ROZDZIAŁ V

Prawa zachowania w mechanice

Próbowałeś kiedyś zatrzymać łódkę zbliżającą się do brzegu albo kolegę jadącego na rowerze? Nie jest to takie łatwe – natychmiastowe: tak jakby jadący rower „przeciwstawiał się” takiemu zatrzymaniu – miał wielkość, którą „stara się” zachować. Wielkość tę nazywamy pędem. Pojęcie pędu (*impetus*) zostało wprowadzone już w XIII wieku przez francuskiego uczonego Jeana Buridiana, który zauważył, że poruszające się ciała starają się zachować swój *pęd*. W ten sposób Buridian (a za nim Kopernik) wyjaśniał nieustanny, *wieczny* ruch planet.

Fot. 5.1. Rene Descartes (Kartezjusz)
http://pl.wikipedia.org/wiki/Kartezjusz

Po Koperniku, a jeszcze przed Newtonem, francuski filozof (i fizyk) Rene Descartes (Kartezjusz, 1596–1650) sformułował trzy prawa mechaniki. Dwa pierwsze były identyczne jak prawa Newtona. Trzecie natomiast mówiło, że po zderzeniu dwóch ciał jedno z nich zyskuje tyle *pędu*, ile drugie straciło. Co to jest ten pęd i dlaczego się tak „przekazuje”?

5.1. Pojęcie pędu

Słowo „pęd” w potocznym języku ma wiele znaczeń. Najczęściej kojarzone jest z obiektem, który się porusza. Im szybciej się ciało porusza, tym większy jest jego „pęd”; również im większa masa ciała, tym większy pęd. W fizyce pojęcie pędu związane jest ściśle równocześnie z prędkością i masą. Definicja pędu jest następująca:

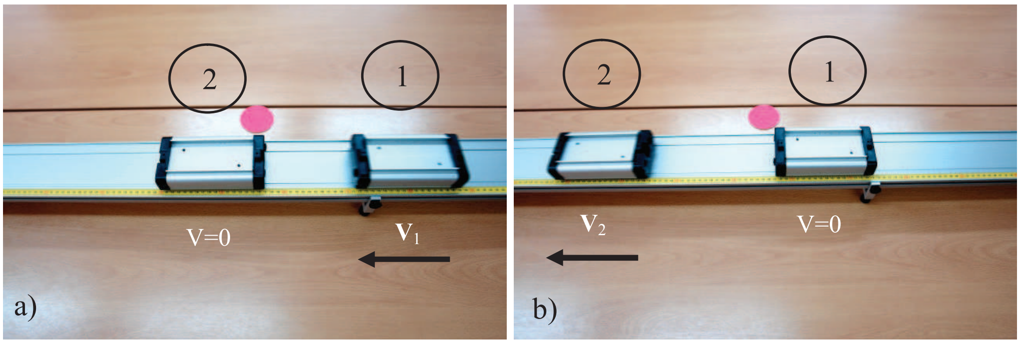
$$\text{pęd} = \text{masa} \cdot \text{prędkość.}$$

Zastanówmy się, czy w naszym codziennym życiu spotykamy się z pędem (w rozumieniu języka fizyki)? Oczywiście, że tak! A oto przykład.

Przykład 5.1.

Jeśli masz dwa samochodziki zabawki, możesz przekonać się o istnieniu pędu. Postaw je naprzeciwko siebie i jeden z nich wpraw w ruch. Co się stało z samochodem znajdującym się na początku w spoczynku?

Podobne doświadczenie z wózkami na szynie przedstawiamy na filmie w wersji internetowej poręcznika. Zauważ, jak w wyniku zderzenia wózek, który pierwotnie spoczywał, zaczął się poruszać. Natomiast wózek, który najpierw się poruszał, zatrzymał się.



Fot. 5.2. Zderzenie wózków: a) wózek „1” uderza w wózek „2” będący początkowo w spoczynku; b) w wyniku zderzenia wózek „1” zatrzymuje się, a wózek „2” porusza się z prędkością, którą miał wcześniej wózek „1”. Zderzenie ma taki przebieg tylko wtedy, gdy masy wózków są równe

Mówimy, że jeden z wózków *przekazał* pęd drugiemu. Nie zawsze cały pęd jest przekazywany w jednym zderzeniu. Ogólnie pędy dwóch wózków po zderzeniu zależą od ich masy oraz ich prędkości. Ale o tym nieco dalej.

Przykład 5.2.

Samochód osobowy o masie 950 kg i załadowany towarem TIR o łącznej masie 18000 kg jadą z taką samą prędkością, np. 72 km/h (czyli 20 m/s). Który z pojazdów ma większy pęd?

Rozwiązanie:

Obliczmy pędy obu samochodów:

pęd osobówki $p = 950\ \mathrm{kg} \cdot 20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 19000\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

a pęd TIRa $p = 18000\ \mathrm{kg} \cdot 20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 360000\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Porównując wartości pędów, widzisz, że wartość pędu TIRa jest zdecydowanie większa. Można powiedzieć, że samochód o większej masie ma też większy pęd (pamiętaj, że jadą z taką samą prędkością).

Przykład 5.3.

Dwa identyczne samochody o masie 950 kg jadą z różnymi prędkościami. Pierwszy porusza się z prędkością 72 km/h (czyli 20 m/s), a drugi 108 km/h (czyli 30 m/s). Który z nich ma większy pęd?

Rozwiązanie:

Ponownie obliczmy wartości pędów obu samochodów.

Wartość pędu samochodu poruszającego się wolniej: $p = 950\ \mathrm{kg} \cdot 20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 19000\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Wartość pędu samochodu poruszającego się szybciej: $p = 950\ \mathrm{kg} \cdot 30\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 28500\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Po analizie wyników obliczeń można stwierdzić, że pęd o większej wartości ma samochód, który porusza się z większą prędkością, czyli samochód drugi.

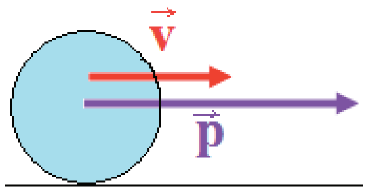
Przykład 5.4.

