Jiří Vlček

STŘEDOŠKOLSKÁ FYZIKA

mechanika
termika
optika
atomová fyzika
kmitání
akustika
astrofyzika

Jiří Vlček

Středoškolská fyzika

Praha 2003

Obsah

Úvod

Tato publikace seznamuje studenty s mechanikou, termikou, optikou, jadernou fyzikou, teorií kmitání, akustikou na středoškolské úrovni. Snažil jsem se o shrnutí všech základních poznatků z tohoto oboru při zachování stručnosti, přehlednosti a rozumného rozsahu publikace.

Protože mám při kreslení obrázků určitá technická omezení, prosím čtenáře o pochopení. Elektrotechniku, která je rovněž součástí fyziky, jsem zpracoval a dal k dispozici na své internetové stránky. Případně ji doporučuji studovat z mojí publikace Základy elektrotechniky.

1 Mechanika

Kinematika – nauka o pohybu

Pohyb je základní vlastností hmoty, neexistuje těleso, které by bylo v absolutním klidu. O klidu nebo pohybu tělesa rozhodujeme porovnáváním jeho polohy vzhledem k okolním tělesům. Např. cestující letící v letadle je vzhledem k letadlu v klidu, ale vzhledem k zemskému povrchu se pohybuje.

Klid a pohyb tělesa jsou relativní (relativní = vztažný, poměrný). Při popisu pohybů ve fyzice si volíme nějaké těleso, o kterém předpokládáme, že je v klidu, a vzhledem k němu posuzujeme pohyby ostatních těles. Jestliže zvolíme **jeden bod tělesa za počáteční** (počátek) a zvolíme **tři osy** jím procházející, dostaneme **soustavu souřadnic.** Vzhledem k této soustavě pak určujeme polohu a pohyb ostatních těles. Proto se tato soustava nazývá **vztažná soutava.** Nejčastěji budeme používat pravoúhlou vztažnou soustavu spojenou se Zemí, o které budeme předpokládat, že je v klidu. Otáčení Země okolo její osy a pohyb Země okolo Slunce nebudeme uvažovat, čímž se popis pohybů těles zjednoduší.

Pohyb skutečných těles je složitý a jejich fyzikální popis není jednoduchý. Každý pohyb brzdí tření (např. odpor vody brzdí pohyb lodě). Tření pneumatik o vozovku umožňuje pohyb auta, ale současně třetí v ložiscích kol, v převodovce a na jiných místech pohyb brzdí. Abychom následující úvahy o pohybu skutečných těles co nejvíce zjednodušili, nahradíme pohyb skutečných těles pohybem jejich modelu, který se nazývá **hmotný bod a má zanedbatelné rozměry.**

Křivka spojující jednotlivé polohy hmotného bodu, které postupně zaujímal při pohybu, se nazývá **trajektorie** hmotného bodu. Trajektorií hmotného bodu padajícího volným pádem je úsečka. Trajektorie Země obíhající okolo Slunce má tvar elipsy. **Podle tvaru trajektorie rozdělujeme pohyby na přímočaré a křivočaré.** Zvláštním případem křivočarého pohybu je **pohyb po kružnici.**

Délka trajektorie, po které se hmotný bod určitý čas pohybuje, se nazývá **dráha.** Jestliže řekneme, že těleso vykonalo dráhu 1 m, nevypovídáme nic o tvaru trajektorie, po které se se těleso pohybovalo, udáváme jen délku úseku trajektorie, který za tento čas přešlo. V tomto smyslu **je dráha fyzikální veličina.**

ROVNOMĚRNÝM POHYBEM nazýváme pohyb, při němž pohybující se těleso vykoná v libovolných, ale stejných časových intervalech stejné dráhy.

Různé rovnoměrné pohyby srovnáváme např. podle dráhy, kterou vykonají tělesa za jednu sekundu. Jestliže vykoná těleso za čas ***t*** dráhu ***s,*** potom podíl ***s/t*** určuje **velikost rychlosti** v pohybujícího se tělesa ***v = s/t.***

Jednotkou **rychlosti je metr za sekundu** (m . s^{-1}). **1 metr za sekundu je rychlost rovnoměrného pohybu, při kterém se za 1 sekundu vykoná dráha 1 metru. Velikost rychlosti rovnoměrného pohybu je konstantní, s časem se nemění.** Píšeme v = konst.

