

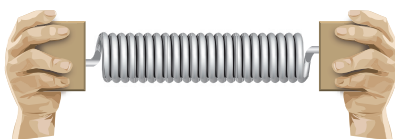
3.3. Energia mechaniczna.

Rodzaje energii mechanicznej

Dwa lub więcej oddziałujących wzajemnie ciał nazywamy **układem ciał**. Siły wzajemnego oddziaływania na siebie ciał tworzących układ są **siłami wewnętrznymi w tym układzie**. Siły, które pochodzą spoza układu, to **siły zewnętrzne**.

Jeśli np. trzymamy w ręce klocek na pewnej wysokości h nad Ziemią, to w układzie Ziemia – klocek siła, którą nasza ręka działa na ten klocek, jest siłą zewnętrzną, a siła przyciągania ziemskiego jest siłą wewnętrzną.

Jeśli układem ciał są dwa klocki i ściśnięta między nimi sprężyna (rys. 3.7), to siła, którą sprężyna działa na klocki, jest siłą wewnętrzną w układzie, a siły, którymi nasze ręce działają na klocki, a także siła przyciągania ziemskiego, są siłami zewnętrznymi.



Rys. 3.7

Klocek podniesiony na wysokość h spadając, może wykonać pracę, np. stłuc leżące na stole jajko, a odepchnięte przez sprężynę klocki mogą wprowadzić w ruch inne, leżące w pobliżu przedmioty.

Mówimy, że układ posiada **energię mechaniczną**, jeśli może wykonać pracę.

Aby układ uzyskał taką energię, należało wcześniej, działając siłą zewnętrzną (czyli pochodzącą spoza układu), wykonać pracę, np. podnieść klocek na wysokość h lub ścisnąć sprężynę. W pierwszym przypadku zmieniliśmy **energię potencjalną ciężkości**, w drugim – **energię potencjalną sprężystości**¹. Zmiana obu tych rodzajów energii mechanicznej wiąże się ze **zmianą wzajemnych położeń ciał tworzących układ**.

Energia mechaniczna może się także zmieniać wtedy, gdy zmienia się prędkość ciała. Wprawiając ciało w ruch lub zmieniając jego prędkość, zmieniamy **energię kinetyczną** ciała.

¹ Ten rodzaj energii poznasz w drugiej części podręcznika *Z fizyką w przyszłość*.

Zmiana energii mechanicznej układu ciał jest równa pracy siły zewnętrznej $\vec{F}_z$ wykonanej nad układem.

$$\Delta E_{\text{mech.}} = W_z \quad (3.4)$$

Z powyższego wzoru wynika, że jednostką energii w SI jest 1 J.

Jeśli w danej chwili znamy położenia i prędkości ciał tworzących układ, mówimy, że znamy **stan układu ciał**. Jeśli zmieni się położenie lub prędkość choćby jednego ciała wchodzącego w skład układu, zmieni się stan tego układu.

Zmiany energii mechanicznej wiążą się ze zmianą stanu układu ciał. Jeśli zmieniła się energia mechaniczna, to musiał się zmienić stan układu.

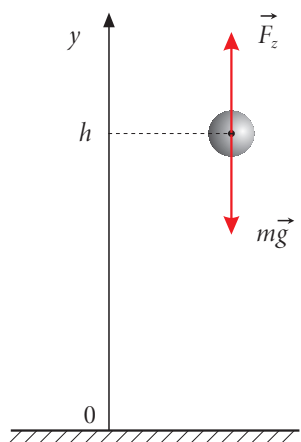
Energia potencjalna grawitacyjna

Zmiana wzajemnego położenia ciał, które oddziałują siłami grawitacji lub sprężystości, prowadzi zawsze do zmiany **energii potencjalnej**. W przypadku oddziaływania grawitacyjnego zmiana odległości ciała od Ziemi powoduje zmianę grawitacyjnej energii potencjalnej układu Ziemia – ciało, a w przypadku oddziaływania sprężystego zmiana kształtu, czyli odkształcenie np. sprężyny, jest przyczyną zmiany energii potencjalnej sprężystości układu klocków.