Czy możliwa jest taka sytuacja, w której pęd samochodu osobowego o masie 2 ton będzie taki sam jak pęd ciężarówki o masie 12 ton? Odpowiedź uzasadnij.

Rozwiązanie:

Sytuacja taka jest możliwa. Z pewnością wiesz, że samochód osobowy łatwiej osiąga znacznie większą prędkość niż samochód ciężarowy. Gdy porównamy masy obu samochodów, to zauważamy, że masa ciężarówki jest sześć razy większa niż osobówki. Gdyby zatem samochód osobowy miał prędkość sześć razy większą niż ciężarówka, to pędy obu aut miałyby taką samą wartość.

Pęd, podobnie jak siła czy prędkość, jest wielkością wektorową. Wiesz już, że obliczenie wartości pędu wymaga znajomości wartości prędkości. Skoro pęd zależy od prędkości, więc tak jak ona musi mieć wszystkie cechy wektora. Do opisu wektora pędu, tak jak wektora prędkości, służą następujące wielkości: *punkt przyłożenia, kierunek, zwrot* oraz *wartość*.



Rys. 5.1. Układ wektorów pędu i prędkości dla toczącej się piłki po płaskiej powierzchni

Dla toczącej się piłki widać, że oba wektory (prędkości i pędu) mają: punkt przyłożenia, kierunek (na rysunku obok jest to kierunek poziomy), zwrot (w prawo) oraz wartości (o której informuje długość strzałki na rysunku). Kierunek i zwrot wektora pędu są takie same jak kierunek i zwrot wektora prędkości.

Definicję pędu zapisaną słowami można zapisać w sposób symboliczny:

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}.$$

Powyższy wzór został zapisany w postaci wektorowej. W wielu zadaniach obliczać będziemy tylko wartość pędu i nie będzie dla nas ważny jego kierunek, można uprościć więc wzór do postaci:

$$\boxed{p = m \cdot \mathrm{v}} \qquad (5.1.).$$

Pęd mierzymy w jednostkach $\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m/s}$. Nie nadajemy jednak tej jednostce żadnej specjalnej nazwy.

Zadanie 5.1.

W czasie meczu siatkarz może uderzyć piłkę tak, że osiąga ona prędkość 90 km/h (czyli 25 m/s). Wiadomo, że masa piłki jest równa 260 g. Jaką wartość ma pęd piłki?

Rozwiązanie:

Pamiętajmy, że jednostką masy w układzie międzynarodowym jest kilogram. Trzeba więc najpierw zamienić 260 g na 0,26 kg. Następnie mnożymy masę piłki przez jej prędkość:

$$p = 0{,}26\ \mathrm{kg} \cdot 25 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 6{,}5\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

5.2. Zasada zachowania pędu

Jak już pokazywaliśmy na przykładzie zderzających się wózków, jeden z nich może przekazać cały swój pęd drugiemu: ten, który był w ruchu, zatrzymuje się, a ten, który stał, zaczyna się poruszać. Najczęściej jednak zderzenia są bardziej skomplikowane: gdy mucha uderzy w słonia, to się od niego „odbije” (a słoń nawet tego nie zauważy).

Co się więc dzieje z pędem w obu przypadkach? Okazuje się, że nie ginie – przed zderzeniem i po zderzeniu jest taki sam, ale musimy rozważać oba elementy (muchę i słonia) razem.

Fot. 5.3. W zabawce zwanej wahadłem Newtona, tyle kulek się odbije, ile zostanie spuszczonych po przeciwnej stronie. Aby to wyjaśnić, musimy skorzystać z prawa zachowania: energii i pędu
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/mech/wahnewt-pl.html

Przykład 5.5.

Wewnątrz karabinu znajduje się pocisk. Co się dzieje po naciśnięciu spustu? Pocisk wylatuje z lufy karabinu, a karabin zostaje odrzucony w tył. Zastanówmy się najpierw jaki był pęd początkowy karabinu, a jaki pocisku?

Rozwiązanie:

Zarówno karabin, jak i pocisk spoczywały, więc ich prędkości były równe zeru, w związku z tym pęd całkowity również był równy zero. (Przypominamy, że pęd jest wektorem jak prędkość).

Co można powiedzieć o pędzie karabinu i pędzie pocisku po naciśnięciu spustu? Karabin został odrzucony do tyłu, czyli jego pęd miał przeciwny zwrot do pędu pocisku. Już wiesz, że pęd jest wektorem. Aby znaleźć wypadkowy pęd w sytuacji, gdy zwroty są przeciwne, trzeba odjąć od siebie pęd karabinu i pęd pocisku.

Oszacujemy wartości pędu pocisku i karabinu. Pocisk ma znacznie mniejszą masę niż karabin, ale znacznie większą prędkość. Zasada *zachowania pędu* mówi, że pęd *w układzie izolowanym* (a takim jest układ karabin–pocisk, jeżeli założymy, że ręka strzelca nie wpływa na proces strzelania) *nie zmienia się*. Jeśli przed strzałem sumaryczny pęd pocisku i karabinu wynosił zero, to wyniesie on *zero* również po strzale. Pęd jest wektorem, pocisk wyleciał do przodu. Pęd, jaki zyskuje karabin, jest równy pędowi pocisku, ale ma przeciwny zwrot. Pęd pocisku (skierowany do przodu) jest równy pędowi karabinu (ten pęd jest skierowany do tyłu). W ten sposób, po strzale, sumaryczny pęd nadal wynosi *zero.*

Przykład 5.6.

Prędkość początkowa pocisku po wystrzeleniu z wiatrówki (model B–3 TG, kaliber 4,5 mm) wynosi 260 m/s, a jego masa jest równa około 0,5 grama, czyli 0,0005 kg. Masa wiatrówki jest równa 3,2 kg. Ile wynosi prędkość odrzutu wiatrówki?

