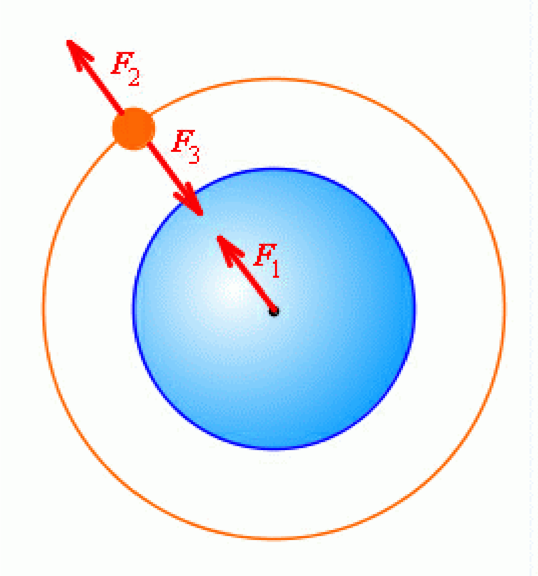
TO 1.3.-23 Uvažujme čtyři železniční vozy. Vůz 1 stojí v klidu na kolejích, vůz 2 se rozjíždí rovnoměrně zrychleně po přímé trati, vůz 3 jede stálou rychlostí po přímé trati a vůz 4 projíždí kruhovou zatáčkou rovnoměrným pohybem. Vztažnou soustavu spojenou s povrchem Země považujte za inerciální. *Na které vozy působí síly tak, že jejich výslednice má stálou nenulovou velikost a stálý směr?*

a) na 2,3 b) jen na 2 c) jen na 3 d) na 2,4

U 1.3.-16 Stacionární družice obíhá kolem Země po kruhové dráze. Na obrázku Obr.1.3.-26 jsou znázorněny tři hlavní síly F_1, F_2 a F_3 působící v této soustavě. *Přiřaďte pojmenovaným silám jejich symbol* z obrázku.

Název síly	*symbol*
odstředivá síla	

síla akce	
síla reakce	
dostředivá síla	



Obr.1.3.-26

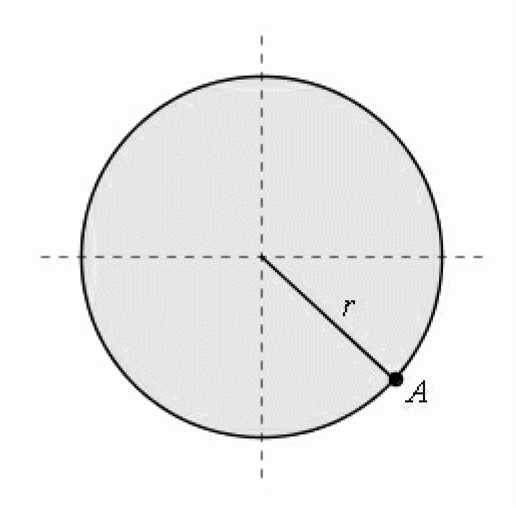
U 1.3.-17 *Proč řidič automobilu při jízdě zatáčkou snižuje rychlost?*

U 1.3.-18 *Proč mají neklopená zatáčky na dálnicích velké poloměry křivosti?*

U 1.3-19 Astronauti používají ve svém výcviku obrovské centrifugy. Centrifuga je takový mohutný kolotoč, ve kterém astronaut v kabině koná kruhový pohyb na dlouhém rameni vysokou rychlostí. *Co vlastně astronauti na tomto zařízení trénují*?

U 1.3.-20 Člověk hmotnosti 80 kg je ve výtahu. Ten se utrhne a padá volným pádem. *Jakou silou působí člověk na podlahu výtahu*?

U 1.3.-21 Kámen hmotnosti *m* je uvázán na provázku délky *l* a roztočen tak, že obíhá po svislé kružnici rychlostí *v* Obr.1.3.-27. *Jakou silou je napínán provázek* a) v horním bodě trajektorie, b) ve spodním bodě trajektorie, c) v bodě A?