Příklad: Běžec uběhl dráhu 10 km za 40 min. Vypočítejte jeho rychlost za předpokladu, že běžel rovnoměrným pohybem.

s = 10 000 m   t = 40 . 60 = 2 400 s
v = s/t = 4,166 m/s = 4,166 . 3600/1000 = 15 km/hod

V praxi se používají i jiné jednotky rychlosti. Rychlost automobilu se udává v **km/hod.**
Z definičního vztahu pro velikost rychlosti rovnoměrného pohybu můžeme vypočítat dráhu vykonanou tělesem rovnoměrným pohybem **s = v . t.**

Z tohoto vztahu vyplývá, že dráha s rovnoměrného pohybu je přímo úměrná času **t**, po který se těleso pohybuje. Konstantou úměrnosti je velikost rychlosti ***v***.

Příklad: Chodec jde rychlostí 5 km/hod po dobu 1 hod 20 minut. Kolik km ujde? Jaká je jeho rychlost v m/s?

s = 5 . 4/3 = 20/3 = 6,66 km   v = 5 . 1000/3600 = 1,39 m/s

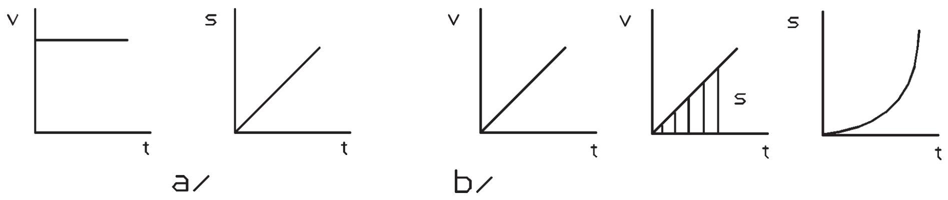
Nerovnoměrný pohyb tělesa zpravidla nahrazujeme rovnoměrným pohybem, jehož dráha a doba trvání jsou stejné jako při skutečném nerovnoměrném pohybu tělesa. Průměrnou rychlost v_p nerovnoměrného pohybu v daném úseku trajektorie vypočítáme jako podíl dráhy **s** a příslušného časového intervalu ***t,*** za který těleso vykonalo dráhu ***s.***

$$\mathbf{v_p = s/t}$$

Příklad: Cyklista ujel za 2 minuty 500 m. Jaká je jeho průměrná rychlost?

v = 500/120 m/s = 4,2 m/s   nebo   v = 0,5/(2/60) = 15 km/hod

Chceme-li zjistit rychlost tělesa v určitém místě jeho trajektorie, zvolíme v okolí tohoto místa její malý úsek. Z délky tohoto úseku trajektorie, dráhy ***s*** a krátkého časového intervalu ***t,*** za který těleso zvolený úsek trajektorie projelo, vypočítáme průměrnou rychlost v_p tělesa na tomto úseku. Čím menší úsek trajektorie zvolíme, tím méně změn rychlosti můžeme předpokládat. Proto se vypočítaná hodnota rychlosti bude víc přibližovat ke skutečné hodnotě rychlosti tělesa na zvoleném místě trajektorie, k **okamžité rychlosti** tělesa.



Obr. 1.1
a) Rovnoměrný pohyb
b) Rovnoměrně zrychlený pohyb (vyšrafovaná plocha = dráha rovnoměrně zrychleného pohybu)

Nejjednodušší nerovnoměrný pohyb je **POHYB ROVNOMĚRNĚ ZRYCHLENÝ.** Přibližně rovnoměrně zrychlený pohyb koná lyžař rozjíždějící se z kopce, volně padající těleso, rozjíždějící se vlak.

Pohyb těchto těles brzdí odporová síla, jejíž velikost se zvětšuje s rychlostí tělesa. Proto se rovnoměrně zrychlený pohyb tělesa po určité době změní v rovnoměrný pohyb, i když na těleso bude stále působit konstantní tahová síla. Aby popis pohybů těles byl jednodušší, nebudeme prozatím o vlivu brzdicích sil uvažovat.