Obliczmy pęd pocisku: $p = 0{,}0005\ \mathrm{kg} \cdot 260 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 0{,}13\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Wartości pędów pocisku i wiatrówki są równe, więc można obliczyć prędkość odrzutu:

$$\mathrm{v} = \frac{0{,}13\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{3{,}2\ \mathrm{kg}} = 0{,}04 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Podsumujmy powyższe rozważania. Pęd początkowy, czyli przed wystrzałem, był równy zero. Pęd końcowy, po wystrzale, także był równy zero. Pęd przed wystrzałem i pęd po wystrzale są sobie równe. W układzie karabin–pocisk nie nastąpiła żadna zmiana pędu całkowitego.

Powyższy przykład jest jednym z wielu, który potwierdza fakt, że w układzie dwóch ciał całkowity pęd nie ulega zmianie, mimo iż pędy obu ciał się zmieniają. Jest to zasada znana w fizyce pod nazwą zasady zachowania pędu.

***Zasada zachowania pędu*:**
W układzie ciał izolowanych całkowity pęd nie ulega zmianie.

5.3. Pojęcie energii

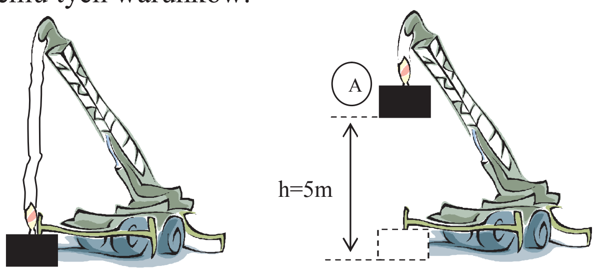
Termin „energia" pochodzi od greckiego słowa *energeia* używanego już przez Arystotelesa i w różnych tłumaczeniach oznacza działanie, przyczynę ruchu, moc. Słowo energia ma więc wiele znaczeń. Można powiedzieć o koledze czy koleżance, że ma w sobie dużo „energii". A jak należy rozumieć słowo energia w języku fizyki? Odpowiedź można znaleźć np. w *Słowniku wyrazów obcych PWN*: [...] *wielkość fizyczna określająca zdolność ciała lub układu ciał do wykonywania pracy przy przejściu z jednego stanu do drugiego*[27]. Aby dobrze zrozumieć powyższą definicję, trzeba wiedzieć, co nazywamy pracą w fizyce i w dalszej części dowiesz się o tym.

Na co dzień spotykasz się z wieloma rodzajami energii, np.: elektryczną, chemiczną, mechaniczną, termiczną, rzadziej z jądrową czy atomową. Poza tym od wielu lat ludzie zastanawiają się nad tym, skąd pozyskiwać energię. Na pewno słyszałeś pojęcie „odnawialne źródła energii", a może nawet spotykasz je, idąc do szkoły, np. baterie słoneczne czy wiatraki. Do życia jest nam niezbędna energia słoneczna. Jak sam widzisz, temat dotyczący energii jest bardzo obszerny, dlatego wybrane zostały najważniejsze fakty z nią związane, o których będziesz się uczył, a które zostały opisane poniżej.

5.4. Praca

W języku potocznym praca oznacza wykonywanie pewnych czynności, za które twoi rodzice otrzymują wynagrodzenie w postaci pieniędzy. W fizyce natomiast pojęcie pracy jest związane z działaniem sił, ale pod pewnymi warunkami.

W rozumieniu fizyki praca jest wykonywana, gdy na ciało działa zewnętrzna siła oraz gdy siła ta spowoduje przesunięcie tego ciała na jakąś odległość. Kolejnym warunkiem wykonania pracy jest to, że działająca siła i przesunięcie nie są do siebie prostopadłe. Poniższe przykłady pomogą Ci w zrozumieniu tych warunków.



Rys. 5.2. Ilustracja do przykładu 5.7.

Przykład 5.7.

Dźwig budowlany podnosi stalowe elementy konstrukcji bloku z powierzchni ziemi na wysokość 5 m w pewne miejsce A.

W tym przypadku została wykona praca. Dźwig działał na stalowe elementy siłą pionowo do góry. Elementy zostały przesunięte również w pionie. Kierunek działającej siły i kierunek przesunięcia były równoległe.

Przykład 5.8.

Niesiesz ze sklepu torbę z zakupami do domu.

[27] *Słownik wyrazów obcych PWN*, red. J. Tokarski, PWN, Warszawa 1990, s. 192.

Rys. 5.3. Ilustracja przykładu 5.8.

Na torbę z zakupami działasz siłą pionowo w górę (nie chcesz przecież, żeby torba Ci wypadła z ręki), a przesunięcie torby następuje w poziomie. W rozumieniu fizyki nie wykonujesz pracy, ponieważ kierunek działającej siły i kierunek przesunięcia są do siebie prostopadłe.

Aby obliczyć pracę, jaka została wykonana, trzeba znać wartość siły, która działała na ciało oraz wartość przesunięcia. Siła i przesunięcie są wielkościami wektorowymi, ale praca jest skalarem (liczbą).

Definicja pracy:

praca = wartość siły · wartość przesunięcia.

W fizyce pracę oznacza się literą „W”, ponieważ po angielsku praca to *work.*

Stosując symbole można zapisać wzór na pracę:

$$\boxed{W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}} \qquad (5.2.).$$

Dowiedziałeś się, że praca jest skalarem, dlatego powyższy wzór można zapisać w prostszej postaci, ale tylko jeśli działająca siła jest równoległa do przesunięcia ciała

$$W = F \cdot s.$$

Jeżeli natomiast działająca siła jest prostopadła do przesunięcia, tak jak w przypadku planet krążących dookoła Słońca, praca siły jest *zerowa*. Jest to bardzo ważny wynik, wyjaśniający dlaczego planety krążą dookoła Słońca ze *stałą* prędkością.

Jednostką pracy jest dżul, oznaczany literą J. Nazwa jednostki pochodzi od nazwiska angielskiego uczonego Joule’a. Patrząc na powyższy wzór można sprawdzić, czemu jest równy jeden dżul. Siłę mierzymy w niutonach, a przesunięcie w metrach. Stąd $1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N} \cdot 1\ \mathrm{m}$.

Przykład 5.9.