Obr.1.3.-27

U 1.3.-22 Klopená zatáčka o poloměru 100 m má vzhledem k vodorovné rovině dostředný sklon 10^{o}. *Jak velkou rychlostí může projet zatáčkou kolo, aby se ještě nepřeklopilo.*

<u>Návod:</u> Uvědomte si, že na kolo působí v zatáčce dvě síly – tíhová a odstředivá síla. Hledaná rychlost musí být taková, aby výslednice těchto dvou sil byla kolmá na rovinu silnice.

1.3.4. Hybnost tělesa a impuls síly.

1. Definovat vektor hybnosti.
2. Definovat impuls síly jako časový účinek síly.
3. Umět odvodit : časový účinek síly = změna hybnosti.
4. Znát zákon zachování hybnosti.
5. Umět využít zákon zachování hybnosti k řešení konkrétních příkladů.

Hybnost

Vraťme se ještě jednou k prvému a druhému Newtonovu pohybovému zákonu. První z nich říká: pokud se těleso hmotnosti *m* pohybuje pohybem rovnoměrným přímočarým rychlostí *v*, pak musíme na něj působit vnější silou *F*, abychom tento stav změnili.

Ze zkušenosti víme, že velikost síly, kterou musíme vynaložit na třeba zastavení běžícího člověka, bude záviset na jeho rychlosti a na jeho hmotnosti. Snáze zastavíme jdoucí dítě, než utíkajícího metrákového chlapa. Čím tedy bude rychlost tělesa větší nebo bude větší jeho hmotnost, tím větší sílu musíme vynaložit.

Zavádí se proto další fyzikální veličina označovaná jako hybnost, beroucí v úvahu obě zmíněné veličiny. Hybností můžeme charakterizovat pohybový stav tělesa.

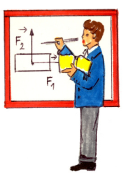
Hybnost tělesa *p* je dána součinem jeho hmotnosti *m* a jeho rychlosti *v*. Je to vektor, který má stejný směr jako okamžitá rychlost.

$$\boldsymbol{p} = m\,\boldsymbol{v}. \qquad 1.3.\text{-}10$$

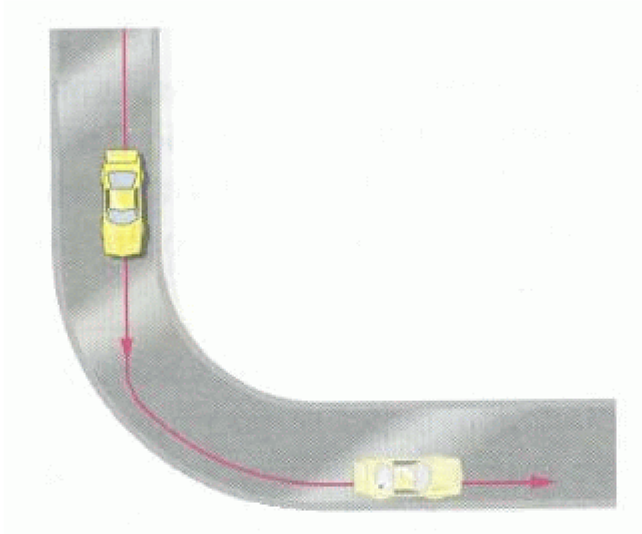
Pokud při změně hybnosti dochází v důsledku **změny směru** rychlosti, pak musíme zapsat vztah pro změnu hybnosti **ve vektorovém tvaru**

$$\Delta\boldsymbol{p} = \int m\,\mathrm{d}\boldsymbol{v} \qquad 1.3.\text{-}11$$

Pro jednotku hybnosti plyne z definičního vztahu kg.m.s^{-1}. Tata jednotka nemá své jméno.



Stanovte graficky změnu hybnosti dětského autíčka hmotnosti m = 1 kg po projetí pravoúhlou zatáčkou viz Obr.1.3.-30. Velikost jeho rychlosti před zatáčkou byla v_1 = 0.4 m.s^{-1}, za zatáčkou v_2 = 0,3 m.s^{-1}.