Jeśli podnosimy klocek na pewną wysokość ruchem jednostajnym, stan układu Ziemia – klocek zmienia się tylko przez zmianę wzajemnego położenia ciał tworzących układ. Prędkość klocka jest wówczas stała. Siła zewnętrzna, którą w takim przypadku działamy na klocek, równoważy siłę wzajemnego oddziaływania klocka i Ziemi (siłę ciężkości). Tak więc:

Zmiana energii potencjalnej układu ciał jest równa pracy siły zewnętrznej równoważącej w każdym punkcie siłę wzajemnego oddziaływania ciał (siłę wewnętrzną).

$$\Delta E_p = W_{\text{siły zewnętrznej równoważącej siłę wewnętrzną}} = W_{z,r} \quad (3.5)$$



Rys. 3.8

Obliczmy pracę wykonaną przy podnoszeniu ciała ruchem jednostajnym na niewielką wysokość h (rys. 3.8).

$$W_{z,r} = F_z h \cos 0^\circ = mgh$$

Praca ta jest równa przyrostowi energii potencjalnej układu Ziemia – ciało, lub inaczej mówiąc: energii potencjalnej ciała oddziałującego z Ziemią. Zwykle przyjmuje się, że w położeniu początkowym (dolnym) jego energia potencjalna wynosi zero, więc energia końcowa (na wysokości h) jest równa

$$\Delta E_p = W_z = E_p - 0 = mgh$$

skąd

$$E_p = mgh \quad (3.6)$$

Człowiek podnoszący kamień z ziemi przyjmuje, że energia potencjalna kamienia na ziemi jest równa zero. Człowiek mieszkający na drugim piętrze i podnoszący teczkę z podłogi przyjmie, że energia potencjalna teczki jest równa zero na podłodze.

Przy opuszczaniu ciała z pewnej wysokości na poziom „zerowy” praca wykonana przez siłę $\vec{F}_{z,r}$ jest ujemna (siła zwrócona w górę, a przemieszczenie $\Delta \vec{r}$ w dół)

$$W_{z,r} = F_{z,r} h \cos 180^\circ = -mgh$$

zatem energia potencjalna maleje.

Obliczmy dla takiego przypadku pracę siły ciężkości, a więc pracę W_w siły wewnętrznej w układzie Ziemia – ciało.

$$W_w = W_{\text{graw.}} = mgh \cos 0^\circ = mgh$$

Zatem

$$W_{z,r} = -W_w \quad (3.7)$$

Otrzymany związek między pracą siły zewnętrznej równoważącej siłę wewnętrzną $W_{z,r}$ i pracą siły wewnętrznej W_w jest bardzo ważny. Bywają bowiem przypadki, gdy na ciało nie działają siły zewnętrzne, a energia potencjalna układu ulega zmianie. Tak jest np. podczas swobodnego spadania, gdy na spadające ciało działa tylko siła ciężkości, a więc siła wewnętrzna w układzie Ziemia – ciało. Zmianę energii potencjalnej możemy wówczas obliczyć, podstawiając do wzoru (3.5) uzyskany wyżej związek (3.7).

Zmiana energii potencjalnej układu dwóch ciał jest równa pracy siły wewnętrznej wziętej ze znakiem minus.

$$\Delta E_p = -W_w \quad (3.8)$$

Energia kinetyczna

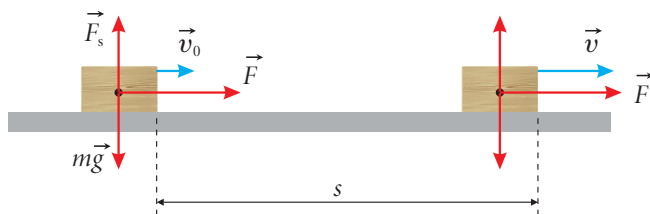
Tak jak ze zmianą położenia ciała wiąże się zmiana jego energii potencjalnej względem innego ciała, z którym tworzy ono układ, tak ze zmianą prędkości ciała jest związana zmiana energii kinetycznej.

Energia kinetyczna ciała zmienia się wówczas, gdy działające na nie siły nie równoważą się, a ich wypadkowa nadaje ciału przyspieszenie, a więc zmienia jego prędkość.