Rozjíždí-li se těleso z klidu, znamená to, že v čase $t = 0$ s je počáteční rychlost $v = 0$. Potom je rychlost tělesa pohybujícího se rovnoměrně zrychleným pohybem přímo úměrná času **v = at.**

Konstanta úměrnosti ***a*** se nazývá velikost **zrychlení** rovnoměrně zrychleného pohybu. Platí pro ni **a = v/t.**

Jednotkou zrychlení je **metr za sekundu na druhou** ($m \cdot s^{-2}$).

1 metr za sekundu na druhou je zrychlení rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu, jehož rychlost se za 1 sekundu zvětší o 1 metr za sekundu.

Velikost zrychlení rovnoměrně zrychleného pohybu je konstantní, s časem se nemění, což zapisujeme ***a*** = konst.

Vzorem pro výpočet dráhy rovnoměrně zrychleného pohybu odvodíme ze závislosti ***v = f (t).*** Dráha se rovná ploše trojúhelníku v tomto grafu.

$$s = a \cdot t^2/2$$

Dráha rovnoměrně zrychleného pohybu roste přímo úměrně s druhou mocninou času. Grafem **závislosti dráhy** rovnoměrně zrychleného pohybu **na čase je část paraboly.**

Příklad: Vlak se rozjíždí rovnoměrně zrychleně a za dobu t = 125 s dosáhne rychlosti v = 90 km . h^{-1}. Vypočítejte zrychlení vlaku a dráhu, kterou vykonal během rozjíždění.

$v = 90\ km \cdot h^{-1} = 25\ m \cdot s^{-1}$ (90 000/3 600) m/s
$a = v/t = 25\ m \cdot s^{-1} : 125\ s = 0{,}2\ m \cdot s^{-2}$

Na daném místě Země padají ve vakuu všechna tělesa se stejným zrychlením. Zrychlení **volného pádu** se nazývá **tíhová zrychlení** a označuje se ***g.*** Vztahy pro rychlost a dráhu volného pádu píšeme ve tvaru

$v = g \, . \, t$, $s = g \, . \, t^2/2$

(Pokud kámen padá rychleji než papír, způsobuje to odpor vzduchu. Ve vakuu by jejich rychlost byla stejná.)

Velikost tíhového zrychlení není na Zemi všude stejná, zvětšuje se od rovníku k pólům. Na rovníku má hodnotu 9,78 m . s^{-2}, na pólech 9,83 m . s^{-2}. Dohodou byla stanovena hodnota tzv. **normálního tíhového zrychlení g_n = 9,806 65 m . s^{-2},** která se přibližně rovná tíhovému zrychlení na 45. rovnoběžce při hladině moře.

Příklad: Jak dlouho trvá volný pád z výšky 50 m? Jak velkou rychlost má dopadající předmět?

$t = \sqrt{(2s/g)} = \sqrt{(50 \, . \, 2/10)} = 10$ s $v = 10 \, . \, 10 = 100$ m/s   (g_n počítáme 10)

Příklad: Jak hluboká je propast, do které padá volně puštěný kámen 4 s? Odpor vzduchu zanedbejte.

$s = gt^2/2 = 10 \, . \, 4^2/2 = 80$ m $v = 10 \, . \, 4 = 40$ m/s

V obou případech jsme zanedbali odpor vzduchu, skutečná rychlost je ve skutečnosti nižší.

Vektorové veličiny

Fyzikální veličiny rozdělujeme na **skaláry** a **vektory.** Skalární veličiny jsou např. hmotnost, hustota, teplota, objem, elektrický odpor, energie, práce. **Skalární veličina je jednoznačně určená číselnou hodnotou a jednotkou.**

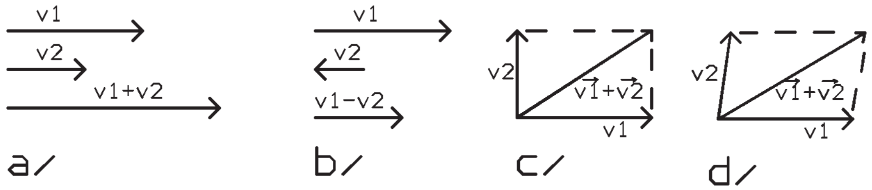
Vektorové veličiny jsou např. rychlost, zrychlení, síla, moment síly. **Vektorová veličina je jednoznačně určená působištěm, velikostí, jednotkou a směrem.** Vektory zobrazujeme **orientovanou úsečkou,** jejíž **délka je úměrná velikosti vektoru.**

V tisku se vektory označují polotučnými písmeny, např. **v** (rychlost), **F** (síla). V textu psaném rukou je označujeme šípkou nad značkou veličiny. Jestliže chceme vyjádřit pouze velikost vektoru, píšeme značku veličiny bez šipky, např. ***v, F.***

Při počítání s vektory platí jiná pravidla než při počítání s čísly. Vysvětlíme to na skládání rychlosti.