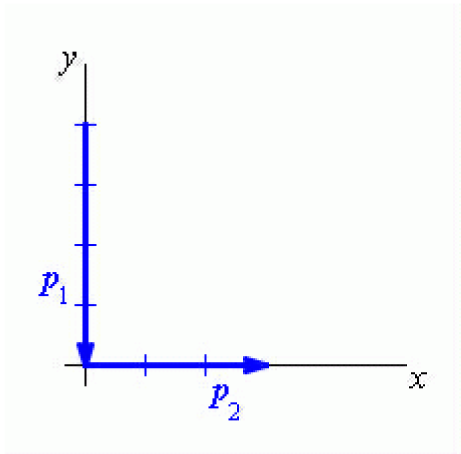


Obr.1.3.-30

Vyjdeme ze vztahu pro změnu vektoru hybnosti, který si upravíme do tvaru

$\Delta \boldsymbol{p} = m\,\boldsymbol{v_2} - m\,\boldsymbol{v_1}$.

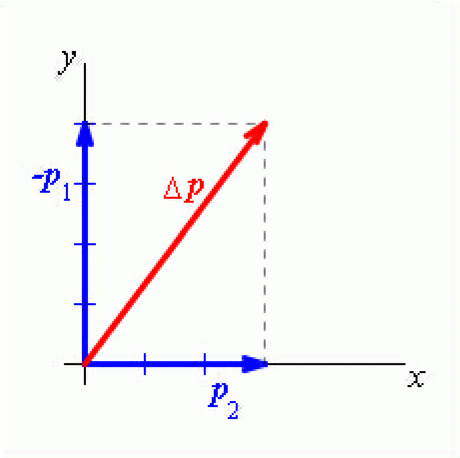
Teď si nakreslete vektorový obrázek hybností. Jedná se o pravoúhlou zatáčku takže hybnost před otáčkou kreslete ve směru osy *y*, za zatáčkou ve směru osy *x*. Svůj náčrt si ověřte na Obr.1.3.-31.



Obr.1.3.-31.

Nyní zakreslete do svého obrázku rozdíl obou vektorů hybnosti $\Delta \boldsymbol{p}$. Pokud se vám nedaří, jedná se o Obr.1.3.-32.

Už na první pohlede je jasné (není problém ověřit výpočtem), že velikost vektoru změny hybnosti $\Delta \boldsymbol{p}$ = 0,5 N.s se liší od **nesprávně počítané** hodnoty $\Delta p = m\,(v_2 - v_1)$ = 0,1 N.s počítané pouze z velikosti vektorů.



Obr.1.3.-32

Zákon zachování hybnosti

Fyzika zná celou řadu zákonů zachování. Jistě si vzpomenete ze střední školy na zákon zachování energie, který budeme probírat později, existuje zákon zachování elektrického náboje atd. My si teď probereme zákon zachování hybnosti.

Představte si, že jste v loďce na klidné hladině rybníka. Hodíte z loďky kámen vodorovným směrem a loďka se s vámi dá do pohybu směrem opačným. Tento pokus se lehce vysvětlí právě zákonem zachování hybnosti.

Představte si staré dělo. Dělo hmotnosti m_1 i koule v něm připravená k výstřelu hmotnosti m_2 jsou v klidu. A teď si vzpomeňte na námořní bitvy korzárů ve filmu. Po výstřelu vyletí dělová koule z hlavně rychlostí v_2 a dělo se začne pohybovat opačným směrem rychlostí v_1. V našem pokusu uvažujme, že na střílící dělo nepůsobí již žádné jiné vnější síly. To znamená, že dělo se bude pohybovat po výstřelu jedním směrem pohybem rovnoměrným přímočarým, náboj poletí opačným směrem také rovnoměrně přímočaře.

Před výstřelem jsou dělo i náboj v klidu. Po dobu výstřelu t působí na dělo síla F_1 a na dělovou kouli síla F_2 . Síla je dána tlakem rozpínajících se plynů v hlavni, působí do doby, než koule opustí hlaveň (t). Podle zákona akce a reakce musí být obě síly stejně veliké, ale opačné orientace $F_1 = F_2$. Tyto síly si můžeme zapsat pomocí Newtonova zákona síly a rovnice bude mít tvar

$m_1 a_1 = m_2 a_2$, nebo po rozepsání zrychlení $m_1 \frac{v_1}{t} = m_2 \frac{v_2}{t}$. Po zkrácení doby t, která je stejná při působení obou sil, dostáváme vztah

$m_1 v_1 = m_2 v_2$.

