DLA ABSOLWENTÓW SZKÓŁ PODSTAWOWYCH

Zrozumieć fizykę 1

Podręcznik dla liceum ogólnokształcącego i technikum

Zakres rozszerzony

Zrozumieć fizykę

Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania fizyki, na podstawie opinii rzeczoznawców: **prof. dr. hab. Bronisława Słowińskiego, prof. dr. hab. Aleksandra Filipa Żarneckiego i dr hab. Iwony Benenowskiej**.

Zakres kształcenia: rozszerzony
Etap edukacyjny: III
Typ szkoły: ponadpodstawowa (liceum ogólnokształcące i technikum)
Rok dopuszczenia: 2019

Numer ewidencyjny w wykazie MEN: 1002/1/2019

Podręcznik został opracowany na podstawie *Programu nauczania fizyki w liceum ogólnokształcącym i technikum do zakresu rozszerzonego. Zrozumieć fizykę* autorstwa Agnieszki Byczuk, Krzysztofa Byczuka, Stanisława Suwalda i Zuzanny Suwald.

ISBN 978-83-267-3650-6

Współpraca autorska: Bartłomiej Piotrowski (zad.: 4 s. 89, 3 s. 125, 4 s. 126)
Konsultacje merytoryczne: Jacek Hirsch, Michał Matraszek, dr Piotr Nieżurawski, dr Weronika Śliwa
Opracowanie redakcyjne i redakcja merytoryczna: dr Agnieszka Grzelińska
Współpraca redakcyjna: Dorota Brzozowiec-Dek, Miłosz Budzyński
Redakcja językowa: Dorota Rzeszewska
Korekta: Zofia Psota, Anna Wesołowska
Fotoedycja: Katarzyna Iwan-Malawska
Nadzór artystyczny: Kaia Pichler
Opieka graficzna: Ewa Kaletyn
Projekt graficzny: Klaudia Jarocka, Aleksandra Szpunar
Projekt okładki: Maciej Galiński
Opracowanie graficzne: ULTRA, Klaudia Jarocka, Ewa Kaletyn, Aleksandra Szpunar, Paulina Tomaszewska, Enzo di Giacomo
Ilustratorzy: Andrzej Dukata, Joanna Ptak, Zuzanna Dudzic, Rafał Buczkowski, Ewa Sowulewska
Realizacja projektu graficznego: Adam Poczciwek

Podręcznik „Zrozumieć fizykę" cz. 1 został napisany z wykorzystaniem fragmentów podręcznika do fizyki w zakresie rozszerzonym autorstwa S. Bajtlika, A. i K. Byczuków, S. i Z. Suwaldów, E. Wójtowicz.
Na stronach 6–9 wykorzystano tekst Weroniki Śliwy z podręcznika „Odkryć fizykę".

Nowa Era Sp. z o.o.
Aleje Jerozolimskie 146 D, 02-305 Warszawa
www.nowaera.pl, e-mail: nowaera@nowaera.pl, tel. 801 88 10 10

Druk i oprawa: Drukarnia Orthdruk

Spis treści

O czym jest podręcznik

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 1* znajdziesz ważne i ciekawe informacje dotyczące ruchu, sił czy energii. Dzięki tym wiadomościom zrozumiesz wiele zjawisk z otaczającego cię świata i sprawnie przejdziesz do kolejnych działów fizyki.

Czy wiesz, że siły zawsze działają parami?

Dlaczego wirujący bączek odchylony od pionu się nie przewraca?

Czy możemy przewidzieć zachowanie zderzających się ciał?

Czemu służą poszczególne elementy podręcznika

Przypomnij sobie

Łatwo zorientujesz się, co powinieneś wiedzieć z wcześniejszej edukacji.

Po tej lekcji powinieneś

Podsumowanie tematu podpowie ci, które treści są w nim najważniejsze.

$\frac{y}{x} = a = \text{const}$

Dzięki czytelnym wyróżnieniom łatwo odnajdziesz wzory, definicje i ważne stwierdzenia.

Ciężar ciała o masie ...

Komentarze ułatwią ci zrozumienie informacji z tekstu głównego.

Dodatek matematyczny

Dodatki matematyczne pomogą ci opanować lub przypomnieć sobie niezbędne umiejętności i wiadomości z matematyki.

Przykład

Przykłady umożliwią ci prześledzenie toku rozumowania podczas rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania

Wykonanie poleceń i zadań na końcu tematu pozwoli ci utrwalić zdobytą wiedzę i umiejętności.

Doświadczenie 1

Doświadczenie obowiązkowe

Czytelnie opisane i zilustrowane doświadczenia ułatwią ci przeprowadzanie i analizowanie eksperymentów. Doświadczenia obowiązkowe zostały wyraźnie oznaczone.

A to ciekawe

Dzięki ciekawostkom dowiesz się interesujących faktów związanych z lekcją.

Naukowcy niepewność pomiaru wyznaczają ...

Treści wykraczające poza podstawę programową oznaczyliśmy w wyraźny sposób.

WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Podsumowanie

Na tych stronach znajdziesz najważniejsze wiadomości z danego działu.

Sposób na zadanie

Wskazówki i podpowiedzi ułatwią ci rozwiązywanie różnych typów zadań.

Zadania powtórzeniowe

Dzięki tym zadaniom sprawdzisz stopień opanowania umiejętności i wiadomości z danego działu.

4 Ruch i siły

4.1. Oddziaływania

Przypomnij sobie

- Wszystkie ciała we Wszechświecie podlegają oddziaływaniom.
- Wielkością fizyczną opisującą oddziaływanie jest siła.
- Siła jest wielkością wektorową.
- Jednostką siły jest niuton: $1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Dotychczas opisywaliśmy ruch ciał. W tym rozdziale zajmiemy się wyjaśnieniem i opisem jego przyczyn.

Doświadczenie 12

1. Wykonaj kolejno trzy proste doświadczenia:
   - Upuść lekki przedmiot na podłogę.
   - Zbliż magnes do drobnych żelaznych przedmiotów, np. gwoździków.
   - Potrzyj nadmuchany balon o ubranie i zbliż go do drobnych skrawków papieru.
2. Zastanów się i wyjaśnij, co wspólnego mają wszystkie zaobserwowane wyżej zjawiska.

Zapewne przewidziałeś, jak zakończą się doświadczenia, zanim je wykonałeś. Co jednak łączy ich wyniki? Dlaczego przedmiot spadł na podłogę, gwoździki przyczepiły się do magnesu, a papierki do balonu? Wszystko, co się dzieje wokół nas, jest skutkiem **oddziaływań** między ciałami.

Oddziaływania fundamentalne

Rodzaje oddziaływań fundamentalnych:
- grawitacyjne,
- elektromagnetyczne,
- jądrowe silne,
- jądrowe słabe.

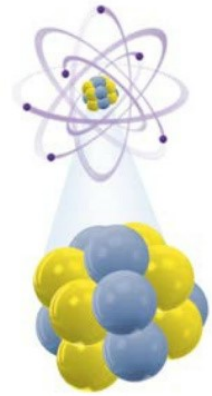
Obserwacja oddziaływań może dać mylne wrażenie, że istnieją tysiące ich typów. Okazuje się jednak, że wszystkie oddziaływania da się sprowadzić do czterech podstawowych rodzajów, zwanych **oddziaływaniami fundamentalnymi**.

- **Oddziaływanie grawitacyjne** Ziemi na nasze ciało obserwujemy na co dzień. Odgrywa ono zasadniczą rolę w ruchu ciał niebieskich. Wszystkie ciała mające masę oddziałują grawitacyjnie, choć między ciałami o małej masie oddziaływanie to jest bardzo słabe. Więcej o oddziaływaniu grawitacyjnym powiemy w trzeciej części podręcznika.

Siła grawitacji, którą Ziemia przyciąga ciało o masie m, to inaczej ciężar ciała: $F_g = mg$, gdzie $g = 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}81\ \frac{\text{N}}{\text{kg}}$ jest przyspieszeniem ziemskim.

- Gdy słyszymy o **oddziaływaniach elektromagnetycznych**, w pierwszej kolejności myślimy o prądzie elektrycznym w otaczających nas urządzeniach, o kompasie, bądź też o elektryzowaniu się ciał. To dobre skojarzenia, ponieważ oddziaływania elektromagnetyczne zachodzą między ciałami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym lub namagnesowanymi. Właśnie oddziaływanie elektromagnetyczne między jądrem atomowym a elektronami sprawia, że atom się nie rozpada.

Warto jednak pamiętać, że do tego rodzaju oddziaływań zaliczamy również poznane w szkole podstawowej oddziaływania międzycząsteczkowe, odpowiedzialne m.in. za występowanie sił spójności.
Spójrz na zdjęcie piłkarza. Niemal wszystkie opisane tam oddziaływania, z wyjątkiem grawitacyjnego, to oddziaływania pomiędzy elektronami lub pomiędzy elektronami a protonami znajdującymi się w cząsteczkach ciał – są to więc oddziaływania elektromagnetyczne. Podobnie dzięki oddziaływaniu elektromagnetycznemu między elektronami znajdującymi się w twoich stopach a elektronami znajdującymi się w cząsteczkach podłoża nie zapadasz się w głąb Ziemi.



Rys. **4.1.** Oddziaływania między nukleonami w jądrze atomowym to oddziaływania jądrowe silne. Nukleony to wspólna nazwa protonów i neutronów

- Jądra atomowe istnieją dzięki **silnym oddziaływaniom jądrowym**. Oddziaływania te występują między nukleonami w jądrze atomowym. Siły jądrowe działają na bardzo małą odległość – między sąsiednimi nukleonami i równoważą ich oddziaływania elektrostatyczne.

- Oprócz nich istnieją także **słabe oddziaływania jądrowe**, odpowiadające za rozpad niektórych izotopów promieniotwórczych.

Fizyka wokół nas

Przykłady oddziaływań

Piłka jest złożona z cząsteczek. Jak to się dzieje, że zachowuje kształt kuli i nie rozpada się na pojedyncze cząsteczki? W całości utrzymują ją oddziaływania międzycząsteczkowe. Uważna obserwacja naszego otoczenia pozwoliłaby wskazać wiele przykładów oddziaływań tego rodzaju. Tak naprawdę wszystko, co istnieje i dzieje się wokół nas, jest skutkiem oddziaływań.

Rys. **4.2.** Piłka oddziałuje na siatkę – powoduje zmianę jej kształtu, a siatka oddziałuje na piłkę – zatrzymuje ją

Oddziaływania są wzajemne

Kiedy opisujemy oddziaływania, zawsze mówimy o oddziaływaniach między ciałami, np. o oddziaływaniu między piłką a piłkarzem, a nie tylko o oddziaływaniu jednego ciała na drugie. Oddziaływania zawsze są **wzajemne**: gdy piłkarz uderzy nogą piłkę, piłka uderza piłkarza w nogę. Jeśli piłkarz kopnie piłkę mocno, może poczuć ból taki sam jak w sytuacji, gdy ktoś go uderzy.

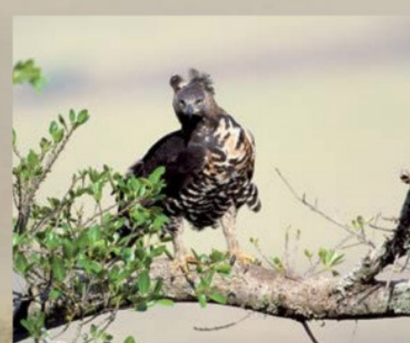
Warto pamiętać, że aby ciała oddziaływały ze sobą, nie muszą wchodzić w bezpośredni kontakt (stykać się). Dzieje się tak na przykład, gdy magnes przyciąga stalowy przedmiot znajdujący się kilka centymetrów od niego.

Fizyka wokół nas

Siłacze

Siła w świecie zwierząt pełni bardzo ważną funkcję. Jeżeli będziemy porównywać ją w wartościach bezwzględnych, zauważymy, że większe zwierzęta z reguły są w stanie unieść większą masę. Jeśli jednak siłę zwierzęcia odniesiemy do jego masy, ranking siłaczy zmieni się diametralnie. W ramce obok wyjaśniamy, dlaczego tak jest.

Słoń może podnieść 9 ton, czyli około 1,5-krotnie więcej niż sam waży.



Wojownik wspaniały potrafi unieść w locie około 16 kg, podczas gdy jego masa to niecałe 4 kg.