Zmiana energii kinetycznej ciała jest równa pracy siły wypadkowej (sumy sił: wewnętrznej i zewnętrznej) działającej na to ciało.

$$\Delta E_k = W_{F_{\text{wyp.}}} \quad (3.9)$$

Założmy, że na poruszające się ciało działa stała siła wypadkowa $\vec{F}_{\text{wyp.}}$. Prędkość początkowa ciała jest równa $\vec{v}_0$ (rys. 3.9). Ciało to porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.



Rys. 3.9

$$W_{F_{\text{wyp}}} = Fs \cos 0^\circ = ma \left(v_0 t + \frac{at^2}{2} \right)$$

Po wstawieniu $a = \frac{v - v_0}{t}$ i wykonaniu przekształceń otrzymujemy:

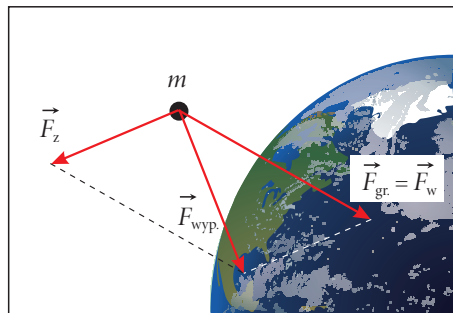
$$\Delta E_k = W_{F_{\text{wyp.}}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = E_{\text{kinetyczna w końcowym stanie}} - E_{\text{kinetyczna w początkowym stanie}}$$

Tak więc (jeśli dla $v_0 = 0$, $E_k = 0$) energia kinetyczna ciała poruszającego się z szybkością v wyraża się wzorem

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

3.4. Zasada zachowania energii mechanicznej

Rozważmy obecnie następujący problem. W pewnej odległości od Ziemi znajduje się ciało o masie m (rys. 3.10).



Rys. 3.10

Siła przyciągania ziemskiego $\vec{F}_{gr.}$ to siła wewnętrzna w układzie Ziemia – ciało. Załóżmy, że na ciało działa także dowolna siła zewnętrzna $\vec{F}_z$. Sumując obie siły, otrzymujemy siłę wypadkową $\vec{F}_{wyp.}$.

Praca siły wypadkowej przy niewielkim przemieszczeniu $\Delta\vec{r}$ jest równa:

$$\begin{aligned} W_{F_{wyp.}} &= \vec{F}_{wyp.} \cdot \Delta\vec{r} = (\vec{F}_z + \vec{F}_w) \cdot \Delta\vec{r} = \\ &= \vec{F}_z \cdot \Delta\vec{r} + \vec{F}_w \cdot \Delta\vec{r} \end{aligned}$$

Zmiana energii kinetycznej ciała jest równa tej pracy (wzór 3.9)

$$W_{F_{wyp.}} = \Delta E_k$$

Praca siły zewnętrznej równa jest zmianie całkowitej energii mechanicznej układu (wzór 3.4).

$$\vec{F}_z \cdot \Delta\vec{r} = \Delta E_{mech.}$$

Natomiast praca siły wewnętrznej jest równa zmianie energii potencjalnej ze znakiem minus (wzór 3.8)

$$\vec{F}_w \cdot \Delta\vec{r} = -\Delta E_p$$

Zatem

$$\Delta E_k = \Delta E_{\text{mech.}} - \Delta E_p$$

Stąd

$$\Delta E_{\text{mech.}} = \Delta E_p + \Delta E_k \quad (3.10)$$

Zmiana energii mechanicznej jest równa sumie zmian energii kinetycznej i potencjalnej, a energia mechaniczna jest sumą obu tych energii.

Zauważ, że jeśli $\Delta E_p = 0$, to $\Delta E_{\text{mech.}} = \Delta E_k$, a jeśli $\Delta E_k = 0$, to $\Delta E_{\text{mech.}} = \Delta E_p$.

Zadajmy obecnie pytanie bardzo ważne dla naszych rozważań:

Kiedy energia mechaniczna jest zachowana (nie zmienia się)?

Powyższe pytanie można sformułować inaczej: Kiedy zmiana energii mechanicznej jest równa zero ($\Delta E_{\text{mech.}} = 0$)?