Hybnosti, které dělo a koule získají, jsou stejně veliké.

Ale hybnost je vektorová veličina, má tedy i svůj směr a orientaci. Jak je vidět na animaci, jsou směry rychlostí koule a děla opačné, budou tedy i hybnosti mít opačný směr

$m_1 \boldsymbol{v}_1 = - m_2 \boldsymbol{v}_2$, nebo

$m_1 \boldsymbol{v}_1 + m_2 \boldsymbol{v}_2 = 0$ 1.3.-12

Tento vztah vyjadřuje **zákon zachování hybnosti .**

Uvedeme-li dvě tělesa z klidu do pohybu jen vzájemným silovým působením, součet jejich hybností je nulový, (tedy stejný jako před uvedením do pohybu).

Možná jste již zakusili působení tohoto zákona zachování na vlastním těle při střelbě z pušky nebo revolveru. Při výstřelu vás pažba „kopne“ do ramene, ruka s revolverem „odskočí“ dozadu. Na stejném principu fungují také reaktivní motory letadel či nosných raket družic, pohybující se medůza atd.

Impuls síly

Již jsme se zmínili, že ke změně hybnosti tělesa $\Delta \boldsymbol{p}$ musíme vždy vynaložit sílu.

Působíme-li větší silou, bude změna hybnosti větší. Je také důležité, jak dlouho tato síla působí. Je zřejmé, že **čím déle bude síla působit, tím větší bude změna hybnosti**.

$\boldsymbol{F} \Delta t = \Delta \boldsymbol{p} = m \Delta \boldsymbol{v}$

Toto je středoškolská formulace impulsu síly $F\Delta t = \Delta p$ a platí pouze v případě kdy působící síla je konstantní v časovém intervalu Δt. Pokud je ovšem síla proměnná, pak musíme přejít od konečného intervalu času Δt k nekonečně malému intervalu dt. V takovémto krátkém čase považujeme sílu za konstantní a pro impuls síly platí

$\boldsymbol{F}\mathrm{d}t = \mathrm{d}\boldsymbol{p}$.

Pokud chceme určit impuls síly a tím i změnu hybnosti v konečném časovém intervalu třeba od času t_o po čas t, pak musíme poslední rovnici integrovat

$$\int_{t_o}^{t} \boldsymbol{F}\mathrm{d}t = \int_{p_o}^{p} \mathrm{d}\boldsymbol{p} . \qquad 1.3.\text{-}13$$

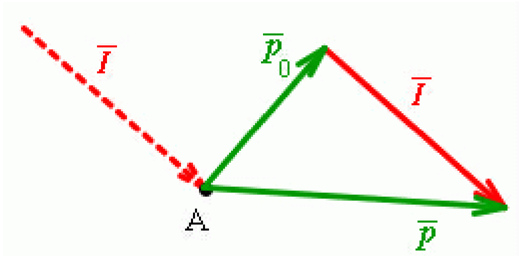
Rovnici si upravíme. Levá strana představuje **impuls síly** $\boldsymbol{I}$, pravou stranu si vypočítáme pro případ konstantní hmotnosti m = konst.

$$\boldsymbol{I} = \int_{t_o}^{t} \boldsymbol{F}\mathrm{d}t = m\boldsymbol{v} - m\boldsymbol{v}_o \qquad 1.3.\text{-}14$$

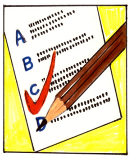
Časový účinek síly (impuls síly) působící na objekt způsobí změnu jeho hybnosti.

Impuls síly je vektor a jeho jednotkou je newton sekunda (N.s = kg.m.s^{-1}).

Na obrázku Obr.1.3.-33 vidíte jak vektor impulsu síly souvisí se změnou vektoru hybnosti.