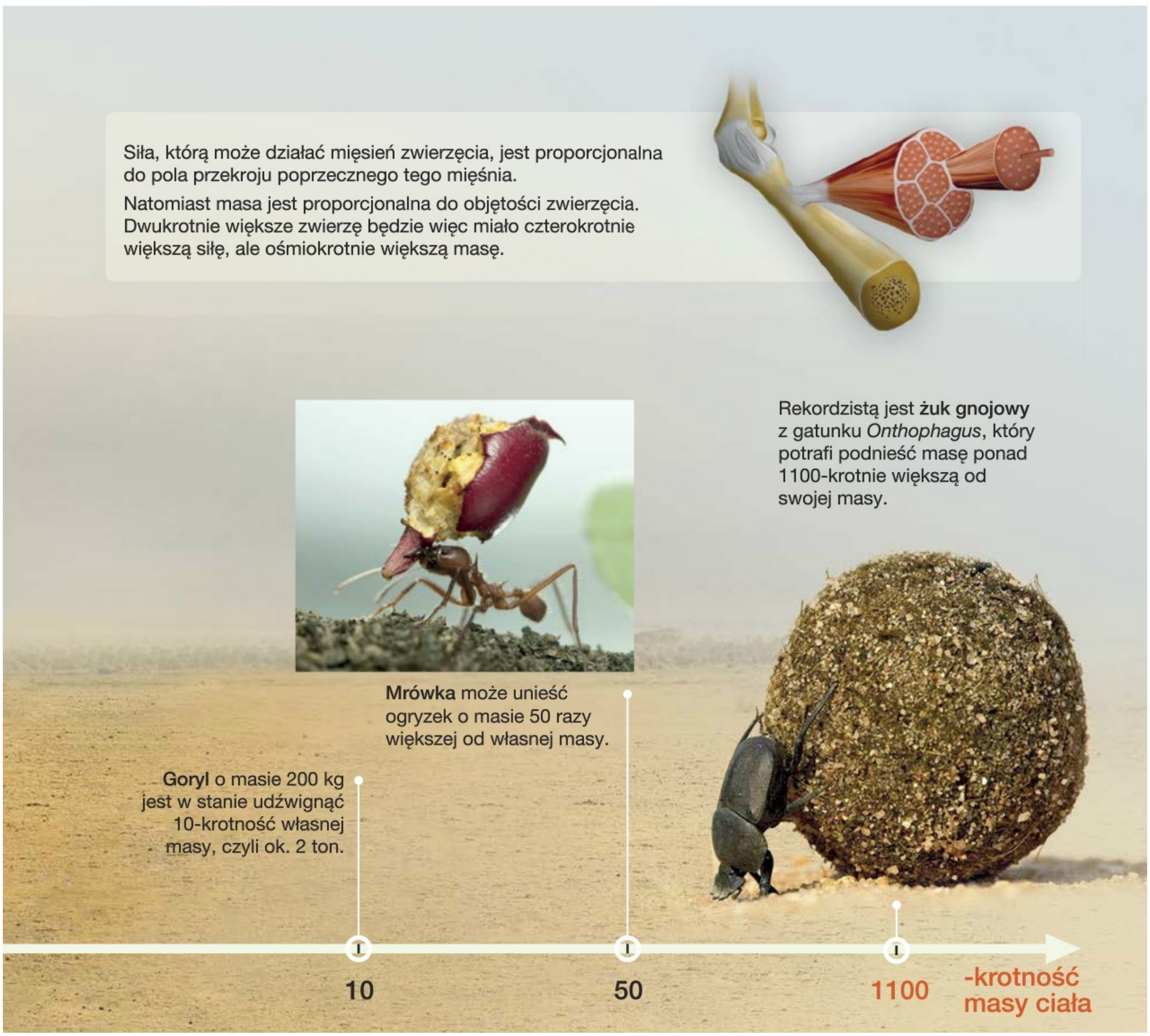
Człowiek jest w stanie udźwignąć około 2,5-krotnie więcej niż sam waży. Rekord świata mężczyzn w podnoszeniu ciężarów (w podrzucie w wadze open) wynosi 263 kg.

1,5 2,5 4

Wielkością opisującą oddziaływanie jest siła

Wielkością, której używamy do opisu oddziaływań między ciałami, jest **siła**. Oddziaływania są wzajemne, więc każdemu oddziaływaniu odpowiadają dwie siły. Gdy naciskasz palcem na stół, oddziaływanie opisują dwie siły: siła nacisku palca na stół i siła nacisku stołu na palec.

Siła jest wielkością wektorową. Ma wartość, kierunek i zwrot oraz punkt przyłożenia. O ile w przypadku wektora prędkości lub przyspieszenia wystarczyło wiedzieć, z którym ciałem jest związany dany wektor, o tyle w przypadku wektora siły **punkt przyłożenia jest bardzo istotny**. Aby się o tym przekonać, wykonaj doświadczenie opisane na następnej stronie.



Doświadczenie 13

1. Porusz drzwi, popychając je jednym palcem przyłożonym blisko klamki.
2. Następnie spróbuj poruszyć je ponownie. Użyj takiej samej siły jak poprzednio, ale tym razem przyłóż palec blisko zawiasów.
3. Zastanów się, jak wybór punktu przyłożenia siły wpłynął na wynik tego doświadczenia.

Jak widzisz, siły równe co do wartości, kierunku i zwrotu mogą mieć różne skutki, jeśli przyłożone są w różnych punktach, czyli kiedy wektory tych sił różnią się wyłącznie punktem przyłożenia.

Przypomnijmy, że jednostką siły jest **niuton**:

$$1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

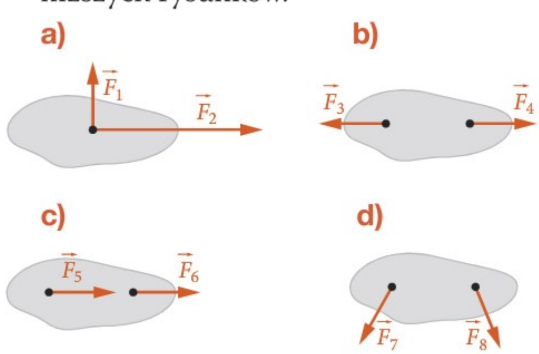
Po tej lekcji powinieneś

- dostrzegać przykłady oddziaływań w otaczającym świecie;
- wiedzieć, że oddziaływania są wzajemne;
- znać oddziaływania fundamentalne i wyjaśniać, z którym z nich mamy do czynienia w danej sytuacji;
- stosować pojęcie siły do opisu oddziaływań.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Sklejone kawałki tektury trudno rozerwać. Z którym rodzajem oddziaływań fundamentalnych mamy do czynienia w tym przypadku?
2. Wyjaśnij, czym się różnią i co mają wspólnego siły przedstawione na każdym z poniższych rysunków.



3. Gdy siedzący w kajaku człowiek wiosłuje, jego wiosło działa siłą na wodę, a nie na kajak. Dlaczego więc powoduje ruch kajaka?
4. Wykonaj doświadczenie.
   a) Włącz elektroniczną wagę kuchenną. Naciśnij na szalkę mocno jednym palcem. Jakie jest wskazanie wagi? Na jego podstawie oblicz siłę naciskającą na szalkę.

   b) Postaw na szalce butelkę wody mineralnej z nitką przywiązaną pod zakrętką. Ciągnij ze stałą siłą nitkę do góry, ale tak, aby nie podnieść butelki. Oblicz wartość siły, którą ciągniesz za nitkę. Jeśli nitka szybko się zrywa, oblicz maksymalną siłę jej naciągu.

4.2. Dodawanie sił i rozkładanie ich na składowe

Przypomnij sobie

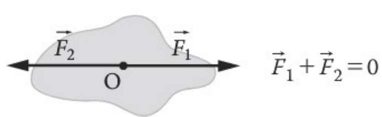
- Siła wypadkowa dwóch lub więcej sił to siła, która przyłożona do ciała, wywołałaby taki sam skutek jak wszystkie te siły łącznie.
- Wektory dodajemy metodą równoległoboku lub metodą trójkąta.

Często się zdarza, że na ciało działa jednocześnie wiele sił. W takiej sytuacji szukamy **siły wypadkowej**. Wiemy już, że siła jest wektorem, a to znaczy, że aby wyznaczyć siłę wypadkową, należy dodać do siebie wszystkie wektory sił.

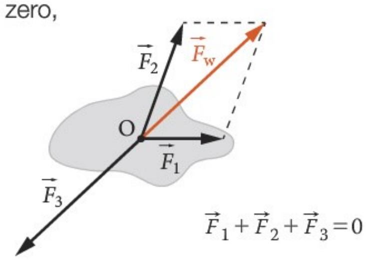
Dodatek matematyczny s. 43 i 94

Równoważenie się sił

Kiedy suma dwóch lub więcej sił działających na ciało jest równa zero, mówimy, że siły się równoważą (rys. 4.3, 4.4).



Rys. 4.3. Wypadkowa dwóch sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$, które działają wzdłuż tej samej prostej i mają jednakowe wartości, a przeciwne zwroty, jest równa zero

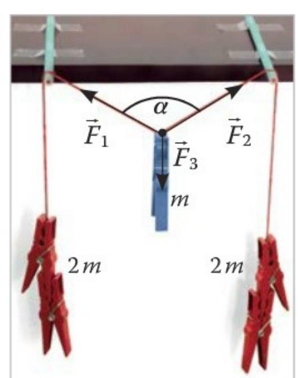


Rys. 4.4. Wypadkowa trzech różnych sił: $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ i $\vec{F}_3$ jest równa zero (wypadkową $\vec{F}_w$ sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ wyznaczono metodą równoległoboku)

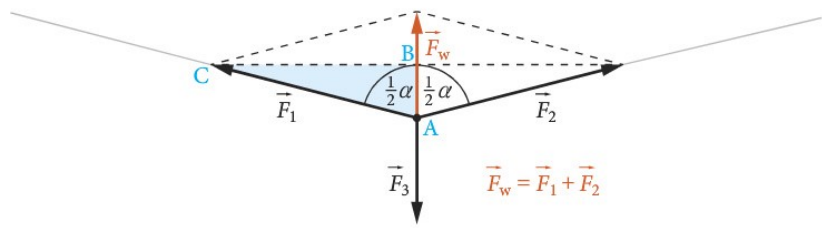
Aby siły się równoważyły, muszą działać na to samo ciało. Na przykład nacisk człowieka na podłogę i nacisk podłogi na stopy człowieka są równe co do wartości i przeciwnie skierowane, ale się nie równoważą, bo są przyłożone do różnych ciał.

Doświadczenie 14

1. Za pomocą taśmy klejącej przyklej do brzegu stołu dwa okrągłe ołówki lub długopisy i przewieś przez nie nitkę lub żyłkę z klamerkami do bielizny.
2. Przytrzymaj środkową klamerkę tak, aby odcinek nitki między ołówkami był poziomy, i puść. Klamerka opadnie do położenia, w którym siły będą się równoważyć. Kątomierzem zmierz kąt między nitkami (na zdjęciu α).
3. Pociągnij środkową klamerkę w dół i puść. Klamerka podniesie się do położenia równowagi. Ponownie zmierz kąt między nitkami.
4. Wyniki pomiarów w punktach 2. i 3. mogą się różnić ze względu na siłę tarcia. Pozwoli ci to określić średnią i niepewność pomiaru.
5. Wykonaj doświadczenie jeszcze w dwóch wersjach. Za pierwszym razem zawieś pośrodku dwie klamerki, a za drugim – trzy.



Dlaczego w doświadczeniu 14. jedna klamerka zawieszona pośrodku równoważy pozostałe klamerki?
Zajmijmy się przypadkiem, gdy pośrodku znajduje się jedna klamerka, a po bokach są po dwie klamerki. Na środek sznurka (w miejscu przywieszenia niebieskiej klamerki) działają trzy siły: $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ i $\vec{F}_3$.



Rys. **4.5.** Rozkład sił w układzie z doświadczenia 14. Wypadkowa sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ równoważy siłę $\vec{F}_3$

Zauważ, że wypadkowa sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ ma taki sam kierunek jak siła $\vec{F}_3$, ale przeciwny zwrot. Aby wszystkie trzy siły się równoważyły, wypadkowa sił $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ musi więc mieć taką samą wartość jak siła $\vec{F}_3$.
Siła $\vec{F}_3$ jest równa ciężarowi jednej klamerki ($F_3 = mg$), natomiast siły $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$ są równe ciężarowi dwóch klamerek ($F_1 = F_2 = 2mg$), więc:

$$F_1 = F_2 = 2F_3$$

Dodatek matematyczny ▶ s. 103

Na rysunku 4.5 widzimy, że trójkąt ABC jest trójkątem prostokątnym. Jeżeli poznamy długości dwóch jego boków, będziemy mogli za pomocą funkcji trygonometrycznych wyznaczyć kąt $\frac{1}{2}\alpha$. Powiążmy więc długości boków tego trójkąta z naszymi wektorami. Widzimy, że $\mathrm{AC} = F_1$, a $\mathrm{AB} = \frac{1}{2}F_w = \frac{1}{2}F_3$ (jest to połowa przekątnej rombu), możemy zatem zapisać zależność:

$$\cos\frac{\alpha}{2} = \frac{\mathrm{AB}}{\mathrm{AC}} = \frac{\frac{1}{2}F_3}{F_1} = \frac{\frac{1}{2}F_3}{2F_3} = \frac{1}{4}$$

Za pomocą kalkulatora lub tablic znajdujemy kąt, którego cosinus wynosi $\frac{1}{4}$. Ma on miarę:

$$\frac{\alpha}{2} = 76°$$

stąd:

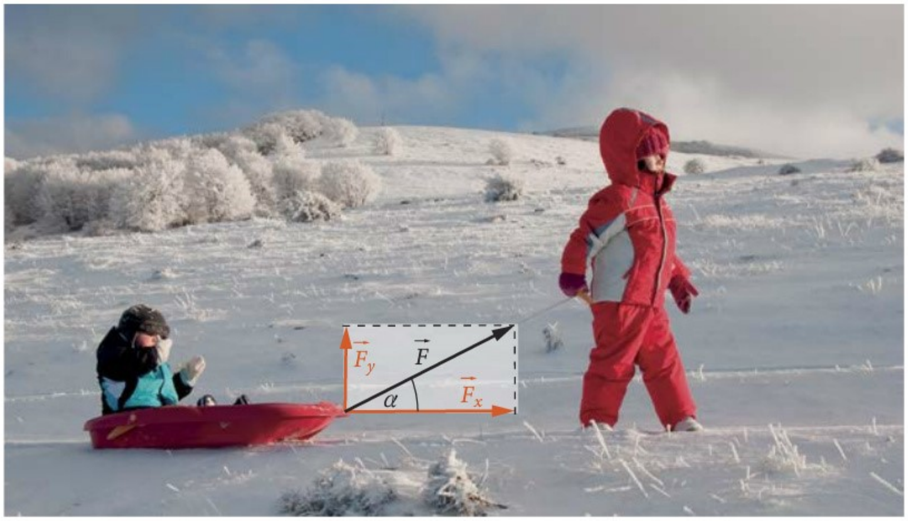
$$\alpha = 152°$$

Porównaj wynik swojego doświadczenia z wartością uzyskaną w obliczeniach. Czy mieści się ona w granicach niepewności twojego pomiaru? Wykonaj analogiczne obliczenia dla pozostałych zbadanych w doświadczeniu przypadków i porównaj je z wynikami pomiarów.