Działając na krzesło siłą o wartości 30 N, przesunąłeś je na odległość 0,5 m. Jaką pracę wykonałeś?

Rozwiązanie:

Aby obliczyć wykonaną pracę, wystarczy pomnożyć wartość siły przez odległość, czyli

$W = 30\ \mathrm{N} \cdot 0{,}5\ \mathrm{m} = 15\ \mathrm{J}$.

Przykład 5.10.

Stoisz na korytarzu, a na plecach trzymasz ciężki tornister (o łącznej masie książek 10 kg). Jaką pracę wykonujesz?

Rozwiązanie:

Oczywiście wykonana praca jest żadna, czyli zerowa! Jeśli przenosisz tornister w górę lub w dół, to wykonujesz pracę. Jeśli z nim stoisz, to nie wykonujesz żadnej pracy (wielkość przesunięcia *s* jest zerowa). Praca jest zerowa, nawet gdy biegniesz z pełnym tornistrem po poziomym chodniku, jak w przykładzie 5.8 – siła utrzymująca tornister na plecach jest prostopadła do przesunięcia *s* i zgodnie z nieco bardziej zaawansowaną formą wzoru (5.2) praca wynosi zero.

5.5. Energia mechaniczna i jej rodzaje

Energia mechaniczna związana jest ze zmianą położenia ciała względem innych ciał. Rozróżniamy dwa rodzaje energii mechanicznej: energię kinetyczną i energię potencjalną. Pierwsza z nich jest związana z ruchem, druga z *potencjalną* możliwością wykonania pracy przez ciało (na przykład woda w wodospadzie może napędzać turbinę elektrowni).

Jeśli ciało porusza się względem wybranego układu odniesienia, to ma **energię kinetyczną**. Innymi słowy energia kinetyczna związana jest ze stanem ruchu ciała. Jeśli ciało spoczywa, wówczas jego energia kinetyczna jest równa zero. Jeśli prędkość ciała wzrasta, to równocześnie rośnie energia kinetyczna.

Przykład 5.11.

Energię kinetyczną mają takie ciała, jak np.: jadący samochód, lecący samolot, jadący rowerzysta, skaczący z samolotu spadochroniarz, spadające krople deszczu itd.

Energia kinetyczna zależy od masy ciała oraz od jego prędkości. Aby obliczyć energię kinetyczną, trzeba skorzystać ze wzoru:

$$\boxed{E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \mathrm{v}^2} \qquad (5.3.).$$

Symbolicznie energię oznaczamy literą E, mały indeks *kin* oznacza kinetyczną. Wiesz z poprzednich rozdziałów, że *m* oznacza masę, a v prędkość. Przyjrzyjmy się powyższemu wzorowi, aby ustalić, jaka jest jednostka energii. Zgodnie z układem SI masę mierzymy w kilogramach – kg, prędkość zaś w m/s. Otrzymujemy więc zależność:

$$1\,\mathrm{kg} \cdot \left(1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2 = 1\,\mathrm{kg} \cdot 1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{N} \cdot 1\,\mathrm{m}.$$

Z poprzedniego paragrafu wiesz, że $1\,\mathrm{N} \cdot 1\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{J}$. Dochodzimy więc do wniosku, że jednostką energii, tak samo jak pracy, jest dżul.

Przykład 5.12.

Piłkę o masie 260 g uderzył siatkarz tak, że uzyskała prędkość 20 m/s. Jaką energię kinetyczną miała piłka?

Rozwiązanie:

Rozwiązanie jest proste. Masę piłki 260 g w jednostkach międzynarodowych to 0,26 kg. Następnie wystarczy wstawić do wzoru na energię kinetyczną:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}26\,\mathrm{kg} \cdot \left(20\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2 = 0{,}13\,\mathrm{kg} \cdot 400\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 52\,\mathrm{J}.$$

Przykład 5.13.

Wróćmy do przykładu 5.4. Jeśli pęd samochodu osobowego o masie m_1= 2000 kg i pęd samochodu osobowego o masie m_2 = 12 000 kg są identyczne, jak różni się ich energia kinetyczna? Przyjmijmy, że samochód ciężarowy porusza się z prędkością 5 m/s (18 km/h).

Rozwiązanie:

Oznaczmy przez v_1 i prędkość samochodu osobowego, a przez v_2 prędkość samochodu ciężarowego.

Z definicji pędu $p = m$ v wynika, że prędkość samochodu osobowego $v_1 = 6v_2 = 30$ m/s (108 km/h).

Z kolei z definicji energii kinetycznej
$E_k = ½\, m\, v^2$ wynika, że energia kinetyczna samochodu osobowego wyniesie:
$E_1 = ½ \cdot 2000 \cdot 900 = 900$ kJ,
a energia samochodu ciężarowego
$E_2 = ½ \cdot 12000 \cdot 25 = 25$ kJ.

Mimo, że samochód osobowy w tym przykładzie jest lżejszy niż samochód ciężarowy, zniszczenia, jakie może spowodować uderzając np. w dom, byłyby bez porównania większe. Powodem jest, oczywiście, różnica prędkości.

Zapamiętajmy:

Energia kinetyczna rośnie jak kwadrat prędkości.

Skutki zderzenia rosną więc, jak kwadrat prędkości. Co więcej, z rozważań o tarciu wynika, że i droga hamowania rośnie, jak kwadrat prędkości. Pamiętaj o tym w ruchu na drodze.

Drugi rodzaj energii mechanicznej to **energia potencjalna**. Można ją podzielić na energię potencjalną sprężystości i energię potencjalną grawitacji.

Energia potencjalna sprężystości dotyczy ciał, które wykonały pracę lub nad którymi wykonano pracę, a jej efektem jest zmiana kształtu tego ciała. Ciała mające energię potencjalną sprężystości to np.: sprężynka w długopisie (gdy włączasz lub wyłączasz długopis), gumka recepturka (gdy ją rozciągasz).