Ze zkušenosti víme, že loď plovoucí napříč řeky je unášena proudem a koná současně dva pohyby. Veslař uděluje loďce vzhledem k stojící vodě rychlost **u(vektor),** kolmou na břeh. Proud řeky ji unáší vzhledem k břehu rychlostí **v(vektor).** Loď se pohybuje přes řeku vzhledem k břehu výslednou rychlostí **w(vektor).**

Všimněte si, jak závisí výsledek vektorového součtu na velikosti úhlu, který svírají vektory **u(vektor)** a **v(vektor).** Jestliže svírají vektory **u(vektor)** a **v(vektor)** úhel **0°,** velikost výslednice se rovná **algebraickému součtu** jejich velikosti, jestliže svírají úhel **180°,** velikost výslednice se rovná **algebraickému rozdílu** jejich velikostí. Algebraické sčítání a odčítání vektorových veličin je zvláštní případ vektorového sčítání. Jsou-li **u** a **v** na sebe kolmé bude $\mathbf{w}^2 = \mathbf{u}^2 + \mathbf{v}^2$.



Obr. 1.2 Skládání rychlostí (vektorových veličin)
a) stejný směr, b) opačný směr, c) vektory vzájemně kolmé, d) obecný případ

***Příklad*: Jakou výslednou rychlostí dopadne parašutista na zem, jestliže klesá se stálou rychlostí 5 m . s^{-1} a a vítr fouká vodorovným směrem rychlostí 3 m . s^{-1}? Úlohu řešte výpočtem i graficky.

$v = \sqrt{(5^2 + 3^2} = \sqrt{(25 + 9)} = 6$ m . s^{-1}

Příklad: Motorový člun se pohybuje vzhledem ke klidné vodě rychlostí 10 m/s. Proud řeky ho unáší rychlostí 2 m/s. Určete výslednou rychlost člunu vzhledem k břehu, jestliže pluje

a) po proudu	$v = 10 + 2 = 12$ m/s,
b) proti proudu	$v = 10 - 2 = 8$ m/s
c) kolmo na směr proudu	$v = \sqrt{(10^2 + 2^2)} = 10{,}2$ m/s

Příklad: Kulička pohybující se rovnoměrným přímočarým pohybem $v_1 = 0{,}2$ m/s po stole se dostane na hranu stolu a začne padat na zem z výšky h = 80 cm. Jak daleko od hrany stolu dopadne (viz *obr. 1.3b*)?

Oba pohyby, rovnoměrný přímočarý pohyb ve směru vodorovném a volný pád ve směru svislém $v = g\ .\ t$ se skládají. Kulička se pohybuje po parabolické trajektorii a rychlost jejího pohybu je rovna vektorovému součtu obou rychlostí. Doba volného pádu kuličky bude $t = \sqrt{(2h/g)} = 0{,}4$ s. Kulička dopadne na zem ve vzdálenosti $s = v_1$, $t = 0{,}4\ .\ 0{,}2 = 0{,}08$ m od paty kolmice vedené z hrany stolu k podlaze. Její okamžitou rychlost vypočítáme podle vztahu $v = \sqrt{(v_1^{\ 2} + (gt)^2)}$. Rychlost při dopadu bude $v = \sqrt{(0{,}2^2 + (10\ .\ 4)^2)} = 0{,}447$ m/s.

Rovnoměrný pohyb po kružnici

Na *obr. 1.3a* je znázorněný pohyb hmotného bodu po kružnici a poloměru ***r.*** Za čas ***t*** se hmotný bod dostane z bodu *A* do bodu *B*, projde dráhu ***s***, která se rovná délce oblouku *AB*. Spojnice *OA, OB* se nazývají **průvodiče** hmotného bodu.