Rozkładanie sił na składowe

Dodatek matematyczny ▶ s. 94

Operacją odwrotną do dodawania wektorów jest rozkład wektora na składowe. Przykład takiego działania przedstawiono na ilustracji zamieszczonej na stronie obok (rys. 4.6).



Rys. **4.6.** Siłę $\vec{F}$ rozkładamy na składowe: $\vec{F}_x$ powodującą ruch i $\vec{F}_y$ zmniejszającą nacisk sanek na podłoże

$\sin\alpha = \frac{F_y}{F}$
zatem $F_y = F \sin\alpha$
$\cos\alpha = \frac{F_x}{F}$
zatem $F_x = F \cos\alpha$

Sznurek przymocowany do sanek jest ciągnięty przez dziecko pod pewnym kątem α do podłoża, a sanki poruszają się poziomo. Siłę $\vec{F}$, którą dziecko działa na sanki, możemy przedstawić jako sumę dwóch sił: pionowej $\vec{F}_y$ i poziomej $\vec{F}_x$. Te siły nazywamy składowymi siły $\vec{F}$.
Każda ze składowych ma znaczenie dla ruchu sanek. Składowa pozioma je napędza, a pionowa powoduje zmniejszenie nacisku na śnieg, czyli również zmniejszenie siły tarcia.

Składowe siły ciężkości na równi pochyłej

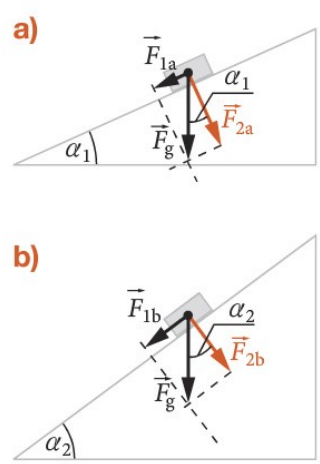
Na ilustracjach na kolejnych stronach przedstawiono narciarza na stoku. Stok ten jest przykładem równi pochyłej. Siłę ciężkości $\vec{F}_g$ działającą na narciarza rozłożyliśmy na składową $\vec{F}_1$ (równoległą do stoku) i składową $\vec{F}_2$ (prostopadłą do stoku). Siła $\vec{F}_1$ powoduje ruch narciarza, natomiast siła $\vec{F}_2$ – jego nacisk na śnieg. Na rysunku 4.7 pokazano, że im bardziej stromy stok, tym słabiej narciarz naciska na śnieg. Z tego powodu jego narty mniej się zapadają i mniejsze są opory ruchu. Obie składowe mają więc znaczenie dla ruchu narciarza. Aby obliczyć wartość sił składowych, możemy skorzystać z funkcji trygonometrycznych. Na ilustracji na stronie 137 (rys. 4.) trójkąty ABC i BCD są prostokątne, więc:

$$\sin\alpha = \frac{F_1}{F_g} \quad \text{i} \quad \cos\alpha = \frac{F_2}{F_g}$$

Wyznaczamy wartości sił F_1 i F_2:

$$F_1 = F_g \sin\alpha \qquad \text{i} \qquad F_2 = F_g \cos\alpha$$

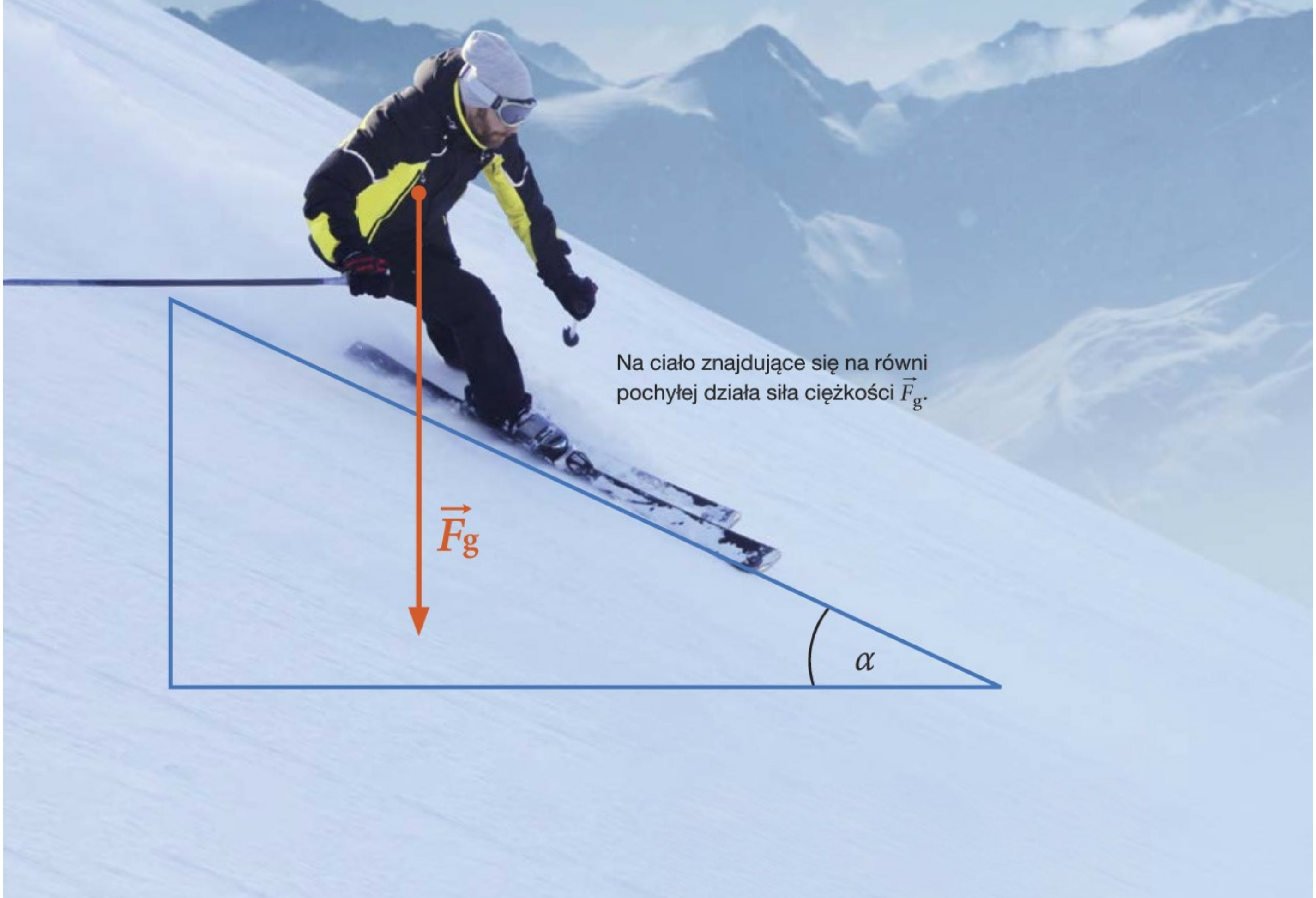
Jeśli znamy kąt nachylenia równi i masę ciała, możemy obliczyć wartości składowych siły ciężkości.



Rys. **4.7.** Im bardziej stromy stok, tym mniejsza wartość składowej prostopadłej do stoku ($F_{2b} < F_{2a}$)

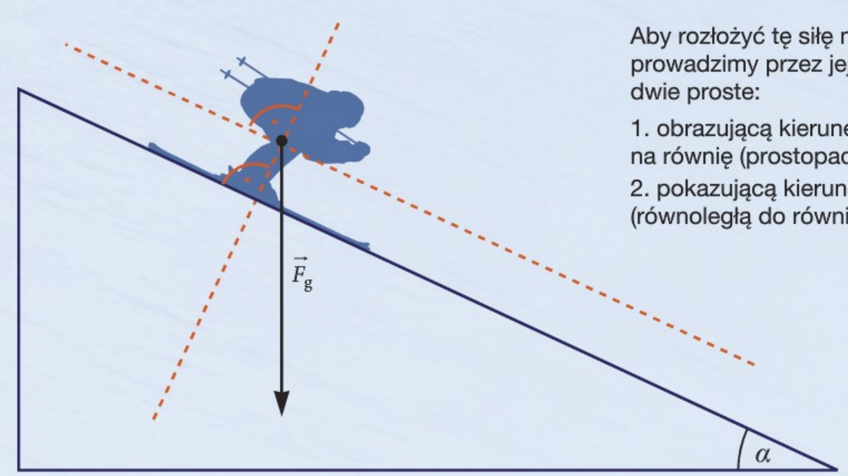
Rozkład siły ciężkości na równi pochyłej

Siłę ciężkości działającą na narciarza można rozłożyć na składowe: prostopadłą i równoległą do zbocza góry. Składowa prostopadła powoduje nacisk na śnieg, a równoległa – ruch narciarza.



Na ciało znajdujące się na równi pochyłej działa siła ciężkości $\vec{F}_g$.

1

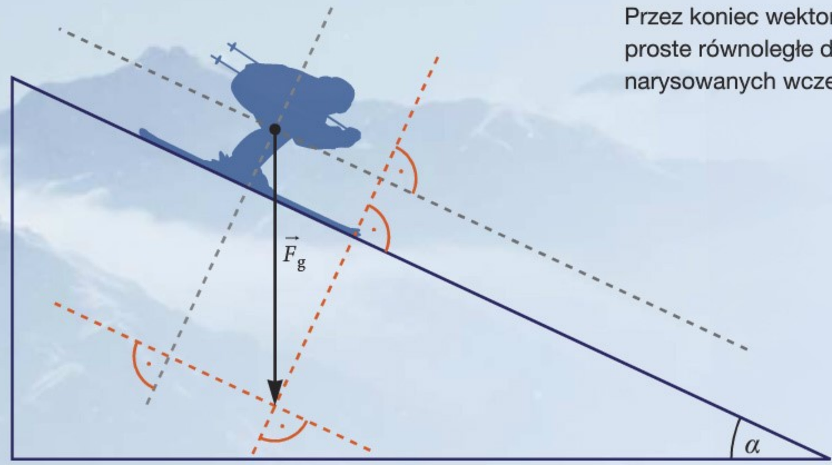


Aby rozłożyć tę siłę na składowe, prowadzimy przez jej punkt przyłożenia dwie proste:

1. obrazującą kierunek działania ciała na równię (prostopadłą do niej),
2. pokazującą kierunek poruszania się ciała (równoległą do równi).

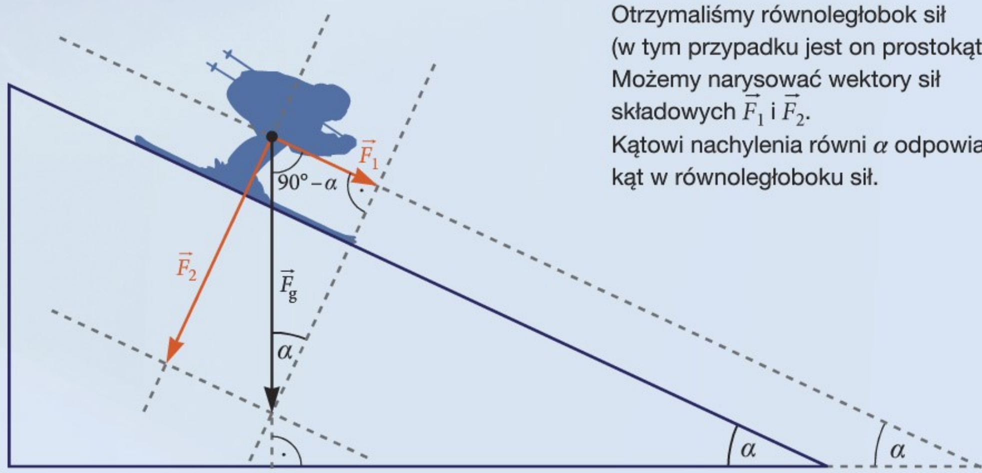
2

Przez koniec wektora $\vec{F}_g$ prowadzimy proste równoległe do prostych narysowanych wcześniej.