Obr.1.3.-33



TO 1.3.-24 . *Jaký směr bude mít změna rychlosti* ve srovnání se směrem působící síly.

TO 1.3.-25 Impuls síly $\boldsymbol{I} = \boldsymbol{F}\, t$. *Tato definice*

a) neplatí nikdy
b) platí pouze za jistých podmínek
c) platí vždy

TO 1.3.-26 *Která ze sil vyvolá větší změnu hybnosti*. F_1 = 50 N působící po dobu 0,02 s, nebo F_2 = 1 N působící po dobu 1 s?

U 1.3.-23 *Proč někdy drží i více hasičů proudnici, ze které prudce stříká voda*?

U 1.3-24 *Jak velkou silou* udeřil hokejista do stojícího kotouče o hmotnosti 200 g, jestliže kotouč nabyl rychlosti 90 km/hod? Doba působení nárazové síly byla 0,01 s.

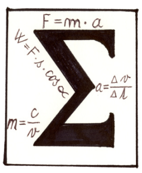
U 1.3.-25 Střela hmotnosti 20 g proletěla hlavní za 0,01 s a nabyla rychlosti 800 m/s. *Jak velké rychlosti nabyla puška* hmotnosti 5 kg při zpětném nárazu?

U 1.3.-26 Signální raketa o hmotnosti 50 g vystřelí 5 g plynů v jednom směru a raketa tím nabude rychlosti 30 m/s. *Jaká je rychlost vystřelených plynů?*

U 1.3.-27 Síla, působící na těleso, vzrůstá podle vztahu $F = 10 + 2t$ (N,s). *Jaký impuls* udělí tato síla tělesu od druhé do třetí sekundy ? I =

U 1.3.-28 Na těleso působí síla $F = 4t - 1$ (N,s). *Oč se změní hybnost tělesa* za první dvě sekundy pohybu ? Δp =

U 1.3.-29 Dělová koule hmotnosti 10 kg opouští hlaveň rychlostí 600 m/s. Pohyb náboje v hlavni trval 0,01 s. *Jak velká průměrná síla působila* v hlavni na náboj ? F =



1. **Síla není příčinou pohybu**, ale **způsobuje jeho změnu.**

2. Síla se projevuje vždy **při vzájemném působení** dvou těles

- přímým kontaktem,
- na dálku prostřednictvím silových polí.

3. Účinky sil mohou být

- statické,
- dynamické,
- posuvné
- otáčivé.

4. Hmotnost *m* charakterizuje setrvačné vlastnosti tělesa.

5. Síla je **vektorová veličina** určená velikostí, směrem, orinetací a působištěm. Jednotkou je newton 1N = kg.m.s^{-2}.

6. **1. Newtonův pohybový zákon – zákon setrvačnosti:** Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, dokud není vnějšími silami donuceno tento stav změnit.

7. **2. Newtonův pohybový zákon – zákon síly**: Zrychlení *a*, které uděluje síla *F* tělesu o hmotnosti *m*, je přímo úměrné velikost této síly a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa. $a = \frac{F}{m}$.

Síla působící na hmotný objekt způsobí změnu jeho hybnosti $\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}$

- Při působení více sil na těleso je musíme **sčítat vektorovým součtem**.
- Síla, která způsobuje volný pád tělesa se označuje jako **tíhová síla** a je dána tíhovým zrychlením $F_G = m\,g$.
- Tíhová síla, kterou působí těleso na vodorovnou podložku je **tíha tělesa** G.

8. **Odporové síly** působí proti směru pohybu tělesa a brzdí jeho pohyb.

- **Třecí síla** F_t je přímo úměrná tlakové síle F_n a součiniteli smykového tření *f*. $F_t = f\,F_n$.
- **Odporová síla valivého odporu** F_v je přímo úměrná kolmé tlakové síle F_n působící na podložku, ramenu valivého odporu ξ a nepřímo úměrná poloměru *R* tělesa. $F_v = \xi \frac{F_n}{R}$.

9. **3. Newtonův pohybový zákon – zákon akce a reakce**: Síly, kterými na sebe působí dvě tělesa jsou stejně veliké, navzájem opačné orientace a vznikají a zanikají současně.