Při pohybu hmotného bodu z bodu *A* do bodu *B* se jeho průvodič otočí o středový úhel φ **= s/r.** Úhel φ se nazývá také **úhlová dráha** hmotného bodu. Délku oblouku (dráhu s vykonanou hmotným bodem) můžeme potom vyjádřit vztahem **s = rφ.**

Velikost úhlu (rovinného úhlu) dosazujeme do tohoto a dalších vztahů v obloukové míře v **radiánech.** Tabulku na převod velikosti úhlů ze stupňové do obloukové míry najdete v tabulkách. Platí:

$360° = 2\pi$ rad = 6,28 rad (obvod kruhu = $2\pi r$)
1 rad = $360/2\pi = 57{,}296°$

Hmotný bod koná rovnoměrný pohyb po kružnici, jestliže ve stejných, libovolně zvolených časových intervalech opíše stejné oblouky *s*, kterým přísluší stejné středové úhly φ.

Velikost rychlosti rovnoměrného pohybu hmotného bodu po kružnici určíme jako podíl přírůstku dráhy ***s*** a příslušného času ***t.***

$\mathbf{v = s/t}$

Velikost rychlosti rovnoměrného pohybu hmotného bodu po kružnici je stálá, ale její vektor se s časem mění. **V každém bodě** trajektorie (kružnice) má **směr tečny,** je **kolmý na** průvodič – na **poloměr kružnice** (jiskry odletují od brusného kotouče ve směru tečny – ve směru vektorů rychlosti).

Pohyb hmotného bodu po kružnici můžeme popsat také pomocí veličiny **úhlová rychlost,** kterou označujeme φ (omega). Velikost úhlové rychlosti φ rovnoměrného pohybu hmotného bodu po kružnici určíme jako podíl přírůstku středového úhlu $\nabla\varphi$ (přírůstku úhlové dráhy) a příslušného času ***t.***

$\omega = \nabla\varphi/\nabla \mathbf{t}$.

Jednotkou úhlové rychlosti je **radián za sekundu** (rad . s^{-1}). **1 radián za sekundu je úhlová rychlost rovnoměrného pohybu po kružnici, při kterém se za 1 sekundu vykoná dráha 1 radiánu.**

Ve všech výpočtech budeme vyjadřovat jednotku úhlové rychlosti radián za sekundu v základních jednotkách SI.

Mezi rychlostí hmotného bodu pohybujícího se po kružnici a jeho úhlovou rychlostí platí vztahy

$\boldsymbol{\omega = \varphi/t = s/(r/t) = s \,.\, t/r = v/r} \qquad \boldsymbol{v = \omega r}$

Čas potřebný na jeden oběh hmotného bodu po kružnici ($s = 2\pi r$; $\varphi = 2\pi$) se nazývá **oběžná doba *T*** nebo **perioda.** Vyjadřujeme ji v sekundách. Počet oběhů hmotného bodu po kružnici za jednu sekundu se nazývá **FREKVENCE *f.*** Mezi frekvencí ***f*** a oběžnou dobou ***T*** platí vztahy

$\mathbf{f = 1/T} \qquad \mathbf{T = 1/f}$

Jednotkou frekvence je **hertz** (Hz; čti herc); **1 Hz = 1 s^{-1}. Hmotný bod obíhá po kružnici s frekvencí 1 hertz, jestliže vykoná 1 oběh za 1 sekundu.**

Vyjádřete rychlost *v* a úhlovou rychlost ω hmotného bodu, pohybujícího se rovnoměrně po kružnici, pomocí frekvence ***f*** a oběžné doby ***T***

$s = f \,.\, 2\pi \,.\, r \,.\, t \qquad \varphi = s/r \qquad \omega = \varphi/t \qquad \boldsymbol{\omega = 2\pi f = 2\pi/T}$

Dynamika

Dynamika je část mechaniky, která zkoumá zákonitosti pohybu tělesa z hlediska jeho příčin. Základ dynamiky tvoří tři **Newtony pohybové zákony.**

Příčinou změny pohybu tělesa je jeho vzájemné působení s jinými tělesy. Sílu chápeme jako míru vzájemného působení těles.