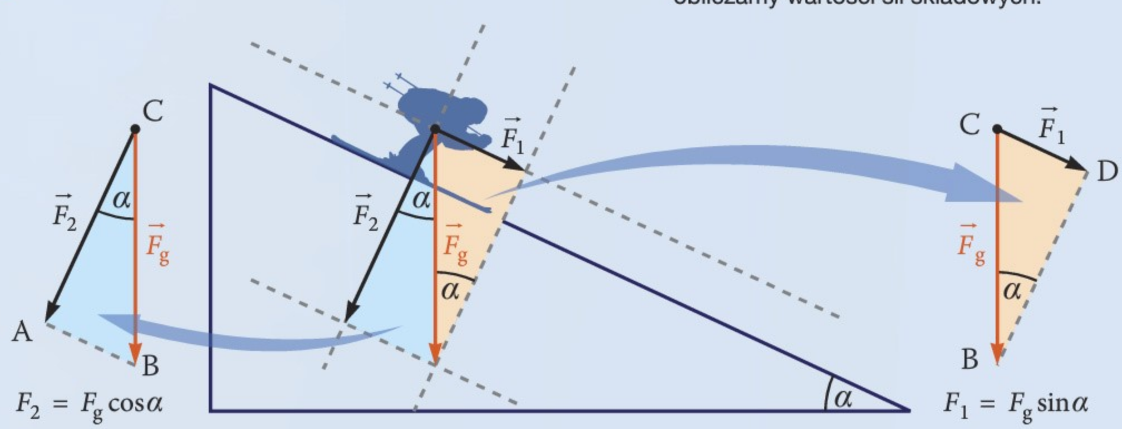
3

Otrzymaliśmy równoległobok sił (w tym przypadku jest on prostokątem). Możemy narysować wektory sił składowych $\vec{F}_1$ i $\vec{F}_2$.
Kątowi nachylenia równi α odpowiada kąt w równoległoboku sił.



4

Za pomocą funkcji trygonometrycznych obliczamy wartości sił składowych.



Po tej lekcji powinieneś

- wyznaczać wypadkową sił i wiedzieć, kiedy siły się równoważą;
- rozkładać siłę na składowe;
- wyznaczać składowe siły ciężkości na równi pochyłej.

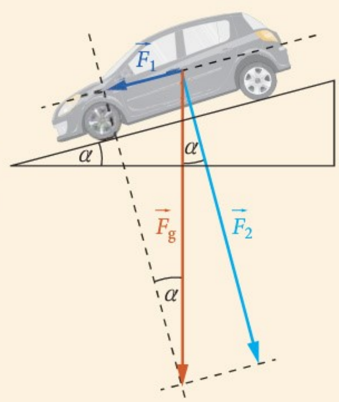
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Samochód ma masę 1000 kg. Aby go poruszyć na luzie (biegu neutralnym) i bez zaciągniętego hamulca ręcznego, potrzebna jest siła 350 N. Jak mocno nachylona może być droga, aby samochód nie stoczył się z niej samorzutnie, gdy zostawimy go na luzie bez zaciągniętego hamulca ręcznego? O ile zmniejszy się nacisk samochodu na drogę w przypadku takiej pochyłości w stosunku do drogi poziomej?

Rozwiązanie



Nachylona droga to przykład równi pochyłej. Szukany kąt nachylenia oznaczmy α. Ciężar samochodu $F_g = mg$ rozkładamy na siłę równoległą do drogi o wartości F_1 i prostopadłą do drogi o wartości F_2, tak jak na rysunku.
Siły te mają wartości (patrz infografika s. 136–137):

$$F_1 = F_g \sin\alpha = mg\sin\alpha$$

$$F_2 = F_g \cos\alpha = mg\cos\alpha$$

Dla pewnego kąta α_{tocz} siła F_1 osiąga wartość $F_{1\,tocz}$ = 350 N, a wówczas samochód zaczyna się toczyć. Dla tego kąta możemy zapisać:

$$F_{1\,tocz} = mg\sin\alpha_{tocz} \quad\longrightarrow\quad \sin\alpha_{tocz} = \frac{F_{1\,tocz}}{mg}$$

W naszym przypadku:

$$\sin\alpha_{tocz} = \frac{350\text{ N}}{1000\text{ kg}\cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 0{,}035$$

Za pomocą tablic albo kalkulatora znajdujemy kąt, którego sinus wynosi około 0,035:

$$\alpha_{tocz} \approx 2°$$

W tej sytuacji nacisk samochodu na drogę będzie stanowił następujący ułamek jego nacisku na poziomą drogę (czyli ciężaru samochodu):

$$\frac{F_2}{F_g} = \frac{mg\cos\alpha_{tocz}}{mg} = \cos\alpha_{tocz} = \cos 2° \approx 0{,}9994 = 99{,}94\%$$

Odpowiedź: Samochód nie będzie się staczał, gdy nachylenie drogi nie przekroczy 2°. Nacisk samochodu na drogę będzie o 0,06% mniejszy niż na poziomej drodze.

Uwaga. Aby popchnąć samochód, musimy pokonać opory ruchu, z których część to opory mechanizmu, a część – opory wynikające z toczenia opon po szosie. Te drugie zależą od nacisku samochodu na szosę, ale jak widać z drugiej części odpowiedzi, zmniejszenie nacisku jest tak niewielkie, że mogliśmy go nie brać pod uwagę podczas rozwiązywania zadania.

1. Oblicz wartość siły wypadkowej dwóch prostopadłych sił o wartościach 40 N i 60 N. Skorzystaj z twierdzenia Pitagorasa. Zmierz na starannie wykonanym w zeszycie rysunku miarę kąta, jaki tworzy ta wypadkowa z siłą o wartości 60 N.

2. Aby samochód o masie 1100 kg ruszył na poziomej drodze, musi na niego działać siła 500 N. Jaką minimalną siłą trzeba działać, aby poruszyć ten sam samochód pod górę na drodze o kącie nachylenia 5°? Przyjmij, że na obu drogach są takie same opory ruchu.

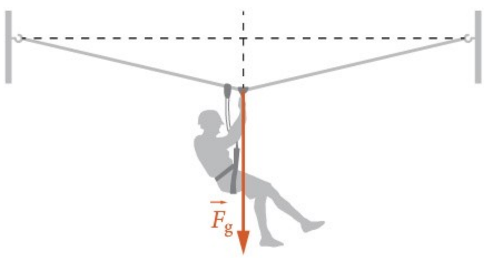
3. W parku linowym linę rozpięto pomiędzy dwoma drzewami. Jej końce przywiązano do haków, które z kolei przymocowano do pni drzew. Odległość między hakami wynosi 4 m, a długość liny 5 m. Na środku liny, na uprzęży, wisi dziewczyna o masie 54 kg. Ile wynosi siła działająca na każdy z haków?

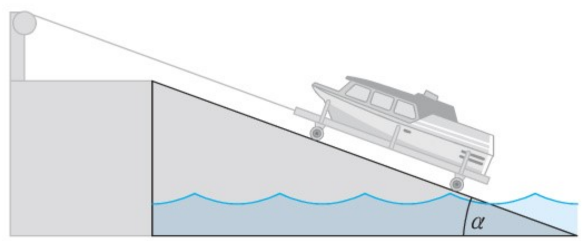
4. Do wodowania łodzi lub wyciągania ich na brzeg wykorzystuje się układ złożony z pochylni schodzącej z lądu do wody, wózka kołowego i wciągarki. Łódź wraz z wózkiem mają masę 250 kg. Pochylnia to równia pochyła o kącie nachylenia do poziomu 20°. Wykonaj polecenia, pomiń siłę tarcia.

   a) Rozłóż siłę ciężkości wózka z łodzią na składowe działające równolegle i prostopadle do powierzchni równi.

   b) Oblicz naprężenie liny, gdy łódź z wózkiem pozostaje nieruchoma na pochylni.

   c) Oblicz łączną siłę nacisku kółek wózka na platformę.





4.3. Pierwsza i druga zasada dynamiki

Przypomnij sobie

- Jeśli wypadkowa sił działających na ciało jest równa zero, to ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (pierwsza zasada dynamiki).
- Bezwładność jest cechą każdego ciała.
- Jeśli wypadkowa F_w sił działających na ciało o masie m nie jest równa zero, to ciało porusza się z przyspieszeniem $a = \frac{F_w}{m}$ (druga zasada dynamiki).

Opory ruchu

Doświadczenie 15

1. Mocno zmrożoną kostkę lodu pchnij po szybie leżącej na stole.
2. Obserwuj ruch kostki lodu.
3. Opisz siły działające na kostkę lodu.

Powyższe doświadczenie pozwala zaobserwować sytuację, w której siła wypadkowa działająca na ciało jest bardzo mała.
Czy ciało może się poruszać, gdy nie działa na nie żadna siła? Codzienne obserwacje mogą nie wystarczyć do odpowiedzi na to pytanie. Popchnięta szafa zatrzymuje się natychmiast, gdy przestaniemy ją pchać. Samochód na prostej, poziomej drodze jedzie jeszcze przez jakiś czas po wyłączeniu silnika, ale w końcu się zatrzymuje. Z kolei krążek hokejowy może przemieścić się na drugi koniec lodowiska, ale popchnięty po asfalcie zatrzyma się znacznie szybciej.
W rzeczywistości w każdej z opisanych sytuacji na ciało działają siły, które nazywamy **siłami oporów ruchu**: siła tarcia i siła oporu powietrza. Im mniejsze są te siły, tym dłuższą drogę pokonuje ciało bez zatrzymania. W doświadczeniu mieliśmy sytuację bardzo zbliżoną do ujętej w pierwszej zasadzie dynamiki, choć precyzyjne pomiary wykazałyby zmniejszanie się prędkości nawet przy tak minimalnych oporach ruchu.

Siły oporów ruchu:
- tarcie,
- opór ośrodka, np. powietrza.

Pierwsza zasada dynamiki

Gdyby usunąć wszystkie siły działające na ciało, w tym opory ruchu, to ciało, któremu została nadana pewna prędkość początkowa, poruszałoby się z tą prędkością ruchem prostoliniowym tak długo, aż jakaś siła nie zmieniłaby tego stanu.
Na ogół nie da się zlikwidować oporów ruchu, można jedynie zrównoważyć je za pomocą innej siły. Na przykład, gdy samochód porusza się

ruchem jednostajnym prostoliniowym, to opory ruchu $\vec{F}_o$ są zrównoważone przez siłę $\vec{F}$ działającą do przodu (rys. 4.8). Jest to przykład zastosowania **pierwszej zasady dynamiki**, która brzmi:

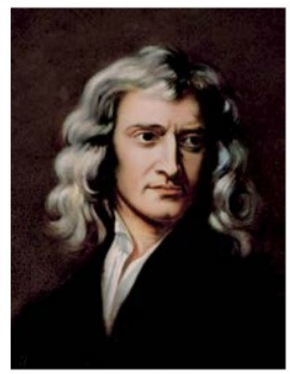
Rys. **4.8.** Podczas jazdy ze stałą prędkością siły działające na pojazd się równoważą ($F_o = F$)

> Jeśli na ciało nie działa żadna siła albo działające na nie siły się równoważą, ciało spoczywające będzie nadal spoczywać, a ciało poruszające się wciąż będzie się poruszać z tą samą prędkością po linii prostej.

Właściwość ciał polegającą na tym, że zmiana ich prędkości wymaga działania siły, nazywamy **bezwładnością**. Na podstawie pierwszej zasady dynamiki można stwierdzić, że bezwładność jest cechą wszystkich ciał. Dlatego też pierwszą zasadę dynamiki nazywamy często **zasadą bezwładności**.

Od Arystotelesa do Newtona

Przez niemal dwa tysiące lat w nauce panował pogląd sformułowany przez **Arystotelesa**, że do utrzymania ciała w ruchu jednostajnym prostoliniowym konieczna jest siła. Arystoteles nie traktował oporów ruchu, np. tarcia, jako jednej z sił działających na ciało. Dopiero **Galileusz** na podstawie własnych doświadczeń wyraził pogląd, że do podtrzymania ruchu nie jest potrzebna żadna siła. On pierwszy zrozumiał, że jeżeli usuniemy przeszkody ruchu, to zniknie potrzeba podtrzymywania go przez siłę wypadkową. Galileusz nie potrafił jednak podać zasady bezwładności. Nie znał pojęcia siły ciężkości i dlatego przyjął, że gdyby ciało puszczone po powierzchni Ziemi miało poruszać się po prostej, to byłaby ona styczna do powierzchni Ziemi, więc po odpowiednio długim czasie ciało znalazłoby się na dużej wysokości, co – jak słusznie uznał – nie powinno się zdarzyć w sytuacji, gdy nie działa na nie żadna siła.



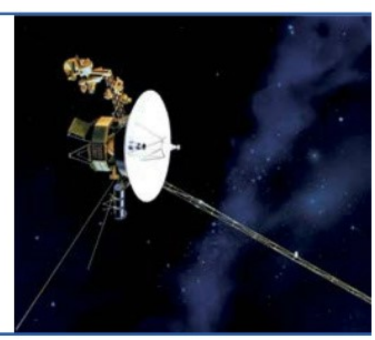
Rys. **4.9.** Izaak Newton

Zasadę bezwładności sformułował ostatecznie **Izaak Newton** w 1687 r. W dziele *Matematyczne podstawy filozofii przyrody* ujął ją następująco:

> „Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub w ruchu jednostajnym o stałym kierunku, dopóki nie zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez działające na nie siły”.