10. Newtonovy pohybové zákony platí v **inerciálních** neboli setrvačných vztažných soustavách.

11. Sílu, která vzniká v důsledku zrychleného pohybu vztažné soustavy nazýváme **setrvačná síla** F_s.

12. **Setrvačná odstředivá síla** F_o vzniká v neinerciální vztažné soustavě pohybující se po zakřivené trajektorii.

13. Zakřivení pohybu po kružnici způsobuje **dostředivá síla** $F_d = m\frac{v^2}{r}$.

14. **Hybnost tělesa** $\boldsymbol{p}$ je dána součinem jeho hmotnosti *m* a jeho rychlosti. $\boldsymbol{p} = m\,\boldsymbol{v}$.

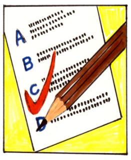
15. Změna hybnosti je dán vektorovou rovnicí $\Delta \boldsymbol{p} = \int m \mathrm{d}\boldsymbol{v}$

16. **Zákon zachování hybnosti**: Uvedeme-li dvě tělesa z klidu do pohybu jen vzájemným silovým působením, součet jejich hybností je nulový, tedy stejný jako před uvedením do pohybu. $m_1 \boldsymbol{v}_1 + m_2 \boldsymbol{v}_2 = 0$.

17. Součin síly $\boldsymbol{F}$ působící po dobu Δt na těleso je **impuls síly** $\boldsymbol{I}$. Impuls síly způsobí změnu hybnosti tělesa. Impuls síly je vektor a jeho jednotkou je newton sekunda (N.s).

$$\boldsymbol{I} = \int_{t_o}^{t} \boldsymbol{F} \mathrm{d}t = m\boldsymbol{v} - m\boldsymbol{v}_o .$$

Klíč



TO 1.3.-1. Při klopýtnutí se nohy zastaví, ale těleso setrvačností pokračuje v pohybu. Při uklouznutí naopak se pohybují nohy dopředu a tělo zůstává v původním pomalejším pohybu.

TO 1.3.-2. Posádka auta setrvačností pokračuje v pohybu v původním směru.

TO 1.3.-3. Obojí bezpečnostní prvky mají za úkol zabrzdit pohyb osoby dopředu při čelním nárazu auta na překážku. Pohyb dopředu je způsoben setrvačností při náhlém zpomalení auta.

TO 1.3.-4. c

TO 1.3.-5. a

TO 1.3.-6. b, vyjdeme z druhého Newtonova zákona

TO 1.3.-7. a) dvojnásobné, b) poloviční , vyjdeme z druhého Newtonova zákona

TO.1.3.-8. c)

TO.1.3.-9 d)

TO.1.3.-10. a), e)

TO.1.3.-11 c)

TO 1.3.-12 a)

TO 1.3.-13 a)

TO 1.3.-14 981 N, 981/6 N

TO 1.3.-15 Tíha je stejná jak plyne z její definice

TO.1.3-16 461 N. Protože pohyb je rovnoměrný, výsledná síla působící na těleso je nulová. Síla, kterou působí dělník se musí rovnat odporové síle smykového tření.

TO 1.3.-17 a

TO 1.3.-18 a

TO 1.3.-19 c

TO 1.3.-20 a

TO 1.3.-21 a, b, c

TO 1.3.-22 c

TO 1.3.-23 b

U 1.3.-1. Vzájemné odpuzování, nebo přitahování dvou nábojů (elektrické pole), gravitační pole Země, magnetické pole v dutině cívky, kterou prochází proud,...

U 1.3.-2. $\boldsymbol{F_3}$, $\boldsymbol{F_1}$, $\boldsymbol{F_2}$

U 1.3.-3. 1) pořadí je a), d), c), b), 2) pořadí je stejné

U 1.3.-4. 10 m.s^{-1}, 2,4 kN . Pro výpočet brzdné síly podle zákona síly potřebujeme znát zpoždění pohybu *a*. Vrátíme se proto ke kinematice. Napíšeme si vztah pro uraženou dráhu automobilem do zastavení $s = -\frac{1}{2} a\, t^2 + v_o\, t$ a vztah pro konečnou rychlost (je nulová) $v = -a\, t + v_o$. Řešením obou rovnic dostaneme vztah pro dráhu $s = \frac{1}{2} v_o t$. Čas známe, uraženou dráhu také, takže můžeme po dosazení vypočítat hledanou počáteční rychlost.