Odpowiedź jest nam znana: **energia mechaniczna układu ciał nie zmienia się, gdy siły zewnętrzne nie wykonują pracy nad tym układem.**

$$W_z = 0$$

Wówczas

$$\left(E_{\text{kinetyczna w stanie końcowym}} - E_{\text{kinetyczna w stanie początkowym}} \right) + \left(E_{\text{potencjalna w stanie końcowym}} - E_{\text{potencjalna w stanie początkowym}} \right) = 0$$

lub

$$E_{\text{kinetyczna w stanie końcowym}} + E_{\text{potencjalna w stanie końcowym}} = E_{\text{kinetyczna w stanie początkowym}} + E_{\text{potencjalna w stanie początkowym}} \quad (3.11)$$

Korzystając z definicji pracy stałej siły (3.2), można łatwo zauważyć, że praca siły zewnętrznej działającej na rozważane ciało układu jest równa zero, gdy:

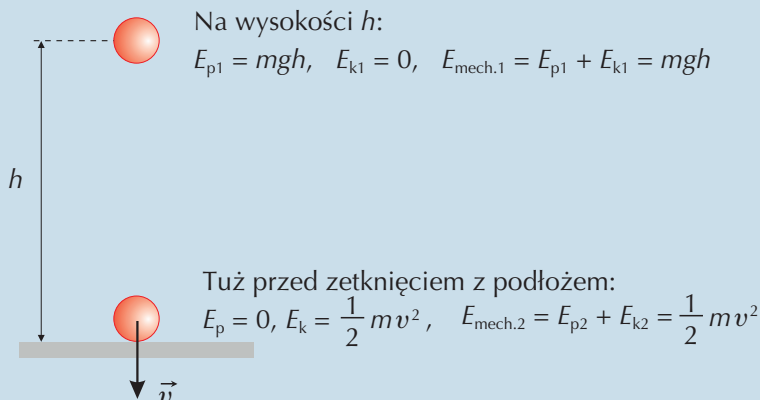
- $\vec{F}_z = \vec{0}$, nie działa siła zewnętrzna;
- $\Delta \vec{r} = \vec{0}$, ciało nie ulega przemieszczeniu;
- $\cos \alpha = 0$, siła zewnętrzna działa, ale jest prostopadła do przemieszczenia.

Pierwszą z wyżej przedstawionych możliwości zilustrujemy na przykładzie swobodnie spadającego ciała (przykład 3.2).

Przykład 3.2

Układ kulka – Ziemia; spadanie kulki

Przeanalizujemy ruch kulki spadającej swobodnie. Kulka tworzy z Ziemią układ ciał oddziałujących grawitacyjnie. Siła ciężkości jest więc w tym układzie siłą wewnętrzną.



Rys. 3.11

Na kulkę nie działają siły zewnętrzne, bo spada swobodnie, bez oporu. Skoro $F_z = 0$, więc $W_z = 0$, więc $\Delta E_{\text{mech}} = 0$, czyli

$$E_{\text{mech},2} = E_{\text{mech},1}$$

Zatem

$$\frac{mv^2}{2} = mgh$$

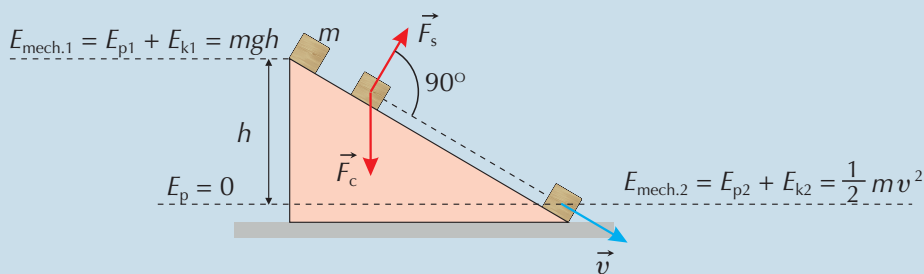
Podobne rozumowanie można przeprowadzić dla wszystkich rodzajów ruchu, w których na ciało działa jedynie siła ciężkości, np. rzutów, o których mówiliśmy w paragrafach 1.3 i 1.4.

Trzeci z wymienionych wyżej przypadków, w których siła zewnętrzna nie wykonuje pracy ($\cos \alpha = 0$), zilustrujemy na dwóch przykładach.

Przykład 3.3

Układ klocek – Ziemia; ruch klocka po gładkiej² równi

Przeanalizujemy zsuwanie klocka o masie m po bardzo gładkiej równi pochyłej (rys. 3.12).