A to ciekawe

Przykładem ciała, na które działają minimalne siły, jest sonda kosmiczna przebywająca z dala od ciał niebieskich, np. Voyager 1 (czyt. wojadżer), która w roku 2012 opuściła Układ Słoneczny i jako pierwszy pojazd zbudowany na naszej planecie rozpoczęła podróż międzygwiezdną. W odległości ponad 18 mld km od Słońca nasza gwiazda działa na nią siłą grawitacji o wartości około 25 mln razy mniejszej niż ciężar sondy na Ziemi. Jej prędkość (około 15 $\frac{km}{s}$) pozostaje w tej sytuacji niemalże stała.



Druga zasada dynamiki

Gdy działające na ciało siły się nie równoważą, jego prędkość się zmienia, co oznacza, że porusza się ono z pewnym przyspieszeniem. Zbadamy, jak to przyspieszenie zależy od działającej siły.

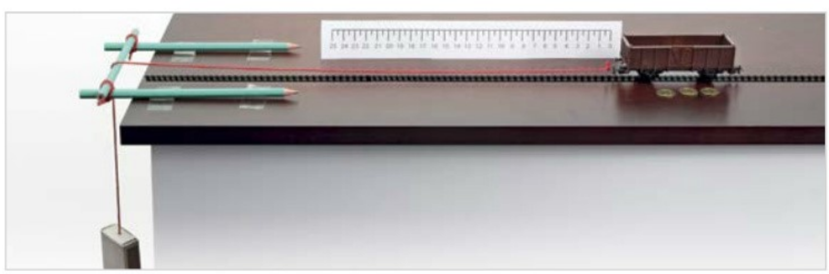
Doświadczenie 16

Jeżeli używasz samochodzika, przymocuj do niego od góry wewnętrzną część pustego pudełka od zapałek.

1. Przygotuj mały, zabawkowy wagonik lub samochodzik. Od strony podwozia lub zderzaka przyczep nitkę długości ok. 70 cm tak, aby można było za nią ciągnąć pojazd. Drugi koniec nitki przyklej, np. taśmą klejącą, do wewnętrznej części pudełka od zapałek, i nasuń na nią zewnętrzną część tego pudełka.
2. Postaw pojazd na stole, równolegle do jego dłuższej krawędzi. Za nim (patrząc od strony dłuższego boku stołu) umieść podziałkę centymetrową. Wykonaj bloczek z ołówków i taśmy klejącej (patrz zdjęcie). Przewieś przez niego nitkę przyczepioną do pojazdu.
3. Umieść z boku układu kamerę tak, aby mogła filmować ruch pojazdu wzdłuż podziałki.
4. Do wagonika lub pudełka na samochodziku włóż trzy monety jednogroszowe, a do pudełka wiszącego na sznurku – jedną. Puść pojazd od punktu 0 podziałki, a pudełko na nitce pociągnie go i wprawi w ruch przyspieszony. Sfilmuj ten ruch.
5. Powtórz doświadczenie jeszcze 3 razy – za każdym razem przekładaj po jednej monecie z pojazdu do wiszącego pudełka.
6. Na podstawie filmu wyznacz przyspieszenie układu w każdym przypadku. Możesz skorzystać z programu Tracker (patrz projekt s. 119).
7. Oblicz siłę działającą w każdym z przedstawionych przypadków. Zaznacz wartości przyspieszenia i siły w układzie współrzędnych. Narysuj wykres przedstawiający zależność przyspieszenia pojazdu (i całego układu) od działającej siły. Jaki kształt ma ten wykres?
8. Zastanów się nad rolą oporów ruchu w tym doświadczeniu i pomyśl, jak można je zminimalizować.

Wyznaczanie przyspieszenia na podstawie filmu s. 76–78

masa pudełka od zapałek = 4 g
masa jednogroszowej monety = 1,64 g



Zauważ, że w kolejnych etapach doświadczenia masa *m* całego układu jest stała, równa sumie mas pojazdu, pudełka i monet. Chociaż pudełko porusza się w pionie, a wagonik w poziomie, przyspieszenie układu jest co do wartości takie samo jak w przypadku ciała o masie *m* poruszającego się po prostej.

Na podstawie tego doświadczenia możemy stwierdzić, że przy stałej masie układu przyspieszenie nie tylko rośnie wraz z działającą siłą, lecz także jest do niej wprost proporcjonalne.

Jeśli $m = \text{const}$, przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do działającej siły $\boldsymbol{a \sim F}$.

Zbadajmy, jak przyspieszenie ciała zależy od jego masy. W tym celu wykorzystajmy układ z poprzedniego doświadczenia.

Doświadczenie 17

1. Do wiszącego pudełka włóż monetę jednogroszową, a do wagonika lub pudełka na samochodziku monetę jednozłotową. Puść pojazd i sfilmuj jego ruch.
2. Zważ wagonik lub samochodzik (wraz z zamocowaną na nim wewnętrzną częścią pudełka), nitkę z wiszącym pudełkiem i użytymi monetami.
3. Powtórz doświadczenie kilkakrotnie i za każdym razem zwiększaj liczbę monet włożonych do wagonika. Możesz dokładać od razu po kilka monet, aby w kolejnych pomiarach masa układu znacznie się różniła.
4. Sporządź wykresy zależności przyspieszenia od masy $a(m)$ i przyspieszenia od odwrotności masy $a(\frac{1}{m})$. Pamiętaj, że masa całego układu obejmuje także wiszące pudełko i jego zawartość. Który z narysowanych wykresów ma kształt prostej?

Jeśli nie masz wagi, do wyznaczenia masy możesz wykorzystać dźwignię (patrz s. 244).

Z doświadczenia wnioskujemy, że przyspieszenie wywołane przez stałą siłę jest odwrotnie proporcjonalne do masy ciała – wykres zależności $a(\frac{1}{m})$ jest linią prostą. Zgadza się to z codziennymi obserwacjami. Na przykład mocno obciążony samochód rozpędza się wolniej niż pusty.
Gdy połączymy wyniki obu ostatnich doświadczeń, możemy sformułować **drugą zasadę dynamiki**:

Jeśli $F = \text{const}$, przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do odwrotności masy ciała: $\boldsymbol{a \sim \frac{1}{m}}$.

Przyspieszenie, z którym porusza się ciało o masie m, jest wprost proporcjonalne do siły wypadkowej $\vec{F}$ działającej na to ciało i odwrotnie proporcjonalne do jego masy. Kierunek i zwrot przyspieszenia są takie same jak kierunek i zwrot siły:

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

Wartość przyspieszenia ciała jest tym większa, im większą siłę przyłożymy.

Wzór ten możemy zapisać również w przekształconej postaci:

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

Na podstawie tego wzoru definiujemy jednostkę siły: 1 N jest to siła, która ciału o masie 1 kg nadaje przyspieszenie $1\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Jednostka siły – **niuton**
$1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Ruch przyspieszony – różne możliwości

Poruszanie się z przyspieszeniem nie zawsze oznacza zwiększanie się wartości prędkości. Gdy siła wypadkowa (a więc i przyspieszenie) jest skierowana zgodnie z wektorem prędkości, wartość prędkości rośnie. Kiedy siła skierowana jest przeciwnie do prędkości – wartość prędkości maleje. Siła prostopadła do wektora prędkości powoduje zmianę jego kierunku – jest tak zawsze w ruchu jednostajnym po okręgu (więcej w lekcji 4.6). Jeśli siła nie jest ani równoległa, ani prostopadła do kierunku ruchu, możemy ją rozłożyć na składowe: równoległą i prostopadłą do tego kierunku.

Rys. **4.10.** Siłę wypadkową $\vec{F}$ działającą na samochód możemy rozłożyć na składowe:
- $\vec{F}_1$ powodującą zwiększenie wartości prędkości,
- $\vec{F}_2$ powodującą zmianę kierunku ruchu

Składowa równoległa powoduje zmianę wartości prędkości, a składowa prostopadła – zmianę kierunku ruchu (rys. 4.10).

Niezależność ruchów

Możemy postąpić także inaczej – rozłożyć zarówno prędkość, jak i siłę na składowe zgodnie z kierunkami wybranego przez nas układu współrzędnych, np. składową poziomą i pionową. Każda ze składowych siły powoduje zmianę odpowiedniej składowej prędkości.
W ten właśnie sposób można wyjaśnić niezależność ruchów, o której mówiliśmy podczas omawiania rzutu poziomego, w którym siła ma kierunek pionowy. Jej pozioma składowa jest więc równa zero, dlatego ruch w kierunku poziomym jest jednostajny. Składowa pionowa tej siły jest równa ciężarowi ciała, dlatego ruch w pionie zachodzi tak jak spadek swobodny.

Masa jako miara bezwładności

Wiesz już, że bezwładność jest cechą ciała, z której powodu zmiana jego prędkości wymaga działania siły. Z drugiej zasady dynamiki wynika, że im większa jest masa ciała, tym trudniej zmienić jego prędkość. Bezwładność ciała jest więc tym większa, im większa jest jego masa.

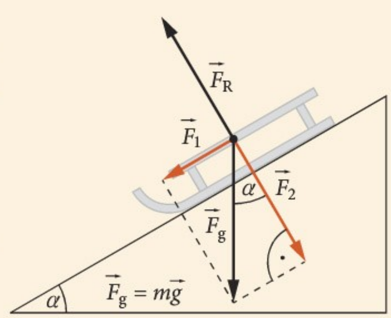
> Masa jest miarą bezwładności ciała.

Po tej lekcji powinieneś
- umieć zbadać doświadczalnie zależność przyspieszenia ciała od jego masy i działającej na nie siły;
- stosować pierwszą i drugą zasadę dynamiki do opisu zjawisk i rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Sanki pozostawione na oblodzonym stoku zaczęły zjeżdżać i w ciągu pierwszych 2 s przebyły drogę 8 m. Ile wynosił kąt nachylenia stoku do poziomu? Pomiń tarcie.



Rozwiązanie

Najpierw obliczymy przyspieszenie sanek. Wyznaczymy je ze wzoru na drogę w ruchu jednostajnie przyspieszonym:

$$s = \frac{1}{2}at^2 \longrightarrow a = \frac{2s}{t^2}$$

Po podstawieniu danych liczbowych uzyskujemy: $a = \frac{2 \cdot 8\ \mathrm{m}}{(2\ \mathrm{s})^2} = 4\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Przyspieszenie to było wywołane działaniem składowej siły ciężkości $\vec{F_1}$ równoległej do stoku, więc zgodnie z drugą zasadą dynamiki: $F_1 = ma$. Z rozłożenia siły ciężkości na składowe (patrz rys.) $F_1 = F_g \sin\alpha$, czyli $F_1 = mg \sin\alpha$. Przyrównujemy wzory na siłę F_1 i otrzymujemy:

$$ma = mg\sin\alpha \quad \longrightarrow \quad \sin\alpha = \frac{a}{g}$$

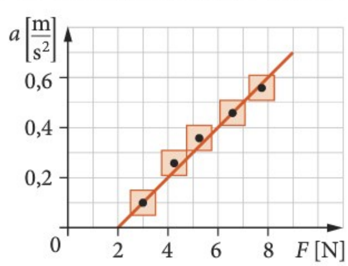
Podstawiamy dane i uzyskujemy: $\sin\alpha = \dfrac{4\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0{,}41.$

Miarę kąta, którego sinus wynosi 0,41, możemy obliczyć za pomocą kalkulatora lub odczytać z tablic. Otrzymujemy wynik: $\alpha \approx 24°$.

Odpowiedź: Stok był nachylony pod kątem około 24°.

1. Samochód jechał z prędkością $10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$, a następnie w czasie 4 s rozpędził się do $18\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Masa samochodu wynosiła 1500 kg. Oblicz siłę wypadkową, która spowodowała jego rozpędzenie.

2. Uczniowie badali zależność przyspieszenia pudełka przesuwającego się po stole od siły, którą jest ono ciągnięte. Wyniki pomiarów wraz z niepewnościami pomiarowymi zaznaczyli w układzie współrzędnych i dopasowali do nich prostą (rys. poniżej).

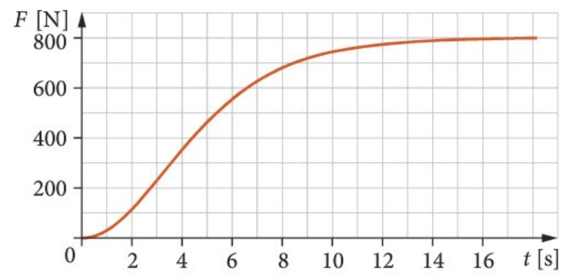


a) Dlaczego dopasowana prosta nie przechodzi przez początek układu współrzędnych?

b) Wyznacz masę pudełka.

3. Na wykresie przedstawiono siłę oporu powietrza działającego na spadochroniarza przed otwarciem spadochronu w zależności od czasu. Naszkicuj w zeszycie wykres zależności przyspieszenia tego spadochroniarza od czasu. Przyjmij, że $g \approx 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Wskazówka. Spadochroniarz przyspiesza do prędkości, przy której opór powietrza równoważy jego ciężar.