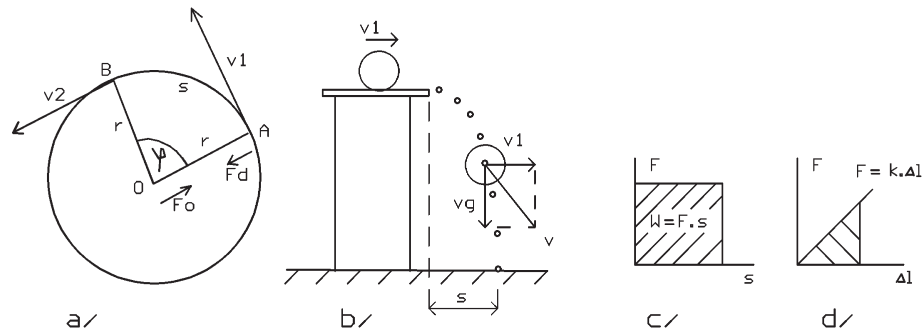
Víme ze zkušenosti, že válec položený na vodorovné podložce se sám od sebe nezačne pohybovat. Do pohybu ho může uvést pouze jiné těleso, např. ho postrčíme rukou.

Jestliže uvedeme do pohybu po vodorovné podložce kuličku, pozorujeme, že si směr pohybu zachovává, pohybuje se po přímé trajektorii. Aby se změnil směr jejího pohybu, směr její rychlosti, musí na ni působit jiné těleso, např. nějaká překážka.

Také velikost rychlosti kuličky pohybující se po přímce se zmenšuje působením tření o podložku a podporu vzduchu. Můžeme soudit, že v případě úplného odstranění tření a odporu vzduchu by se kulička pohybovala rovnoměrným přímočarým pohybem stále, nezastavila by se. Tyto zkušenosti jsou shrnuty **v PRVNÍM NEWTONOVĚ POHYBOVÉM ZÁKONU.**

Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není přinuceno tento stav změnit působením jiných těles.

Vlastnost těles setrvávat v původním stavu (v klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu), se nazývá **SETRVAČNOST tělesa.** Setrvačnost na sobě pozorujeme např. při rozjíždění autobusu, kdy se nakláníme proti směru jízdy (setrváváme v klidu), nebo při brzdění, kdy se nakláníme ve směru jízdy (setrváváme v rovnoměrném pohybu).



Obr. 1.3
a) Rovnoměrný pohyb hmotného bodu po kružnici
b) Pád kuličky ze stolu – skládání rychlostí
c) Diagram práce
d) Energie pružiny

Druhý Newtonův pohybový zákon

Změna pohybového stavu tělesa, vyjádřená zrychlením tělesa, je přímo úměrná síle, která působí na těleso, a nepřímo úměrná hmotnosti tělesa.

Matematicky jej můžeme zapsat vztahy

$\mathbf{a = F/m}$ $\qquad\qquad$ $\mathbf{F = m \cdot a}$

nebo ve vektorovém tvaru

$\mathbf{F = ma}$

Sílu působící na těleso lze vyjádřit součinem hmotnosti tělesa a zrychlení, které mu uděluje. **Vektor zrychlení tělesa má stejný směr jako vektor působící síly.**

Z druhého Newtonova pohybového zákona definujeme **jednotku síly newton (N). 1 newton je síla, která volnému hmotnému bodu o hmotnosti 1 kilogram udělí zrychlení 1 metr za sekundu na druhou;** $1\ N = 1\ kg \cdot m \cdot s^{-2}$.

Příklad: Vlak o hmotnosti 300 t se rozjíždí po vodorovné trati se zrychlením $0{,}25\ m \cdot s^{-2}$. Jak velká je tažná síla lokomotivy?

$F = 300\,000 \cdot 0{,}25 = 75\,000\ N$

Příklad: Osobní automobil o hmotnosti 1 000 kg se působením tažné síly motoru 1 500 N rozjíždí po vodorovné cestě. Vypočítejte zrychlení automobilu. [$1{,}5\ m \cdot s^{-2}$]

Základním fyzikálním údajem o tělesech a částicích je jejich **hmotnost. Hmotnost tělesa nezávisí na jeho poloze vzhledem k Zemi, na jeho skupenství, teplotě nebo na tom, zda je zelektrizované, či zmagnetizované.**

Na těleso na povrchu Země působí **gravitační síla F_g** a **síla odstředivá**, která souvisí s otáčením Země okolo její osy. Výslednicí těchto sil je **tíhová síla,** kterou označujeme $\mathbf{F_G}$. Na pólech, kde se účinek otáčení Země neprojevuje, se tíhová a gravitační síla navzájem rovnají. Směrem od pólu k rovníku se velikost tíhové síly působící na dané těleso zmenšuje, odstředivá síla se vektorově sčítá s gravitační silou. Na rovníku působí obě síly opačným směrem, od gravitační síly se odečítá odstředivá síla.