Energia potencjalna grawitacji związana jest z ciałami, które zmieniają swoje położenie względem powierzchni Ziemi i wykonują ruch pod wpływem siły grawitacji. Najprościej mówiąc, ciała spadające lub też podnoszone czy podrzucane do góry mają energię potencjalną grawitacji. Ciałami mającymi energię potencjalną grawitacji są: wyrzucona do góry piłka, skoczek z tyczką w momencie przelotu na poprzeczką, balon nad ziemią itp.

Energia potencjalna grawitacji zależy od wysokości, na jaką wzniesione jest ciało oraz od jego masy. Okazuje się też, że zależy od wielkości *przyspieszenia* ziemskiego *g*. Jest to o tyle oczywiste, że ciężar ciała, czyli siła z jaką Ziemia je przyciąga, zależy też od *g*.

Energię potencjalną grawitacji można obliczyć ze wzoru zapisanego symbolicznie:

$$\boxed{E_{pot} = m \cdot g \cdot h} \qquad (5.4.).$$

Literą E oznaczamy energię, a indeks *pot* oznacza potencjalną; *m* to masa, *g* to przyspieszenie ziemskie, *h* to wysokość. Jednostką energii potencjalnej jest tak samo, jak jednostką energii kinetycznej, dżul oznaczany J.

Przykład 5.14.

Zawodniczka o masie 60 kg wykonywała skok wzwyż i przeskoczyła nad poprzeczką na wysokości 1,5 m. Pamiętając, że wartość przyspieszenia ziemskiego wynosi około 10 m/s², oblicz energię potencjalną, jaką miała zawodniczka nad poprzeczką.

Rozwiązanie:

Aby obliczyć energię potencjalną zawodniczki, trzeba wstawić dane do wzoru na energię potencjalną, czyli:

$$E_{pot} = 60\ \mathrm{kg} \cdot 10 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 1{,}5\ \mathrm{m} = 900\ \mathrm{J}.$$

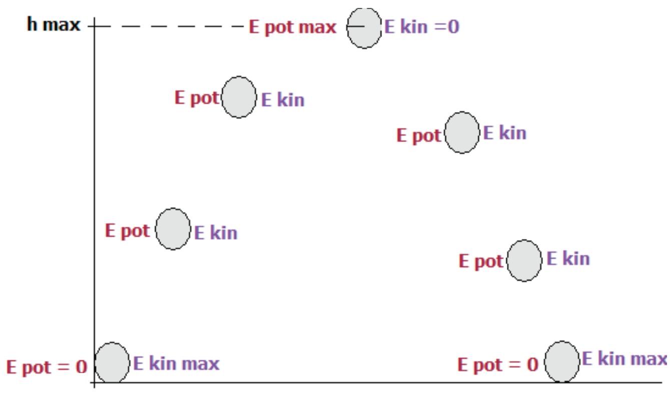
5.6. Zasada zachowania energii mechanicznej

Z poprzednich tematów wiesz, że istnieją dwa rodzaje energii mechanicznej, umiesz je też nazywać i rozróżniać. Potrafisz też obliczyć wartość energii kinetycznej i potencjalnej.

Energia mechaniczna układu dwóch ciał jest sumą energii kinetycznej i potencjalnej obu ciał.

Przykład 5.15.

Rozważymy sytuację, w której piłka została wyrzucona w górę. Pomijamy opory powietrza.



Rys. 5.4. Ruch piłki

Rozwiązanie:

W chwili wyrzucenia piłce nadana została pewna prędkość, tym samym uzyskała ona energię kinetyczną. Na początku, tzn. w chwili wyrzutu, prędkość jest największa, równocześnie energia kinetyczna ma maksymalną wartość. Ponieważ piłka znajduje się na „poziomie zerowym”, to jej energia potencjalna jest równa zero. Piłka podczas wznoszenia traci swoją prędkość, więc maleje jej energia kinetyczna. Natomiast rośnie energia potencjalna, gdyż piłka znajduje się na coraz większej wysokości względem „poziomu zerowego”. Gdy piłka osiąga maksymalną wysokość, wówczas energia potencjalna ma największą wartość, a energia kinetyczna jest wtedy równa zeru.

Piłka, zaczynając spadać, zwiększa swoja prędkość, więc energia kinetyczna rośnie. Spadając, piłka zbliża się do „poziomu zerowego”, jej wysokość nad powierzchnią maleje, więc energia potencjalna maleje. Piłka uderza o ziemię z taką samą prędkością, a więc taką samą energia kinetyczną, jaką miała na początku.

Podczas ruchu energia kinetyczna i potencjalna ulegały zmianie. Zwróć uwagę, że energia potencjalna piłki na początku i na końcu ruchu była równa zero oraz że wartość energii kinetycznej pozostała taka sama. Po analizie dochodzimy do wniosku, że suma energii kinetycznej i potencjalnej na początku, czyli *początkowa energia mechaniczna*, oraz suma energii kinetycznej i potencjalnej na końcu, czyli *energia mechaniczna końcowa*, są sobie równe. Stąd można wyciągnąć wniosek, że całkowita energia mechaniczna nie uległa zmianie, mimo że jej składowe, czyli energia kinetyczna i potencjalna, ulegały zmianie.

Powyższy przykład jest jednym z wielu obrazujących kolejną ważną zasadę zachowania w fizyce, tzn. zasadę zachowania energii mechanicznej.

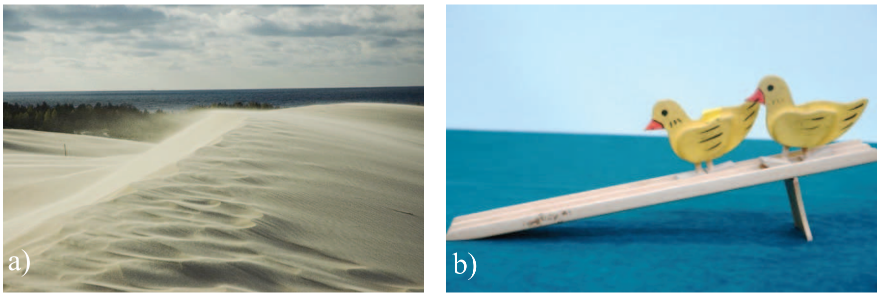
Zasada zachowania energii mechanicznej:
W układzie ciał izolowanych energia mechaniczna nie ulega zmianie.