4. Wykonaj doświadczenie.

a) W dnie plastikowej butelki wykonaj otwór i przewlecz przez niego od zewnątrz nić przywiązaną do gwoździka lub zapałki.

b) Zatkaj palcem otwór w dnie butelki. Nalej do niej tyle wody, aby ją obciążyć, lecz jednocześnie nie nadwyrężyć nici, tzn. tyle, aby nić nie była zbyt mocno naciągnięta i nie urwała się pod ciężarem butelki. Zakręć butelkę.

c) Powieś butelkę na nici. Uważaj, aby poniżej nie znalazły się inne przedmioty, które mogłyby zostać uszkodzone.

d) Do końca butelki z nakrętką przymocuj taką samą nitkę.

e) Ciągnij w dół wolny koniec nitki: za pierwszym razem – stopniowo zwiększając siłę, za drugim – szarpiąc nitkę.

f) Urywa się dolna czy górna nitka? Od czego to zależy?

g) Wyjaśnij wyniki doświadczenia.

4.4. Trzecia zasada dynamiki

Przypomnij sobie

- Oddziaływania ciał są zawsze wzajemne.
- Jeżeli ciało A działa na ciało B pewną siłą, to ciało B oddziałuje na ciało A siłą równą co do wartości, mającą ten sam kierunek, ale przeciwny zwrot i inny punkt przyłożenia.

Trzecia zasada dynamiki

$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

$F_{AB} = F_{BA}$

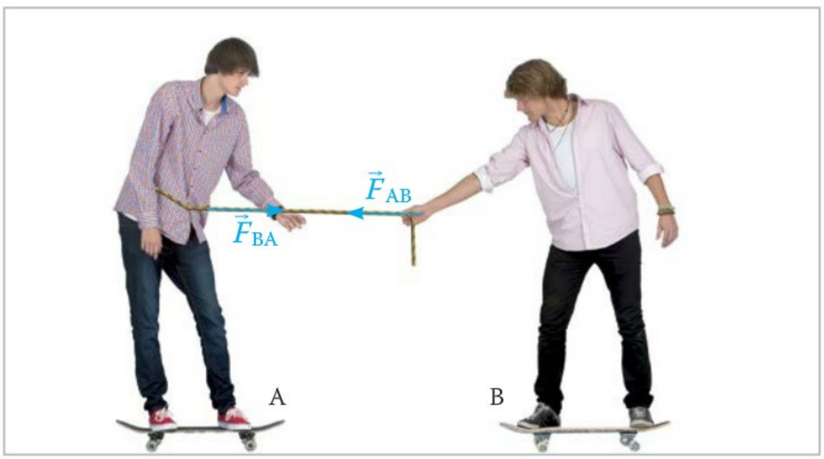
Siły te mają jednakową wartość, ten sam kierunek, ale przeciwne zwroty i różne punkty przyłożenia.

Wzajemność oddziaływań

Wykonajmy proste doświadczenie, aby przekonać się o wzajemności oddziaływań.

Doświadczenie 18

1. Dwie osoby stają naprzeciw siebie na jednakowych deskorolkach. Powinny przyjąć taką pozycję, aby po ewentualnym zadziałaniu siły przesuwały się z niewielkimi oporami w przód lub w tył.
2. Jedna z osób obwiązuje się w pasie liną tak, aby pętla na niej się nie zaciągała.
3. Druga osoba chwyta wolny koniec liny i ciągnie. Co obserwujecie?



W doświadczeniu obserwujemy, że poruszają się obie osoby. Zauważmy, że ruch odbywa się wzdłuż tej samej prostej, ale w przeciwne strony. Osoba A porusza się w prawo, a osoba B w lewo.

Fakt, że porusza się osoba obwiązana liną w pasie, nas nie dziwi. Ale kto ciągnie drugą z osób uczestniczących w doświadczeniu?

Ruch ten nie powinien jednak stanowić zaskoczenia, jeżeli przypomnimy sobie o wzajemności oddziaływań, o której mówiliśmy podczas omawiania lekcji 4.1.

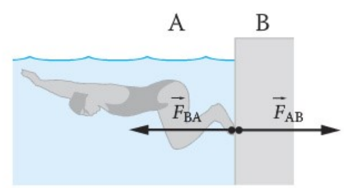
Trzecia zasada dynamiki

Wnioski z tego i innych doświadczeń prowadzą do **trzeciej zasady dynamiki** Newtona, która brzmi:

> Gdy ciało A działa na ciało B siłą $\vec{F}_{AB}$, to ciało B działa na ciało A siłą $\vec{F}_{BA}$. Siły te mają jednakową wartość i jednakowy kierunek, ale przeciwne zwroty i różne punkty przyłożenia.

Warto zauważyć, że **działanie sił $\vec{F}_{AB}$ i $\vec{F}_{BA}$ jest równoczesne** oraz że **ich natura jest jednakowa**: albo są to dwie siły grawitacyjne, albo dwie siły magnetyczne itd. Gdy szafa stoi na podłodze i działa na nią pewną siłą nacisku, wtedy podłoga także działa na szafę pewną siłą nacisku. Drugą z opisanych sił nazywamy czasami *siłą reakcji*, ale nazwa ta nie powinna sugerować, że chodzi o jakiś inny rodzaj siły.

Często skutków działania jednej z sił wzajemnego oddziaływania nie możemy bezpośrednio zaobserwować. Na przykład, gdy pływak odpycha się od ściany basenu przy zmianie kierunku ruchu, nie widzimy, że odpycha ją do tyłu. Ruchu ściany basenu nie obserwujemy, gdyż razem z nią pływak pcha cały budynek i całą Ziemię, a jak wiemy z poprzedniej lekcji, ogromna masa i bezwładność Ziemi sprawiają, że działaniem na nią siłą mięśni nie spowodujemy zauważalnej zmiany jej ruchu.



Rys. **4.11.** Pływak pcha ścianę siłą $\vec{F}_{AB}$, a ściana pcha pływaka siłą $\vec{F}_{BA}$. To ta druga siła powoduje ruch pływaka

Trzecia zasada dynamiki zawsze towarzyszy nam, gdy chcemy wprawić w ruch własne ciało albo pojazd, w którym się znajdujemy. Aby poruszać się w określoną stronę, musimy zadziałać na jakieś inne ciało siłą skierowaną w stronę przeciwną. Zwróć uwagę na pływaka (rys. 4.11): chce on popłynąć w lewo, a siła, jaką działa na ścianę basenu, ma zwrot w prawo. Jeżeli płyniesz kajakiem, to wiosłami odpychasz wodę „do tyłu", aby przemieszczać się „do przodu". Podobnie opona samochodu działa na nawierzchnię szosy pewną siłą, a szosa popycha samochód do przodu.

Siły wzajemnego oddziaływania

Pamiętajmy, że **siły wzajemnego oddziaływania się nie równoważą**. Wiemy, że dwie siły równoważą się, jeśli mają jednakową wartość, jednakowy kierunek i przeciwne zwroty, działają wzdłuż jednej prostej oraz działają na to samo ciało. Siły wzajemnego oddziaływania spełniają pierwsze cztery spośród wymienionych warunków, ale nie spełniają ostatniego, gdyż są przyłożone do różnych ciał. Dlatego nigdy się nie równoważą.

Równoważenie się sił
s. 133

Po tej lekcji powinieneś

- stosować trzecią zasadę dynamiki do opisu zjawisk;
- wskazywać siły wzajemnego oddziaływania;
- wiedzieć, kiedy siły się równoważą.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

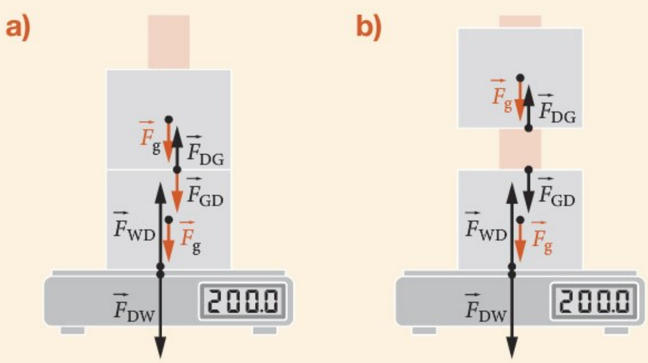
Przykład

Na szalce wagi stawiamy naczynie w kształcie walca wykonane z materiału innego niż żelazo. Nakładamy na nie dwa magnesy w kształcie pierścieni ustawione do siebie różnoimiennymi biegunami (złączone – patrz rys. a). Odczytujemy wskazanie wagi. Następnie rozdzielamy magnesy i ponownie umieszczamy na walcu: dolny tak jak poprzednio, a górny odwrócony. Górny magnes unosi się w powietrzu, gdyż jego ciężar został zrównoważony przez odpychanie magnetyczne (patrz zdjęcie i rys. b). Czy (i jak) zmieni się wskazanie wagi?

Rozwiązanie

Waga służy do pomiaru masy, który w rzeczywistości odbywa się poprzez mierzenie nacisku ważonego ciała na szalkę.

Narysujmy wektory sił działających między opisanymi ciałami w obu częściach doświadczenia. Pominiemy walec, gdyż zawsze naciska on na wagę taką samą siłą, nie wpływa więc na ewentualną zmianę wskazań wagi.



Oznaczenia:
$\vec{F}_g$ – siła ciężkości działająca na każdy z magnesów,
$\vec{F}_{GD}$ – siła, którą górny magnes działa na dolny,
$\vec{F}_{DG}$ – siła, którą dolny magnes działa na górny,
$\vec{F}_{DW}$ – siła oddziaływania dolnego magnesu na wagę,
$\vec{F}_{WD}$ – siła oddziaływania wagi na dolny magnes

Uwaga. Wszystkie zaznaczone na rysunkach siły w rzeczywistości działają wzdłuż jednej prostej.

Odpowiadające sobie siły na rysunkach a) i b) mają takie same: wartość, kierunek i zwrot. Różna jest tylko przyczyna działania sił $\vec{F}_{GD}$ i $\vec{F}_{DG}$. W pierwszym przypadku każda z nich stanowi wypadkową siły przyciągania magnetycznego oraz siły nacisku jednego magnesu na drugi. W drugim jest to po prostu siła odpychania magnetycznego. Zauważ, że w obu przypadkach siła $\vec{F}_{DG}$ równoważy ciężar górnego magnesu. Wobec tego siła działająca na wagę jest w obu przypadkach taka sama, więc wskazanie wagi się nie zmieni.

Odpowiedź: Wskazanie wagi się nie zmieni.

1. Wśród poniższych przykładów A–G znajdź wszystkie pary:

a) sił równoważących się,

b) sił wzajemnego oddziaływania.

A. Na stole leży książka. Ziemia przyciąga ją siłą grawitacji.
B. Od dołu na książkę naciska stół.
C. Ziemia przyciąga stół siłą grawitacji.
D. Z góry na stół naciska książka.
E. Z dołu na stół naciska podłoga.
F. Stół naciska na podłogę.
G. Na Ziemię działają siły grawitacji książki i stołu.

2. Po ustawieniu naczynia z wodą na szalce wagi jej wskazanie wyniosło 650 g. Następnie do naczynia z wodą włożono przywiązany do nitki przedmiot tonący w wodzie. Nitkę trzymano w ręku tak, że przedmiot po zanurzeniu nie dotykał dna ani ścianek naczynia, a woda nie wylała się z naczynia. Waga wskazała 750 g.

a) Dlaczego zmieniło się wskazanie wagi, skoro przedmiot nie dotykał dna ani ścianek naczynia?

b) Czy na podstawie danych zawartych w treści zadania można wyznaczyć masę przedmiotu zanurzonego w naczyniu? A jego objętość? Jeśli tak – wyznacz wskazane wielkości, jeśli nie – uzasadnij dlaczego.

Wskazówka. Przypomnij sobie ze szkoły podstawowej prawo Archimedesa.

3. Wóz ciągnie konia do tyłu taką samą siłą, jaką koń ciągnie wóz do przodu. Dlaczego więc to wóz jedzie do przodu, a nie koń przesuwa się do tyłu?

Jest to stare zadanie. Jeśli chcesz, możesz je unowocześnić, zamieniając konia i wóz na traktor z przyczepą, ale problem fizyczny pozostanie bez zmian. Rozwiąż go.

4. Wykonaj doświadczenie.

a) Weź siłomierz. Jeśli go nie masz, użyj gumki recepturki (w takim wypadku zmierz jej długość).

b) Do końców siłomierza przywiąż nitki. Przewieś je przez dwa krańce stołu (patrz zdjęcie) albo przez bloczki. Na nitkach powieś dwa jednakowe przedmioty. Odczytaj wskazania siłomierza albo zmierz, o ile rozciągnęła się gumka.

c) Zastanów się, jakie będzie wskazanie siłomierza, jeśli zdejmiesz jeden z przedmiotów i przymocujesz koniec nitki do statywu lub krzesła.

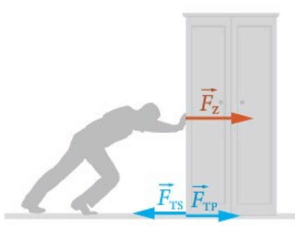
d) Wykonaj czynności opisane w punkcie c) i odczytaj wskazanie siłomierza. Czy twoje przypuszczenia się potwierdziły?

4.5. Siła tarcia

Przypomnij sobie

- Tarcie to siła oporu ruchu, która utrudnia przemieszczanie się względem siebie dwóch stykających się ciał.
- Zwrot wektora siły tarcia jest przeciwny do zwrotu wektora prędkości ciała. Jeśli ciało spoczywa, to zwrot wektora siły tarcia jest przeciwny do zwrotu wektora siły działającej na ciało.