Tíhová síla F_G je síla, kterou je těleso na daném místě zemského povrchu přitahováno k Zemi. Volnému tělesu uděluje tíhová síla tíhové zrychlení **g.** Podle druhého Newtonova pohybového zákona můžeme velikost tíhové síly vyjádřil vztahem $\mathbf{F_G = mg}$.

Velikost tíhové síly působící na dané těleso je přímo úměrná jeho hmotnosti. **Na tomtéž místě Země jsou tělesa stejné hmotnosti přitahovaná k Zemi stejnou tíhovou silou.** Tento poznatek se využívá při **vážení.** Jestliže je na váhách rovnováha, má vážené těleso stejnou hmotnost jako závaží.

Působiště tíhové síly umísťujeme do **těžiště tělesa.** Jestliže je těleso položené na vodorovné podložce, tíhová síla na něj působící se projeví jako **tlaková síla,** kterou působí těleso na podložku. Těleso zavěšené např. na laně napíná závěs **tahovou silou,** která se rovná tíhové síle působící na těleso. Je-li těleso zavěšené na pružině, tíhová síla působící na těleso napíná pružinu, dokud nenastane rovnováha se silou pružnosti pružiny.

Jestliže se těleso pohybuje po podložce, působí na ně **brzdicí síla** proti směru pohybu tělesa (proti směru vektoru rychlosti tělesa). Brzdicí síla je **třecí síla** (síla tření). Můžeme ji měřit **siloměrem.** Taháme-li těleso spojené se siloměrem po podložce rovnoměrným přímočarým pohybem, je třecí síla F_t v rovnováze s takovou silou, jejíž velikost odčítáme na siloměru.

Měřením se můžeme přesvědčit, že **třecí síla F_t je přímo úměrná tlakové síle F_n,** kterou působí těleso kolmo na podložku.

$$\mathbf{F_t = f \, . \, F_n}$$

Konstanta úměrnosti ***f*** se nazývá **součinitel smykového tření.** Jeho velikost závisí na materiálu tělesa a podložky a na drsnosti styčných ploch. Hodnoty součinitele smykového tření pro různé látky jsou uvedeny v tabulkách. Součinitel smykového tření je poměrná veličina, a proto nemá jednotku.

Víte ze zkušenosti, že na uvedení tělesa z klidu do pohybu je nutné vynaložit větší sílu než na udržení tělesa v rovnoměrném pohybu. Pro dvě daná tělesa má součinitel klidové tření f_o vždy větší hodnotu než součinitel smykového tření f.

Příklad: Vypočítejte, jakou hmotnost má přibližně kmen, vlečený traktorem po vodorovné cestě silou 10 kN, jestliže průměrná velikost součinitele vlečného tření je 0,5.

Fg = 10 000/0,5 = 20 000 N   m = Fg/g = 2 000 kg
(normálová síla se v tomto případě rovná tíhové síle)

Zákon zachování hybnosti platí i tehdy, jestliže se součet hybnosti na začátku nerovná nule. V tomto případě ho můžeme vyjádřit slovy: **Vzájemným silovým působením těles, která tvoří izolovanou soustavu, se součet jejich hybností nemění, je konstantní.**

Inerciální a neinerciální vztažné soustavy

Na vozíček položíme kuličku a uvedeme ho do zrychleného pohybu. Pozorujeme, že se kulička pohybuje opačným směrem než vozík. Ve vztažné soustavě spojené s vozíkem má kulička zrychlení, ačkoliv na ni nepůsobí žádné těleso. Z toho vyplývá, že ve vztažné soustavě spojené s rozjíždějícím se vozíkem neplatí první Newtonův pohybový zákon.