5.7. Tarcie i inne opory w ruchu

W wielu używanych przez nas przykładach mówiliśmy o kulkach toczących się ze stałą prędkością po stole albo kulkach przyspieszających na równi. Wiemy natomiast z życia codziennego, że rozpędzony samochód wcześniej czy później sam się zatrzyma, jeżeli zgaśnie silnik. Jak to więc jest? Czy prawa Newtona są nieprawdziwe?

Prawa Newtona są bardzo ważne, jako że wprowadziły pewien porządek w rozważaniach o ruchu. Arystoteles (zob. fot. 1.5) pisał w sposób bardzo zagmatwany o ruchu – że jest do jego podtrzymania potrzebna „energia", „potencja" itd. Jean Buridian, o którym już pisaliśmy, około 1300 roku jako pierwszy stwierdził, że do podtrzymania ruchu nie jest potrzebny żaden czynnik zewnętrzny, jako że ciała poruszające się posiadają *impetus.* Kopia jego pracy jest do dziś w bibliotece Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, więc młody Kopernik na pewno ją czytał. Dlaczego ciała niebieskie poruszają się „wiecznie", a kulka na stole lub samochód zatrzymuje się? W przestrzeni kosmicznej (lub lepiej powiedzieć „próżni kosmicznej") na ciała nie działają *opory ruchu*.

Takim oporem ruchu jest na przykład *tarcie*. Tarcie poczujesz, pocierając jedną dłoń o drugą. Tarcie jest powodem, że wydma z piasku lub stos kulek nie rozsypują się (fot. 5.3a). Tarcie jest powodem spowolnienia ruchu kaczek kroczących po równi (fot. 5.3b). Tarcie, wreszcie, umożliwia nam chodzenie. Spójrz na podeszwę własnego buta! Jest ona zrobiona specjalnie tak, aby zwiększyć tarcie między podłogą a butem.



Fot. 5.4. Przykłady siła tarcia: a) wydmy w Łebie; b) kaczki kroczące po równi

Prawa tarcia sformułował, jeszcze przed Galileuszem, inny wielki jego rodak, Leonardo da Vinci (ten od *Mony Lisy* i *Damy z Łasiczką*). Przede wszystkim siła tarcia zależy od rodzaju trących się powierzchni – inna jest siła tarcia sanek o śnieg, a inna o betonowy chodnik. Tę zależność uwzględniamy w tzw. *współczynnika tarcia*. Dla tarcia metalu o lód wynosi on 0,03, a dla metalu o drewno 0,5.

Także Leonardo da Vinci doszedł do wniosku, że siła tarcia zależy od *ciężaru* ciała. Możemy więc sformułować prawo tarcia w postaci:

$$T = f\,G,$$

gdzie: T jest siłą tarcia, f współczynnikiem tarcia, a G ciężarem ciała (nie stosujemy tu zapisu wektorowego, jako że kierunek siły tarcia jest nieco „kapryśny”, jak to pokażemy dalej).

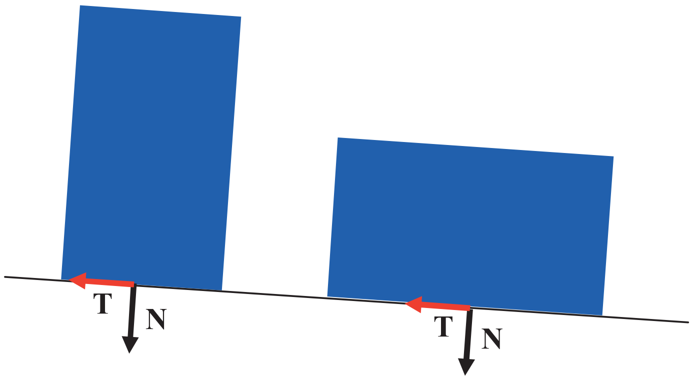
Z kolei ciężar ciała jest iloczynem masy ciała m i przyspieszenia ziemskiego g:

$$G = m\, g,$$

stąd wyrażenie końcowe na siłę tarcia:

$$T = f\, m\, g.$$

Wyrażenie jest nieco zaskakujące. Przede wszystkim, siła tarcia nie zależy od prędkości poruszania się ciała; po drugie, nie zależy od wielkości płaszczyzny kontaktu dwóch ciał. Wyjaśnimy to na rysunku 5.5. Wielkość siły tarcia nie zależy od tego, czy klocek leży na większym czy mniejszym boku, o ile oczywiście oba „boki” mają ten sam współczynnik tarcia.



Rys. 5.5. Siła tarcia nie zależy od wielkości płaszczyzny podparcia, a jedynie od ciężaru ciała (a dokładniej od siły nacisku na podłoże)

Siła tarcia ma jeszcze jedną ciekawą właściwość: działa zawsze w kierunku odwrotnym do kierunku ruchu (lub kierunku siły, która ten ruch stara się wymusić). W tym ostatnim stwierdzeniu wprowadziliśmy jeszcze jedną ciekawą własność siły tarcia: działa ona nie tylko w trakcie ruchu, ale także przeciwstawia się *próbie* ruchu.

Wyjaśnijmy to dokładniej: sanki stojące na górce wymagają popchnięcia, aby ruszyły. Raz popchnięte zjeżdżają, przyspieszając. Mówimy o dwóch typach tarcia:

– *statycznym*, jeżeli ciała trące się wzajemnie nie przemieszczają,
– *dynamicznym*, jeżeli ciała trące przemieszczają się.

Z tarciem statycznym mamy do czynienia, kiedy kroczymy chodnikiem, z tarciem dynamicznym, kiedy podeszwa ślizga się po podłożu. Tarcie statyczne jest zawsze *większe* niż dynamiczne. Chodzimy po lodzie, nie ślizgając się, a raz poślizgnąwszy się, nie potrafimy się zatrzymać. Podobnie jest z samochodem w tzw. „poślizgu”.