Z rovnice pro konečnou rychlost $0 = -a\, t + v_o$ po dosazení vypočítané počáteční rychlosti vypočítáme zpoždění pohybu (2 m.s^{-2}). Při známé hmotnosti auta dosazením do zákona síly vypočítáme brzdící sílu.

U 1.3.-5. 7,5 kN, 125 m. Vycházíme ze stejných rovnic jako v předešlé úloze. Jenom je třeba si dát pozor na převod rychlosti do jednotky soustavy SI.

U 1.3.-6 $4t + 3$ (N,s). Nejdříve určíme rovnici zrychlení jako časovou derivaci rovnice pro rychlost a pak vynásobíme hmotností.

U 1.3.-7 $t^2 - 0{,}5t$

U 1.3.-8 14 m/s Určíme rovnici pro rychlost v závislosti na čase a pak určíme rychlost v čase 4 s.

U 1.3. -9 statická odporová síla smykového tření je podstatně větší než odporová síla valivého odporu

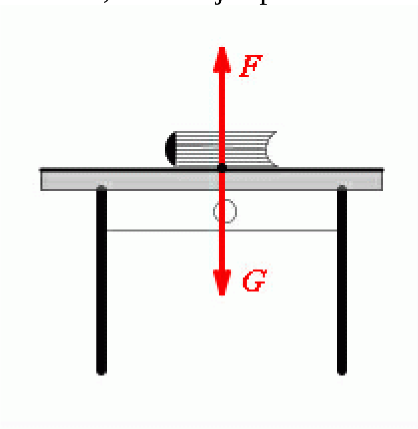
U 1.3.-10 0,17. Mezný součinitel smykového tření odpovídá třecí síle, která je právě tak velká jako je setrvačná síla působící na bednu při brzdění auta. Stanovte si proto ze změny rychlosti Δv zpoždění *a* auta. Z tohoto zpoždění vypočítejte brzdnou sílu a ta musí být rovna třecí síle. Z této rovnice pak stanovíte součinitel smykového tření *f*.

U 1.3.-11 98,1/24,5. Aby se bedna pohybovala rovnoměrným pohybem, musí být výsledná síla, která na ní působí rovna nule. Jinak řečeno, musíme působit silou rovnou odporové síle. V případě smykového tření bude síla $F_t = f\, m\, g$ = 0,2.50.9,81 = 98,1 N. V případě valení bude odporová síla F_v = 0,005.50.9,81/0,1 = 24,5 N.

U 1.3.-12. tgα

U 1.3.-13. 0,01

U 1.3.-14 Vysvětlení poskytuje Obr.1.3.-21. Síly akce a reakce vznikají a zanikají současně. Proto není podstatné, kterou označíme jako sílu akce či reakce. Obyčejně se označuje za sílu akce ta, která je příčinou vzniku reakce. V našem případě to tedy bude tíha knihy.



Obr.1.3.-21

U 1.3.-15 **Neruší**, síly akce a reakce **působí každá na jiné těleso.**

U 1.3.-16

Název síly	*symbol*
odstředivá síla	F_2
síla akce	F_3 (F_1)
síla reakce	F_1 (F_3)
dostředivá síla	F_3

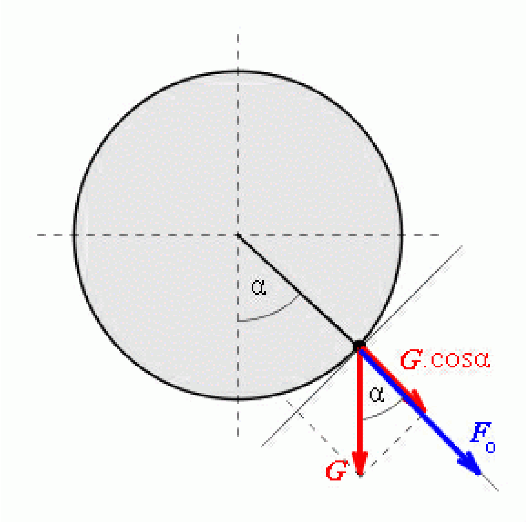
U 1.3.-17 snižuje velikost odstředivé síly

U 1.3.-18 sníží se velikost odstředivé síly

U 1.3.-19 Přetížení při startu kosmické lodi. Loď se pohybuje s obrovským zrychlením, astronauté vlivem setrvační síly jsou „zamáčknuti“ do sedadel.