Rys. 3.12

Przyjmijmy, że układ ciał tworzą tylko Ziemia i klocek oddziałujące wzajemnie siłami grawitacji. W tym układzie ciężar ciała $\vec{F}_c$ jest siłą wewnętrzną, a siła sprężystości równi $\vec{F}_s$ siłą zewnętrzną (jej źródłem jest nienależąca do układu równia). Ruch klocka odbywa się wzdłuż równi, więc kąt między siłą zewnętrzną i przemieszczeniem wynosi 90° , a $\cos 90^\circ = 0$. Praca siły zewnętrznej jest równa zero.

Energia mechaniczna układu Ziemia – klocek jest zachowana.

$$E_{\text{mech},1} = E_{\text{mech},2}$$

czyli

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$

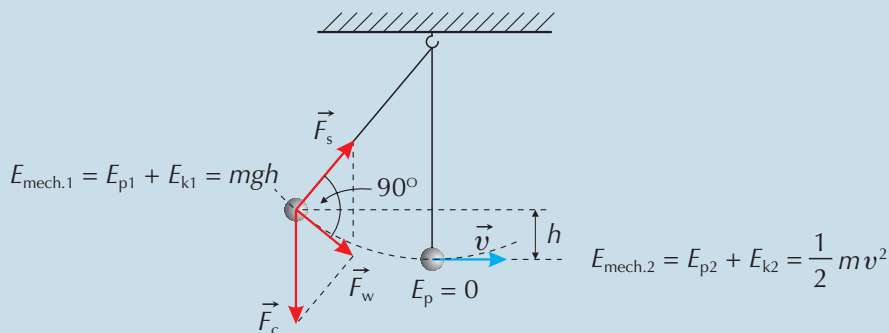
Otrzymany wynik wskazuje, że wszystkie ciała zsuwające się (z pomijalnie małym tarcie) z równi pochyłych o takich samych wysokościach (niezależnie od kąta nachylenia do poziomu) uzyskują u podstawy taką samą szybkość równą szybkości, którą uzyskalyby, spadając swobodnie z wysokości h .

² Stwierdzenie, że równia jest bardzo gładka, oznacza, że można pominąć tarcie między równią i ciałem zsuwającym się po równi.

Przykład 3.4

Układ kulka wahadła – Ziemia; ruch kulki wahadła

Przeanalizujemy ruch kulki zawieszanej na nitce i wychylonej tak, że znajduje się ona na wysokości h nad najniższym możliwym położeniem, czyli położeniem równowagi (rys. 3.13).



Rys. 3.13

W układzie Ziemia – kulka siła ciężkości kulki $\vec{F}_c$ jest siłą wewnętrzną, a siła sprężystości nitki ($\vec{F}_s$) siłą zewnętrzną. W każdym punkcie toru przemieszczenie $\Delta \vec{r}$ jest prostopadłe do siły $\vec{F}_s$, więc praca siły sprężystości jest równa zero.

Energia mechaniczna układu kulka – Ziemia nie zmienia się, czyli całkowita energia mechaniczna w położeniu początkowym jest równa całkowitej energii mechanicznej kulki przy przechodzeniu przez najniższe położenie.

$$E_{\text{mech},1} = E_{\text{mech},2}$$

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$

Także i w tym przypadku szybkość kulki przy przechodzeniu przez położenie równowagi jest równa szybkości, którą uzyskaby kulka, spadając swobodnie z wysokości h .

Wszystkie nasze rozważania dotyczyły układów ciał oddziałujących siłami zależnymi tylko od położenia tych ciał, a nie np. od ich prędkości. Takie siły nazywamy **siłami zachowawczymi**. Dotąd wprowadziliśmy dwie takie siły: grawitacji i sprężystości.

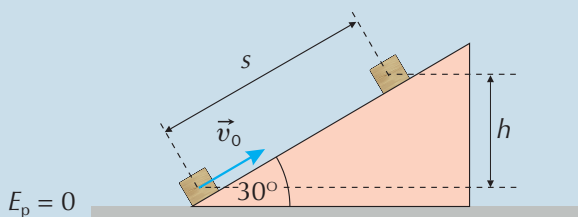
Ostatecznie **zasadę zachowania energii** sformułujemy więc następująco:

Jeśli na układ ciał oddziałujących wzajemnie siłami zachowawczymi nie działają siły zewnętrzne lub działają, ale nie wykonują pracy, to energia mechaniczna układu jest zachowana.