Poznawanie i badanie oporów ruchu jest ważne zarówno ze względów naukowych, jak i technicznych. Nieprawidłowe wnioski Arystotelesa (patrz s. 141) dotyczące wpływu oporu ośrodka na ruch stanowiły przyczynę naukowych nieporozumień przez kilkanaście wieków. Techniczne problemy związane z oporami ruchu to ścieranie się stykających się powierzchni oraz zużywanie dodatkowej energii. Jednak w wielu sytuacjach zwiększenie tarcia jest użyteczne. Bez niego przecież nie moglibyśmy się poruszać.



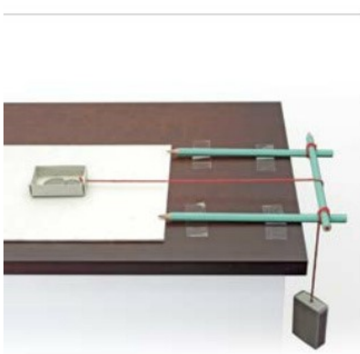
Rys. 4.12. Podłoga działa na szafę siłą tarcia $\vec{F}_{TS}$, która równoważy przyłożoną do szafy siłę zewnętrzną $\vec{F}_Z$. Szafa także działa na podłogę siłą tarcia $\vec{F}_{TP}$

Tarcie statyczne i kinetyczne

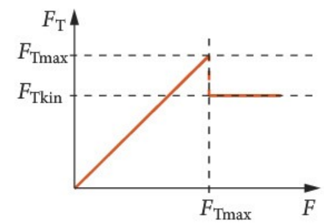
Gdy chcemy wprawić w ruch ciało stykające się z innym ciałem, np. skrzynkę stojącą na asfaltowej jezdni, między nimi pojawiają się siły tarcia. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki na każde z tych ciał działa siła tarcia o takiej samej wartości.

Doświadczenie 19

1. Przygotuj układ doświadczalny podobny do wykorzystywanego w doświadczeniu na s. 142. Tym razem jednak zamiast wagonika do sznurka przymocuj wewnętrzną część pudełka od zapałek.
2. Połóż pojemnik z wewnętrznej części pudełka od zapałek na szorstkim podłożu, np. tekturze. Włóż do niego dwie monety jednozłotowe (patrz zdjęcie).
3. Do wiszącego pudełka włóż monetę jednogroszową i przytrzymaj pojemnik. Puść go dopiero, gdy wiszące pudełko przestanie się kołysać.
4. Dodawaj do wiszącego pojemnika kolejne monety, aż pojemnik leżący na tekturze zacznie się przesuwać (pamiętaj, aby za każdym razem ostrożnie puszczać pojemnik dopiero wtedy, gdy wiszące pudełko przestanie się poruszać).
5. Ostrożnie (tak, aby nie wprawić w ruch pojemnika leżącego na stole) wyjmij jedną z monet z wiszącego pudełka. Co obserwujesz?
6. Przesuń delikatnie pojemnik po tekturze. Co widzisz?
7. Powtórz doświadczenie, ale zamiast tektury użyj książki z lakierowaną okładką. Jak zmieniły się wyniki?



W doświadczeniu zaobserwowaliśmy, że początkowo pudełko pozostawało w spoczynku, mimo że działała na nie coraz większa siła. Działo się tak dlatego, że gdy na spoczywające ciało działała coraz większa siła zewnętrzna, zwiększała się także siła tarcia, która ją równoważyła (rys. 4.13). Trwało to do momentu osiągnięcia przez przykładaną siłę wartości równej wartości F_{Tmax}, której siła tarcia nie może przekroczyć. Gdy siła zewnętrzna F_z jest większa od F_{Tmax}, ciało zaczyna się poruszać. Z naszego doświadczenia wiemy, że wartość siły, jaką trzeba przyłożyć, aby utrzymać ciało w ruchu jednostajnym, jest mniejsza niż F_{Tmax}. Dlatego musimy wyróżnić dwa rodzaje tarcia: statyczne i kinetyczne.



Rys. **4.13.** Wykres zależności siły tarcia $\vec{F}_T$ od przyłożonej siły zewnętrznej F

Siła tarcia statycznego może przyjmować różne wartości wynoszące od zera do F_{Tmax}. **Siła tarcia kinetycznego** F_{Tkin} jest mniejsza niż maksymalna wartość tarcia statycznego F_{Tmax}.

Najprostszym przykładem tarcia statycznego jest tarcie pomiędzy podłożem a stojącym na nim przedmiotem, do którego przyłożyliśmy zewnętrzną siłę, gdy chcieliśmy przesunąć przedmiot po podłożu. Na przykład kiedy człowiek próbuje lekko przesunąć but po podłodze, między podeszwą a podłogą zaczynają działać siły tarcia. Kiedy człowiek zacznie iść, tarcie statyczne nie zniknie – podeszwa i podłoga nie poruszają się przecież względem siebie.

Tarcie między butami idącego człowieka a podłogą jest więc przykładem tarcia statycznego (rys. 4.14). Fakt, że człowiek się porusza, nie ma znaczenia. Ważne jest to, że stykające się ciała (podeszwa i podłoga) nie poruszają się względem siebie.

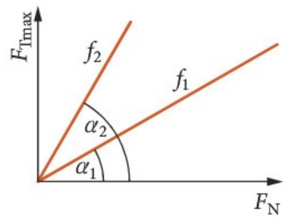
Podobnie jest z oponą samochodu i asfaltem. Jeśli tylko auto nie wpadnie w poślizg, działa między nimi siła tarcia statycznego, dzięki której pojazd może się poruszać. Dlatego właśnie na śliskiej nawierzchni trudno jest ruszyć.

Rys. **4.14.** Dzięki sile tarcia statycznego działającej na nogę $\vec{F}_{TN}$ możliwy jest ruch człowieka. Łatwo zaobserwować skutki braku siły tarcia, gdy próbujemy chodzić po lodzie

Współczynniki tarcia

Doświadczenie 20

1. Wykorzystaj układ z poprzedniego doświadczenia.
2. Do wiszącego pudełka wkładaj monety jednogroszowe do chwili, aż układ zacznie się poruszać.
3. Ciężar leżącego na stole pojemnika z monetami jest równy sile F_N nacisku pojemnika na podłoże. Przyjmijmy, że ciężar wiszącego pudełka z monetami jest w przybliżeniu równy maksymalnej wartości tarcia statycznego F_{Tmax}. Oszacuj niepewność wyznaczenia F_N i F_{Tmax}. Zapisz wartości F_N i F_{Tmax}.
4. Powtórz doświadczenie kilka razy, za każdym razem dokładając do pojemnika na stole po dwie monety.
5. Sporządź wykres zależności $F_{Tmax}(F_N)$. Wyznacz jego współczynnik kierunkowy.



Rys. **4.15.** Wykres zależności maksymalnej wartości tarcia statycznego od siły nacisku dla $f_1 = 0{,}4$ i $f_2 = 3$

Na podstawie analizy wyników doświadczenia możemy stwierdzić, że wykres $F_{Tmax}(F_N)$ jest linią prostą (rys. 4.15). Oznacza to, że maksymalna siła tarcia statycznego jest wprost proporcjonalna do siły nacisku:

$$F_{Tmax} = f_s \cdot F_N$$

gdzie f_s nazywamy **współczynnikiem tarcia statycznego**. Jest on równy współczynnikowi kierunkowemu prostej $F_{Tmax}(F_N)$ (patrz rys. 4.15). Współczynnik tarcia zależy od rodzaju trących powierzchni, na przykład dla gumy na papierze ściernym jest wielokrotnie większy niż dla stali na lodzie. Zwróć uwagę, że wyrażenie $f_s \cdot F_N$ pozwala obliczyć tylko maksymalną wartość siły tarcia statycznego. Jeśli zewnętrzna siła F_z jest mniejsza od $F_{Tmax} = f_s \cdot F_N$, to tarcie statyczne jest równe F_z.

Jeśli zbada się siłę potrzebną do utrzymania ciała w ruchu jednostajnym, okaże się, że w przypadku tarcia kinetycznego zachodzi podobna zależność:

$$F_T = f_k \cdot F_N$$

gdzie f_k to współczynnik tarcia kinetycznego.

Współczynnik ten można wyznaczyć na podstawie doświadczenia podobnego do opisanego na poprzedniej stronie. W tym celu należy ustalić, jakie obciążenie jest potrzebne, aby lekko poruszone pudełko się nie zatrzymywało, ale poruszało jednostajnie.

Jak już wiesz, tarcie kinetyczne jest mniejsze od maksymalnej wartości tarcia statycznego, co oznacza, że $f_k < f_s$.

Mówiliśmy, że współczynniki tarcia zależą od rodzaju trących o siebie powierzchni. W tabeli 4.1 podano przybliżone wartości przykładowych współczynników tarcia.

We wzorach na wartość tarcia kinetycznego i maksymalną wartość tarcia statycznego nie występuje powierzchnia styku ciał. I rzeczywiście, tarcie od niej nie zależy. W praktyce mogą jednak występować bardziej złożone sytuacje. Na przykład dużą skrzynię łatwiej ciągnąć po śniegu, gdy leży na boku o największej powierzchni. Wtedy w mniejszym stopniu zapada się ona w podłoże i łatwiej ją przesuwać.

Tabela 4.1

Powierzchnie	f_s	f_k
Stal po lodzie	0,03	0,014
Stal po stali	0,2	0,1
Lina po drewnie	0,5	0,3
Buty po lodzie	0,1	0,05
Opony po suchym asfalcie	1,0	0,75
Opony po mokrym asfalcie	0,7	0,5
Opony po zaśnieżonym asfalcie	0,3	0,02
Drewno po drewnie	0,5	0,3
Lód po lodzie	0,1	0,02
Szkło po szkle	0,9	0,4
Narta po śniegu	0,14	0,1

A to ciekawe

Gdy samochód jedzie bez poślizgu, między oponą a asfaltem występuje tarcie statyczne. Jeśli natomiast pojazd wpadnie w poślizg – mamy do czynienia z tarciem kinetycznym. Maksymalne tarcie statyczne jest większe od kinetycznego, więc szybciej można zatrzymać samochód, który jedzie bez poślizgu. Fakt ten wykorzystano w układach hamulcowych ABS, które zapobiegają blokowaniu się kół poprzez krótkotrwałe zmniejszenie siły, z jaką klocki hamulcowe działają na tarcze koła.

Prawa fizyki mają różny zakres stosowalności. Na przykład zasada zachowania energii obowiązuje ściśle we wszystkich znanych zjawiskach. Natomiast wzory pozwalające obliczyć siłę tarcia to reguły przybliżone, oparte na modelu nieuwzględniającym dodatkowych czynników, na przykład zapadania się przesuwanej skrzyni w śniegu.

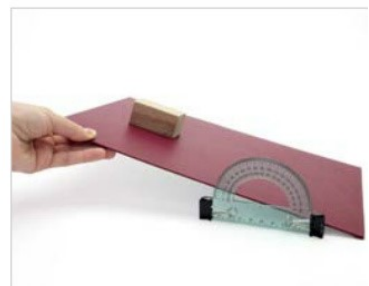
Wyznaczanie współczynnika tarcia za pomocą równi pochyłej

W doświadczeniu 20. wyznaczaliśmy współczynnik tarcia statycznego. Wiemy, że współczynnik ten jest równy współczynnikowi kierunkowemu prostej opisującej zależność $F_{\mathrm{Tmax}}(F_{\mathrm{N}})$. Wartość tego współczynnika możemy też wyznaczyć w prosty sposób za pomocą równi pochyłej.

Doświadczenie 21 – obowiązkowe

Wyznaczanie wartości współczynnika tarcia

1. Przygotuj przedmiot, który posłuży za równię pochyłą, np. sztywną tekturę, oraz kątomierz i niewielki klocek.
2. Ustaw kątomierz obok równi tak, aby można było odczytywać jej kąt nachylenia.
3. Na równi umieść klocek.
4. Powoli zwiększaj kąt nachylenia równi.
5. W chwili, gdy klocek zacznie się zsuwać, odczytaj kąt nachylenia równi.



Siłę $\vec{F}_{\mathrm{g}}$ działającą na ciało na równi pochyłej rozkładamy na równoległą do równi składową $\vec{F}_1$, która powoduje zsuwanie się ciała po równi, i prostopadłą do powierzchni równi składową $\vec{F}_2$, która jest równa sile nacisku na równię $\vec{F}_{\mathrm{N}}$.

Rozkład sił na równi s. 136–137

Obliczmy współczynnik tarcia statycznego, korzystając ze wzoru:

$$f_{\mathrm{s}} = \frac{F_{\mathrm{T\,max}}}{F_{\mathrm{N}}}$$

Jeśli przeprowadziliśmy doświadczenie starannie, to z bardzo dobrym przybliżeniem możemy przyjąć, że:

$$F_{\mathrm{T\,max}} = F_1$$

Składowa równoległa do równi F_1 wynosi:

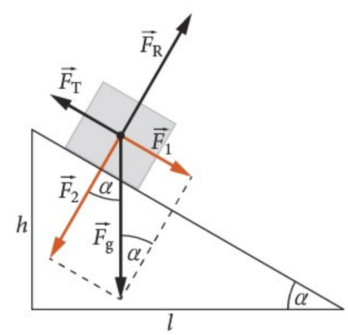
$$F_1 = F_{\mathrm{g}} \sin\alpha$$

Składowa prostopadła do równi F_2 jest równa:

$$F_2 = F_{\mathrm{N}} = F_{\mathrm{g}} \cos\alpha$$

Po podstawieniu F_{Tmax} i F_{N} do wzoru na współczynnik tarcia statycznego otrzymujemy:

$$f_{\mathrm{s}} = \frac{F_{\mathrm{g}} \sin\alpha}{F_{\mathrm{g}} \cos\alpha} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \mathrm{tg}\,\alpha$$



Rys. **4.16.** Rozkład sił na równi pochyłej dla zsuwającego się klocka

Dodatek matematyczny s. 154

W doświadczeniu zmierzyliśmy kąt nachylenia równi, a jego tangens możemy odczytać z tablic lub obliczyć na kalkulatorze. Gdybyśmy nie znali miary kąta α, tangens kąta α moglibyśmy również obliczyć – po dokonaniu dodatkowych pomiarów – jako stosunek wysokości równi h do długości l jej podstawy:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{l} = f_s$$

Podobnie możemy wyznaczyć współczynnik tarcia kinetycznego. W tym wypadku należy doświadczalnie wyznaczyć kąt, przy którym pchnięte ciało będzie zsuwać się ruchem jednostajnym, i wykonać obliczenia dla tego kąta.