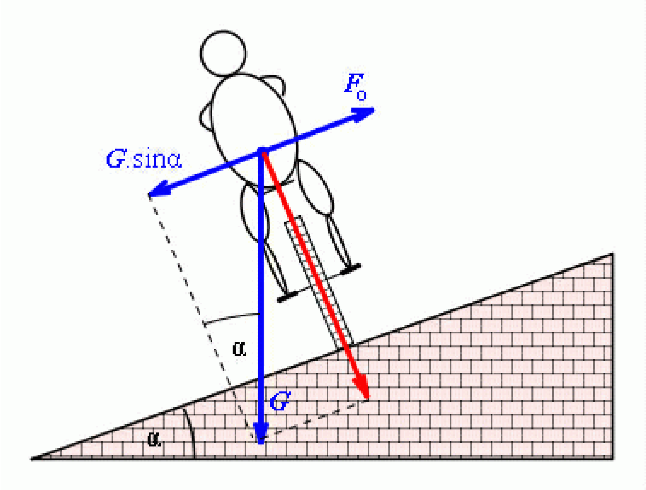
U 1.3.-20. 0 N

U 1.3.-21. a) $m\,v^2/l - m\,g$, b) $m\,v^2/l + m\,g$, c) $m\,v^2/l + m\,g\cos\alpha$. Uvědomte si, že na kámen působí jednak odstředivá síla, ta je ve všech případech stejná. Působí ale také tíhová síla, která v případu a) má opačný směr než odstředivá síla, v případu b) má směr stejný. V případu c) pak ve směru odstředivé síly působí jen složka tíhové síly jak ukazuje Obr.1.3.-28



Obr.1.3.-28

U 1.3.-22 47 km/h. Nejdříve si nakreslete obrázek nakloněné roviny pod úhlem $\alpha = 10^o$. Raději si úhel nakreslete větší, ať je obrázek přehlednější. Do obrázku zakreslete směr tíhy kola *G*. Pak vyznačte směr odstředivé síly F_o. Ta musí být vykompenzována složkou tíhy v opačném směru. Výslednice sil *G* a F_o musí být kolmá na rovinu dráhy (aby cyklista nespadl). Bude platit rovnice $m\frac{v^2}{r} = m\, g \sin\alpha$. Z té pak vypočítáte hledanou rychlost. Pokud si nevíte rady s obrázkem mát ho na Obr.1.3.-29



Obr.1.3.-29

TO 1.3.-24 směr bude stejný. Z matematického hlediska násobíme vektor $\Delta \boldsymbol{v}$ reálným číslem *m*.

TO 1.3.-25 b)

TO 1.3.-26 Stejné. Impuls síly bude v obou případech stejný 50.0,02 = 1.1 .

U 1.3.-23 Platí zákon zachování hybnosti. Hybnost vody je velká díky vysoké rychlosti stříkající vody.

U 1.3.-24 500 N. Vyjdeme ze vztahu pro impuls síly. Změna rychlosti bude $\Delta v = v - 0$. Pozor na jednotky rychlosti.

U 1.3.-25 3,2 m.s^{-1}. To odpovídá asi 12 km/h. Počítáme ze zákona zachování hybnosti. Nehledejte jak uplatnit údaj o čase za který prolétla střela hlavní. Je nadbytečný.

U 1.3.-26 300 m.s^{-1}. Počítáme ze zákona zachování hybnosti.

U 1.3.-27 15 N.s

U 1.3.-28 6 kg.m.s^{-1}

U 1.3.-29 6.10^5 N