Wyrażamy tę zależność, używając dwóch różnych współczynników tarcia – współczynnika tarcia dynamicznego f_d i współczynnika tarcia statycznego f_s. Mamy zawsze zależność:

$$f_s > f_d\,.$$

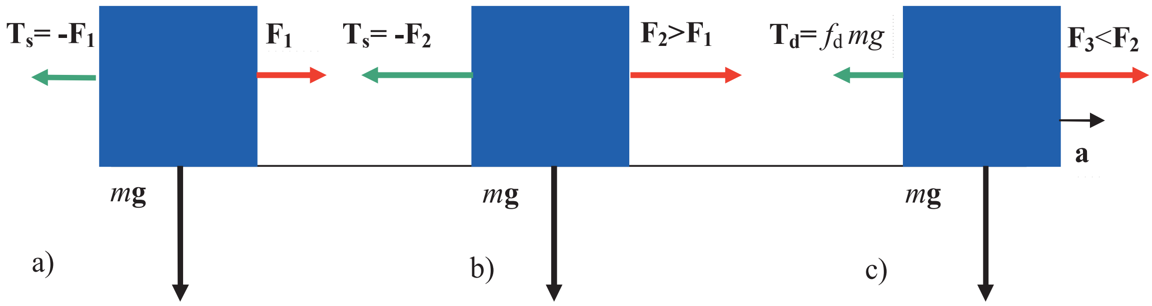
I tak na przykład, dla metalu na lodzie współczynnik tarcia statycznego wynosi 0,03, a współczynnik tarcia dynamicznego 0,015.

Zastanówmy się teraz nad takim problemem. Pies nie chce iść na spacer. Ciągniemy smycz, ale pies zaparł się nogami. Ciągniemy mocniej, pies ani drgnie. Jak to możliwe?

Przeanalizujmy to dokładniej. Jeśli pies jest w spoczynku (ani drgnie), to siły działające na niego równoważą się. Załóżmy, że ciągniemy początkowo psa z siłą 10 N. Siła tarcia (statycznego) wynosi więc 10 N. Następnie ciągniemy z siłą 15 N. Pies nadal stoi w miejscu. Czyżby siła tarcia (statycznego) wzrosła? Tak! A co ze współczynnikiem tarcia? Też wzrósł?

To jest ważna różnica między tarciem dynamicznym a statycznym. W tarciu dynamicznym siła tarcia jest jednoznacznie określona i wynosi ona zawsze $T = f_d\, m\, g$.
W tarciu statycznym, współczynnik f_s określa *maksymalną* siłę tarcia. W miarę wzrostu siły ciągnącej, tarcie statyczne rośnie, aż do momentu, kiedy siła tarcia (statycznego) jest niewystarczająca do utrzymania ciała w spoczynku, zob. rys. 5.6 – ciało zaczyna poruszać się (ruchem jednostajnie przyspieszonym).

Wartość przyspieszenia, z którym porusza się ciało, możemy prosto wyliczyć. Kierunek siły tarcia **T** jest (zawsze) przeciwny do kierunku siły wymuszającej ($\mathbf{F_3}$ na rysunku 5.6.). Na ciało działa więc siła wypadkowa $\mathbf{F_w} = \mathbf{F_3}-\mathbf{T}$. Przyspieszenie ciała wyniesie więc $\mathbf{a} = (\mathbf{F_3}-\mathbf{T})/m$



Rys. 5.6. Paradoksy siły tarcia **T**: a) siła tarcia statycznego $\mathbf{T_s}$ równoważy siłę $\mathbf{F_1}$ próbującą wymusić ruch; b) siła wymuszająca ruch rośnie, ale tarcie (statyczne) rośnie również, aż do warunku granicznego $\mathbf{T_s} = f_s mg$; c) kiedy siła wymuszająca ruch przekroczy tę wartość graniczną siły tarcia statycznego, ciało zaczyna się ślizgać – porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym; siła tarcia dynamicznego jest mniejsza niż siła tarcia statycznego, jako że $f_s > f_d$. Zauważmy też, że siła tarcia jest zawsze mniejsza od ciężaru ciała!

Przykład 5.16.

Siła ciągu silników odrzutowych w samolocie pasażerskim wynosi 1 MN, a jego masa 200 ton. Współczynnik tarcia dynamicznego, w tym przypadku toczenia się kół po pasie startowym, wynosi 0,05. Jakie jest przyspieszenie startującego samolotu w chwilę po zwolnieniu hamulca?

Dane:
$F = 1\cdot10^6$ N,
$m = 200\cdot10^3$ kg,
$f_d = 0{,}05$,
$g = 10$ m/s.

Siła tarcia dynamicznego wynosi $T = f_d\, m\, g = 0{,}05\cdot200\cdot10^3\cdot10 = 100\cdot10^3$ N = 0,1 MN.

Wypadkowa siła powodująca start samolotu wynosi więc $F_w = 0{,}9$ MN.

Siła ta nadaje samolotowi przyspieszenie

$$a = F_w/m = 0{,}9\cdot10^6\,/0{,}200\cdot10^6 = 4{,}5\ \mathrm{m/s^2}.$$

Jest to całkiem spore przyspieszenie, wgniatające pasażera w fotel!

Dla dociekliwych:

Spróbujmy ocenić, ile musi wynosić współczynnik tarcia statycznego opon o asfalt pasa startowego, aby samolot z silnikami włączonymi na pełną moc stał nieruchomo na pasie.

Aby samolot stał nieruchomo, siła tarcia statycznego musi wynosić 1 MN.

Z zależności $T_s = f_s\, m\, g$

otrzymujemy $f_s = T/mg = 1\cdot 10^6/(0{,}2\cdot 10^6\cdot 10) = 0{,}5$.

Współczynnik tarcia statycznego musi być niemniejszy niż 0,5!

Bardzo ważna uwaga dotyczy wartości współczynnika tarcia: i dla tarcia statycznego, i dla tarcia dynamicznego jest on zawsze mniejszy od 1. Innymi słowy, siła tarcia może być różna, ale jest zawsze *mniejsza* od ciężaru ciała. Wykorzystuje to policja w pomiarach drogi hamowania samochodów w wypadku. Jak? Wyjaśnia to przykład 5.17.