Przykład 3.5

Ruch w górę równi (bez tarcia)

Obliczmy wartość prędkości, którą nadano klockowi znajdującemu się u podnóża gładkiej równi pochyłej nachylonej do poziomu pod kątem 30° , jeśli przebył wzdłuż równi drogę 1,6 m aż do zatrzymania.



Rys. 3.14

W chwili początkowej całkowita energia mechaniczna ciała jest równa tylko energii kinetycznej ($E_p = 0$). Na wysokości h ciało zatrzymało się, więc $E_k = 0$, a $E_p = mgh$. Podczas ruchu energia mechaniczna układu Ziemia – ciało jest zachowana ($T = 0$, bo założyliśmy, że równia jest gładka), więc

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh$$

Z rysunku 3.14 wynika, że

$$\frac{h}{s} = \sin \alpha \quad \Rightarrow \quad h = s \cdot \sin \alpha$$

Po wstawieniu do równania wyrażającego zasadę zachowania energii otrzymujemy

$$\frac{1}{2}v_0^2 = gs \cdot \sin \alpha \quad \text{skąd} \quad v_0 = \sqrt{2gs \cdot \sin \alpha}$$

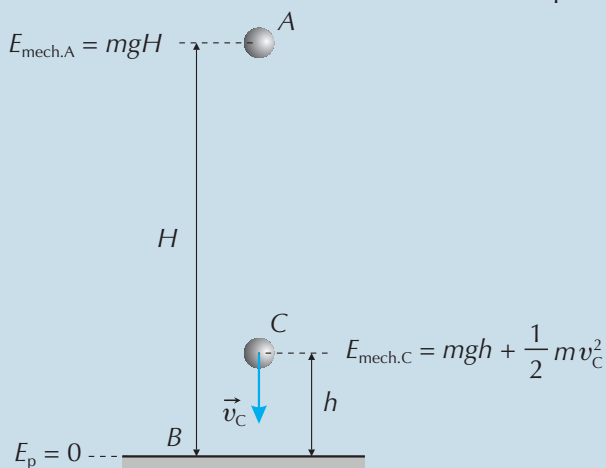
Po podstawieniu danych liczbowych i przyjęciu, że $g = 10 \text{ m/s}^2$, otrzymujemy:

$$v_0 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Przykład 3.6

Szybkość spadającego swobodnie ciała na wysokości h nad podłożem

Ciało znajduje się w punkcie A na wysokości $H = 15$ m nad podłożem (rys. 3.15). Po przebyciu $\frac{3}{4}$ drogi znajdzie się w punkcie C na wysokości $h = \frac{1}{4}H$.



Rys. 3.15

W punkcie A:

$$E_p = mgH \quad E_k = 0$$

W punkcie C:

$$E_p = mgh \quad E_k = \frac{mv_C^2}{2}$$

W układzie Ziemia – ciało na ciało nie działa żadna siła zewnętrzna, więc całkowita energia mechaniczna w punkcie C jest równa energii w punkcie A.

$$mgH = mgh + \frac{mv_C^2}{2} \quad \text{skąd} \quad gH = gh + \frac{v_C^2}{2}$$

Po podstawieniu $h = \frac{1}{4}H$

$$gH - \frac{1}{4}gH = \frac{v_C^2}{2} \quad \text{czyli} \quad \frac{3}{4}gH = \frac{v_C^2}{2}$$

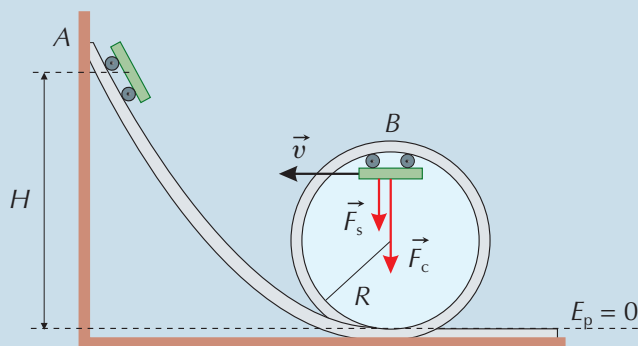
skąd (jeśli $g = 10 \text{ m/s}^2$):

$$v_C = \sqrt{\frac{3}{2}gH} \quad v_C = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Przykład 3.7

„Diabelska pętla”

Obliczymy minimalną wysokość H , którą musi mieć zjeżdżalnia dla wózków wesołego miasteczka, aby wózki wraz z pasażerami miały bezpiecznie najwyższy punkt pętli. Opory ruchu pomijamy. Promień pętli $R = 5$ m (rys. 3.16).