Vztažná soustava, ve které platí první Newtonův zákon, se nazývá inerciální (z lat. inertia = setrvačnost). Vztažná soustava spojená se Zemí není pro všechny pohyby v ní probíhající inerciální. Velmi přesnou realizací inerciální vztažné soustavy je soustava spojená se Sluncem. Země se v heliocentrické vztažné soustavě pohybuje okolo Slunce a otáčí se okolo své osy. Pohybuje se zrychleně, proto každá **vztažná soustava** spojená se Zemí je **neinerciální.** Zrychlení bodů na povrchu Země způsobené jejími pohyby je však v porovnání s tíhovým zrychlením malé, prakticky pod hladinou citlivosti měřicích přístrojů. Proto **při většině zkoumaných jevů můžeme vztažnou soustavu spojenou se Zemí považovat za inerciální.**

Příkladem neinerciálních vztažných soustav je vztažné soustavy spojené např. se startujícím letadlem, rozjíždějícím se vlakem apod.

Vztažná soustava spojená s vlakem je neinerciální, protože vlak se při rozjíždění, při brzdění anebo při zatáčení nepohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem. Pozorovatel v autobuse, který neví, že autobus se pohybuje, vysvětlí jev takto: Cestující se pohybují zrychleným pohybem směrem dozadu, respektive dopředu. To znamená, že na cestující působí nějaká síla, pro kterou platí **F(vektor)$_s$ = ma(vektor),** kde ***m*** je hmotnost cestujícího.

Sílu **F$_s$** nazýváme **setrvačná síla.** Zrychlení cestujícího má opačný směr oproti zrychlení vlaku ve vztažné soustavě spojené se Zemí. Ale nebylo vyvolané působením jiného tělesa. Je způsobené neinerciální vztažnou soustavou. Setrvačná síla tedy nemá původ ve vzájemném působení těles.

Jestliže řešíme úlohy v neinerciální soustavě, musíme k silám, kterými působí na dané těleso jiná tělesa, přidat ještě setrvačnou sílu. Setrvačná síla má opačný směr, než je směr zrychlení vztažné soustavy.

Příklad: Člověk o hmotnosti 80 kg stojí ve výtahu, který se pohybuje vzhůru se zrychlením 0,6 m . s^{-1}. Jakou tlakovou silou působí člověk na podlahu kabiny výtahu? Za tíhové zrychlení dosaďte

10 m . s^{-2}. F = m . (a + g) = 80 . 10,6 = 848 N

Příklad: Ocelové lano se přetrhne silou 5 000 N. S jakým největším zrychlením je možné zdvíhat předmět o hmotnosti 200 kg zavěšený na laně, aby se nepřetrhlo. Za tíhové zrychlení dosaďte

10 m . s^{-1}. a + g = F/m = 5 000/200 = 25 m . s^{-2} a = 15 ms^{-2}

Energie, práce, výkon

S veličinami práce a energie jste se seznámili už na základní škole. **Těleso koná mechanickou práci, jestliže působí silou na jiné těleso a přemísťuje ho po určité dráze.** Mechanická práce je skalární veličina a označuje se *W.*

Jestliže působí na dané těleso ve směru jeho pohybu stálá síla *F* a posune ho o délku *s,* vykoná mechanickou práci W = F . s.

Pokud svírá stálá síla ***F*** se směrem pohybu tělesa úhel α**,** způsobuje pohyb tělesa jen složka síly **F$_1$ = F cos** α působící ve směru pohybu tělesa. Práci vypočítáme ze vztahu

W = F$_1$s nebo **W = Fs cos** α

Jednotkou práce je **joule** (J). **1 joule** (čti: džaul) **je práce, kterou vykoná stálá síla 1 newtonu, působící po dráze 1 metru ve směru síly. 1 J** = 1 N .1 m = **1 kg . m^2 . s^{-2}.**

Velikost mechanické práce můžeme znázornit výše uvedeným (*obr. 1.3*) diagramem práce. Práce *W* se číselně rovná obsahu vyšrafovaného obrazce.

Víme ze zkušenosti, že např. pohybující se koule nárazem posune lehkou kostku umístěnou na podložce. **Pohybující se těleso má kinetickou** (pohybovou) **energii.** Koule nárazem uvedla kostku do pohybu a vykonala určitou práci. Kostka získala kinetickou energii.

Velikost kinetické energie tělesa měříme prací, která byla vykonána na uvedení tělesa z klidu do pohybu. Vztah pro výpočet velikosti kinetické energie odvodíme jednoduchou úvahou.

Předpokládáme, že těleso o hmotnosti ***m*** je v klidu. Jeho kinetická energie je nulová. Na těleso začne působit stálá síla **F.** Síla **F** působí ve směru pohybu, uvede těleso do