Przykład 5.17.

Policjanci mają niezawodny sposób na stwierdzenie, z jaką prędkością jechał samochód przed wypadkiem. Mierzą po prostu długość drogi hamowania. Jak się ma ta droga hamowania do prędkości samochodu?

Kluczem jest tu zasada zachowania energii. Energia (kinetyczna) jadącego samochodu to

$$E_k = ½\, m\, v^2.$$

Co powoduje zatrzymanie samochodu? To jasne! Odpowiednio długo działająca siła tarcia. Moglibyśmy obliczyć, jak długo musi działać ta siła, aby zmniejszyć prędkość samochodu od v do zera. Ale nie jest nam to potrzebne!

Wróćmy do definicji pracy: jest to iloczyn siły i drogi, na jakiej ta siła działa.

$$W = F\, s.$$

Z drugiej strony, praca (siły tarcia w tym przypadku) jest równa zmianie energii kinetycznej. Prędkość początkową samochodu możemy więc obliczyć z zależności

$$½\, m\, v^2 = F\, s.$$

Rozważmy przykład liczbowy.

Przykład 5.18.

Samochód (o masie 1000 kg) jedzie z prędkością początkową 40 m/s (144 km/h). Ile wyniesie jego droga hamowania, jeśli współczynnik tarcia opon o asfalt wynosi 0,8 (zakładamy w ten sposób, że samochód nie wpadł w poślizg).

Dane:
$v = 40$ m/s,
$f_s = 0{,}8$,
$m = 1000$ kg (jak się okaże, niepotrzebna do obliczeń),
$s = ?$

Siła tarcia wynosi $T = f_s\, m\, g$.

Zakładając, że siła hamowania pozostaje stała, pracę siły tarcia możemy wyliczyć ze wzoru

$$W = T\, s.$$

Korzystając ze wzoru na energię kinetyczną, otrzymujemy więc równość

$$f_s\, m\, g\, s = ½\, m\, v^2.$$

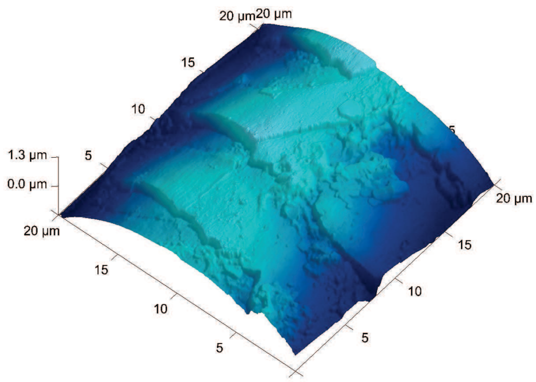
W równaniu powyższym upraszcza się masa. Drogę hamowania otrzymujemy ze wzoru

$$s = ½\, v^2 / f_s\, g = ½·1600/(0.8·10) = 100 \text{ m}.$$

Zauważmy, że droga hamowania nie zależy od masy samochodu. I samochód osobowy i ciężarowy (a nawet rower) mają tę samą drogę hamowania!

Co powoduje siły tarcia? To proste! Nierówności powierzchni – tak jakby małe haczyki między jedną a drugą powierzchnią. Nawet „idealnie" wypolerowane powierzchnie widziane pod mikroskopem atomowym (zob. fot. 5.4), mają wyższe i niższe punkty. Z lodem jest nieco inna historia – cząsteczki na jego powierzchni tworzą warstewkę ciekłej wody, tak że łyżwa bardziej „pływa" po wodzie niż się ślizga po lodzie.

Dla zmniejszenia tarcia stosuje się różne sposoby – szlifowanie powierzchni lub różnego rodzaju smary. Mogą to być oleje, specjalne woski (w nartach biegowych), mydło (w tarciu gumy o gumę) albo np. grafit. Czasem potrzebne jest zwiększenie tarcia – skrzypek naciera smyczek kalafonią, aby ten nie ślizgał się po strunach.



Fot 5.5. Powierzchnia włosa pod mikroskopem sił atomowych. Nie wynaleziono do tej pory lepszego materiału na smyczki do skrzypiec jak włosy z końskiego ogona (zdjęcie IF UMK)

Najstarszym sposobem na przezwyciężenie siły tarcia jest wynalazek koła. W przypadku toczenia też występują siły tarcia, ale są one znacznie mniejsze niż w przypadku poślizgu podobnych powierzchni. Im większe koło, tym mniejsze siły tarcia toczenia. Tarcie „potoczyste" jest jednak trudne do dokładnego opisu matematycznego.

Tarcie dwóch ciał stałych jest tylko jednym z przykładów oporów ruchu. Innym typem oporów jest np. opór powietrza. Ten, w ogólności, bardzo zależy od prędkości. Pasażerskie samoloty odrzutowe latają z prędkościami 850–950 km/h, bo im bliżej prędkości dźwięku (1200 km/h), tym nieproporcjonalnie większe opory ruchu. Ale dla małych prędkości opór powietrza niewiele zależy od prędkości. Możesz to wypróbować, spuszczając małe spadochrony z lejkowatych filtrów do kawy i mierząc czas ich spadku dla różnych ciężarów „pasażera". Ale to już zadanie dla Ciebie!

Dość prostym zagadnieniem jest opór ruchu pęcherzyka poruszającego się w rurce z (lepkim) płynem (zob. fot. 3.4. w rozdziale III). W tym przypadku siła oporu jest wprost proporcjonalna do prędkości poruszania się pęcherzyka. I dlatego pęcherzyk porusza się ruchem jednostajnym, choć (bez oporów) powinien poruszać się ruchem jednostajnie przyspieszonym!

Fot. 5.6. A tak dzieje się, kiedy kierowcy zapominają o prawach fizyki

Podsumowanie

Podobnych zagadek jak z siłami tarcia i oporu lepkiego jest w fizyce mnóstwo. Nawet dziś nie rozumiemy ich do końca. Opis matematyczny pozostaje pięknym, choć przybliżonym modelem rzeczywistości.

Fizyka, czyli natura, jest znacznie bogatsza!