Rys. 3.16

W najwyższym punkcie pętli wózek³ ma (względem podłoża) energię potencjalną

$$E_p = mg \cdot 2R$$

i energię kinetyczną

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Korzystając z zasady zachowania energii, możemy napisać równanie:

$$E_{\text{mech},A} = E_{\text{mech},B}$$

$$mgH = 2mgR + \frac{mv^2}{2} \quad (3.12)$$

Należy jeszcze obliczyć minimalną szybkość v_{min} , którą musi mieć wózek w najwyższym punkcie pętli, aby minął bezpiecznie ten punkt. Na ogół w tym punkcie na wózek działają dwie siły: siła ciężkości $\vec{F}_c = m\vec{g}$ i siła sprężystości $\vec{F}_s$, którą szyny działają na wózek. Wypadkowa tych sił stanowi siłę dośrodkową potrzebną do utrzymania wózka w ruchu po okręgu. Minimalna prędkość w najwyższym punkcie musi mieć taką wartość, aby siła dośrodkowa też była minimalna, tzn. równa tylko mg ($F_s = 0$, co oznacza, że wózek i szyny stykają się, ale siła ich wzajemnego nacisku jest równa zero).

³ Rozmiary wózka są pomijalnie małe w porównaniu z promieniem pętli i wysokością zjeżdżalni. Dla przejrzystości rysunku proporcje nie są uwzględnione.

$$mg = \frac{mv_{\min}^2}{R} \quad (3.13)$$

skąd

$$\frac{mv_{\min}^2}{2} = \frac{mgR}{2} \quad (3.14)$$

Wstawiając wzór (3.14) do (3.12), obliczymy szukaną wysokość:

$$H = 2R + \frac{1}{2}R \quad \text{czyli} \quad H = \frac{5}{2}R \quad H = 12,5 \text{ m}$$

Minimalna wysokość, z której zjeżdża wózek, musi wynosić $\frac{5}{2}R$.

Z równania (3.13) możemy obliczyć minimalną szybkość umożliwiającą bezpieczne minięcie najwyższego punktu pętli (czyli „utrzymanie się” w ruchu po okręgu).

$$v_{\min} = \sqrt{gR}$$

Omówimy teraz przykłady, w których energia mechaniczna ulega zmianie. W takich przypadkach należy skorzystać ze związku

$$\Delta E_{\text{mech.}} = \Delta E_p + \Delta E_k = W_z \quad (3.15)$$

● Przykład 3.8

Łyżwiarz

Obliczymy drogę, którą przebędzie łyżwiarz do chwili zatrzymania się, jeśli jego prędkość początkowa ma wartość v_0 , a współczynnik tarcia łyżew o lód jest równy f . Układ ciał, który rozważamy, tworzą łyżwiarz i Ziemia.

Jeśli łyżwiarz porusza się po torze poziomym (równoległe do powierzchni Ziemi), nie zmienia się jego energia potencjalna $\Delta E_p = 0$.

W tym przypadku:

$$\Delta E_{\text{mech.}} = \Delta E_k = W_z$$

Siłą zewnętrzną działającą na łyżwiarza i wykonującą pracę jest siła tarcia kinetycznego, zwrócona przeciwnie do prędkości (a więc i do przemieszczenia).

Praca siły tarcia jest równa:

$$W_z = Ts \cos 180^\circ = mgs(-1)$$

czyli

$$\Delta E_k = -mgfs$$

zatem

$$E_{\text{kinetyczna w stanie końcowym}} - E_{\text{kinetyczna w stanie początkowym}} = -mgfs$$

$$0 - \frac{mv_0^2}{2} = -mgfs$$

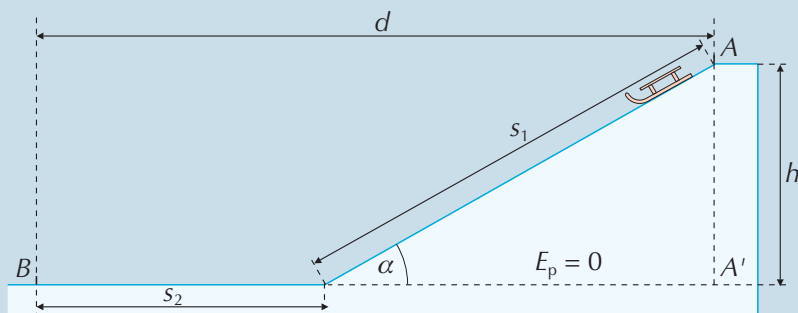
skąd

$$s = \frac{v_0^2}{2gf}$$

Przykład 3.9

Tarcie sanek o śnieg

Obliczmy współczynnik tarcia sanek o śnieg. Sanki ześlizgujące się z góry o wysokości h zatrzymały się w odległości d , mierzonej od punktu A' będącego rzutem wierzchołka góry A na płaszczyznę poziomą (rys. 3.17).



Rys. 3.17

W punkcie A energia kinetyczna sanek jest równa zero, a ich energia potencjalna względem poziomej płaszczyzny, na której leżą punkty A' i B , $E_p = mgh$. W punkcie B sanki nie mają ani energii potencjalnej względem tej płaszczyzny, ani energii kinetycznej (bo zatrzymały się). Zatem całkowita energia mechaniczna jest równa zero. Siłą zewnętrzną, która wykonała pracę, jest siła tarcia; jej wartość na równi wyraża się wzorem $T_1 = mgf \cos \alpha$, a na poziomej powierzchni $T_2 = mgf$. Zatem

$$\Delta E_{\text{mech.}} = W_z = T_1 s_1 \cos 180^\circ + T_2 s_2 \cos 180^\circ$$

$$0 - mgh = -mgf s_1 \cos \alpha - mgf s_2$$

$$h = f s_1 \cos \alpha + f s_2$$

skąd

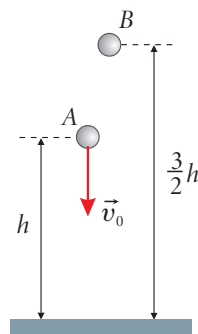
$$f = \frac{h}{s_1 \cos \alpha + s_2}$$

Z rysunku wynika, że $s_2 = d - s_1 \cos \alpha$, więc

$$f = \frac{h}{d}$$

Zadania

1. Z działa o masie $M = 1000$ kg wystrzelono pocisk o masie $m = 1$ kg. Oblicz energię kinetyczną działa uzyskaną po wystrzale, wiedząc, że pocisk opuszcza lufę z prędkością o wartości $v = 400$ m/s.
2. Pocisk o masie $m = 50$ g uderza w deskę o grubości $d = 6$ cm z szybkością $v_1 = 400$ m/s i wylatuje z niej z szybkością $v_2 = 200$ m/s. Oblicz wartość średniej siły oporu deski.
3. Oblicz drogę, którą przebędzie na poziomym lodowisku łyżwiarz rozpędzony do prędkości o wartości $v_0 = 10$ m/s dzięki posiadanej energii kinetycznej. Współczynnik tarcia łyżew o lód $f = 0,1$. Przyjmij, że $g = 10$ m/s².
4. Klocek o masie $m = 0,5$ kg wiszący na lekkiej nici podniesiono o 1 m pionowo do góry z przyspieszeniem o wartości $a = 2$ m/s². Oblicz pracę wykonaną przez siłę $\vec{F}$, którą działano na nitkę ($g = 10$ m/s²).
5. Piłkę rzucono na podłogę z wysokości h (rys. 3.18). Wyprowadź wzór na szybkość, którą nadano piłce, jeśli po odbiciu od podłogi podskoczyła na wysokość $1,5 h$. Pomiń opory ruchu, a uderzenie o podłogę potraktuj jako doskonale sprężyste (tzn. załóż, że piłka nie straciła energii w tym zderzeniu).



Rys. 3.18