Dodatek matematyczny

Funkcja trygonometryczna tangens

W lekcji 3.2 przedstawiliśmy funkcje trygonometryczne sinus i cosinus (patrz s. 103). Kolejną funkcją trygonometryczną jest tangens. Tangens kąta ostrego w trójkącie prostokątnym jest równy ilorazowi przyprostokątnej przeciwległej danemu kątowi i przyprostokątnej przyległej do tego kąta. Dla kąta α:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a}{b}$$

Na stronie 103 powiedzieliśmy, że:

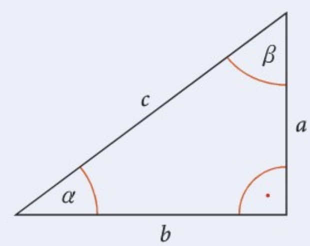
$$a = c\sin\alpha$$
$$b = c\cos\alpha$$

Można zatem zapisać:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a}{b} = \frac{c\sin\alpha}{c\cos\alpha} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$

Analogicznie dla kąta β zapisujemy:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{b}{a} = \frac{\sin\beta}{\cos\beta}$$



Rys. 4.17. W trójkącie prostokątnym można wyznaczyć funkcje trygonometryczne kątów α i β

Tangensa używamy także, gdy podajemy nachylenie drogi. Na rysunku obok widzisz znak drogowy ostrzegający o stromym podjeździe. Umieszczona pod nim tabliczka „13%" oznacza, że tangens kąta nachylenia zbocza do poziomu wynosi 13% (czyli 0,13).

Podobnie współczynnik kierunkowy funkcji liniowej jest miarą nachylenia jej wykresu względem osi x. Mierzy się go tak, jak na znakach drogowych. Na przykład funkcja $y = 3x + 5$ jest prostą nachyloną względem osi x pod kątem, którego tangens wynosi 3.

Tarcie poślizgowe i tarcie toczne

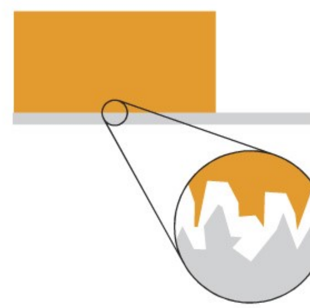
Mówi się czasem, że najważniejszym wynalazkiem ludzkości jest koło. Nie chodzi tutaj jednak o figurę geometryczną, ale o odkrycie, że siła tarcia zależy od tego, czy ciała się po sobie ślizgają czy toczą. Z codziennego doświadczenia wiemy, że gdy jedno ciało toczy się po drugim, to siła tarcia jest wielokrotnie mniejsza. Z tego powodu mówimy o tarciu tocznym.

Rys. **4.18.** Łożyska pozwalają zamienić tarcie poślizgowe na toczne

W urządzeniach mechanicznych stosuje się łożyska, czyli układy kulek lub walców toczących się w odpowiedniej obudowie. Pozwala to zminimalizować straty energii związane z występowaniem sił tarcia. W największych łożyskach znajdują się walce o metrowej średnicy. Na takich łożyskach zamocowane są przęsła największych mostów, umożliwiające ich poruszanie się względem filarów. Najmniejsze łożyska, np. te w nanosilniczkach, mają rozmiary rzędu mikrometrów.

Mikroskopowa przyczyna występowania sił tarcia

Zbadaliśmy, **jak** działają siły tarcia. Aby wyjaśnić, **dlaczego** działają, musimy przyjrzeć się trącym powierzchniom w dużym powiększeniu.
Zauważymy wówczas nierówność nawet na pozornie gładkich powierzchniach. Domyślamy się, że im bardziej chropowate będą dwie powierzchnie, tym siła tarcia między nimi będzie większa (rys. 4.19). Tarcie zależy od nierówności występujących na trących o siebie powierzchniach. Wydawałoby się, że łatwo je zlikwidować – wystarczy wypolerować powierzchnie tak dokładnie, aby były idealnie gładkie. Rzeczywiście, w miarę polerowania współczynnik tarcia będzie malał, ale tylko do pewnego momentu.



Rys. **4.19.** Przyczyną tarcia są nierówności na stykających się powierzchniach (powiększenie ok. 10 tys. razy)

Gdy powierzchnie staną się bardzo gładkie, współczynnik tarcia, a więc i siła tarcia, ponownie staną się bardzo duże. Za taki efekt, sprzeczny z intuicją, odpowiedzialne są siły oddziaływań między atomami i cząsteczkami.
W rzeczywistości powierzchnie, które wydają nam się gładkie, w skali mikroskopowej są bardzo nierówne, a powierzchnia styku jest niewielka. Stosunkowo łatwo można więc zrywać wiązania powstające między atomami obu powierzchni. Gdyby dwie powierzchnie były idealnie gładkie i idealnie przylegały do siebie, to oddziaływania międzyatomowe byłyby bardzo duże, a siła tarcia pomiędzy dwiema takimi powierzchniami – ogromna.

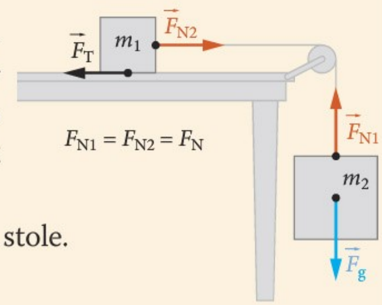
Po tej lekcji powinieneś

- wiedzieć, czym są: tarcie statyczne, tarcie kinetyczne, tarcie poślizgowe, tarcie toczne;
- posługiwać się współczynnikiem tarcia i wyznaczać go doświadczalnie.

Pytania i zadania ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Przykład

Na stole leży drewniany klocek o masie $m_1 = 1$ kg. Współczynnik tarcia kinetycznego między klockiem a stołem jest równy $f_k = 0{,}6$. Do klocka jest przymocowana nić, którą przerzucono przez bloczek. Na drugim końcu nici jest zawieszony ciężarek o masie $m_2 = 2$ kg.



a) Oblicz przyspieszenie, z jakim będzie się poruszał klocek na stole.

b) Oblicz siłę naciągu nitki.

Pomiń masę nitki i bloczka oraz tarcie nitki o bloczek.

Rozwiązanie

Na klocek poruszający się po stole działają dwie pary sił: jedna para w kierunku poziomym, a druga – w pionowym. Siły działające pionowo, tj. siłę ciężkości i siłę reakcji podłoża, możemy pominąć, ponieważ siły te się równoważą. Z kolei w kierunku poziomym na klocek działają siła tarcia kinetycznego o wartości $F_T = f_k m_1 g$ oraz siła naciągu nitki o wartości F_N, które się nie równoważą, przez co klocek porusza się z przyspieszeniem. Oznaczmy to przyspieszenie jako a i zapiszmy drugą zasadę dynamiki dla klocka:

$$m_1 a = F_N - F_T$$

Na ciężarek zawieszony na nici działają dwie siły: siła ciężkości o wartości $F_g = m_2 g$ oraz siła naciągu nitki o wartości F_N, co zgodnie z drugą zasadą dynamiki możemy zapisać:

$$m_2 a = F_g - F_N$$

a) Po zestawieniu powyższych równań otrzymujemy układ dwóch równań:

$$\begin{cases} m_1 a = F_N - F_T \\ m_2 a = F_g - F_N \end{cases}$$

(przyspieszenia obu klocków mają taką samą wartość).
Gdy podstawimy wzory na siłę tarcia i siłę ciężkości, uzyskamy zapis:

$$\begin{cases} m_1 a = F_N - f_k m_1 g \\ m_2 a = m_2 g - F_N \end{cases}$$

Dodajemy równania stronami:

$$(m_1 + m_2)a = m_2 g - f_k m_1 g \quad \longrightarrow \quad a = \frac{(m_2 - f_k m_1)g}{m_1 + m_2}$$

Po podstawieniu danych i wykonaniu obliczeń otrzymujemy przyspieszenie klocka:

$$a = 4{,}58\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

b) Do wyznaczenia siły naciągu nici wykorzystamy równanie $m_2 a = m_2 g - F_N$.
Przekształcamy je i otrzymujemy:

$$F_N = m_2 g - m_2 a = m_2 (g - a)$$

Po podstawieniu danych z zadania i wykonaniu obliczeń mamy:

$$F_N = 10{,}5 \text{ N}$$

Odpowiedź: Klocek będzie się przesuwał z przyspieszeniem $4{,}58\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, a siła naciągu nici wyniesie 10,5 N.

1. Czy lokomotywa ciągnąca pociąg mogłaby mieć stukrotnie mniejszą masę i nadal spełniać swoje zadanie? Uzasadnij swoją odpowiedź.

2. Na drewnianym stole leży drewniany klocek o masie 2 kg.

a) Jaką siłą trzeba go pchać, aby się poruszył?

b) Jaką siłą trzeba go pchać, aby utrzymać go w ruchu?

3. Współczynnik tarcia statycznego opony o suchy asfalt wynosi 1,0. Oblicz, jakie może być maksymalne przyspieszenie samochodu na suchej poziomej drodze, jeśli jego silnik ma dostatecznie dużą moc.

Wskazówki:

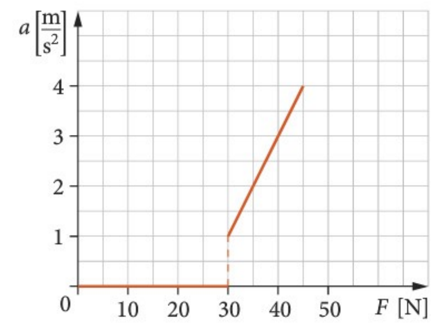
▶ To nieprawda, że przyspieszenie samochodu może być dowolnie duże, jeśli silnik jest odpowiednio mocny. Zastanów się dlaczego.

▶ Przyjmij, że nacisk samochodu na szosę jest równy jego ciężarowi. Pomijamy działanie np. spojlerów w samochodach wyścigowych, dociskających pojazd do podłoża.

▶ Możesz założyć, że samochód ma napęd na cztery koła.

4. Ze stoku o kącie nachylenia 20° szusuje (czyli zjeżdża prosto w dół) narciarz. Jego masa wraz z ekwipunkiem to 75 kg. Ile wyniesie jego przyspieszenie, jeśli pominiemy tarcie? Ile będzie równe przyspieszenie, jeśli przyjmiemy, że siła tarcia wynosi 35 N? Ile wyniesie w takim przypadku współczynnik tarcia kinetycznego?

5. Do pudełka z książkami stojącego na podłodze przyłożono poziomo siłę, której wartość rośnie w czasie. Na wykresie przedstawiono przyspieszenie pudełka w zależności od przyłożonej siły.



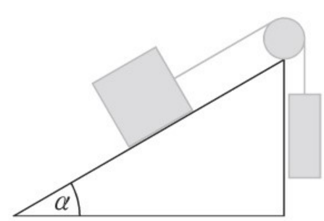
a) Dlaczego przyspieszenie rośnie skokowo dla siły o wartości 30 N?

b) Wyznacz na podstawie wykresu masę pudełka, współczynnik tarcia statycznego i współczynnik tarcia kinetycznego. Przyjmij $g \approx 10\,\frac{m}{s^2}$.

6. Na równi pochyłej o kącie nachylenia 30° leży klocek o masie 400 g. Współczynnik tarcia kinetycznego między klockiem a równią wynosi 0,2. Do klocka przyczepiono nić, która przechodzi przez bloczek znajdujący się na szczycie równi i ślizga się po bloczku bez tarcia. Drugi koniec nici obciążono ciężarkiem o masie 350 g.

a) Oblicz przyspieszenie, z jakim będzie się poruszał klocek.

b) Oblicz przyspieszenie, z jakim poruszałby się klocek, gdyby przemieszczał się po równi bez tarcia.



Analiza tekstu

Czy można biegać po wodzie

Jedną z ulubionych zabaw dzieci jest bieganie po kałużach. Rozbryzgiwanie wody i błota w ciepły letni dzień może sprawić niemało frajdy […] W bieganiu po wodzie chodzi jednak o wykonanie przynajmniej kilku kroków po wodzie przed wpadnięciem do niej. Czy jest to możliwe? […] W celu udzielenia odpowiedzi powołamy eksperta […]. Będzie nim bazyliszek zwyczajny *Basiliscus basiliscus*. Jaszczurka ta, jak większość innych bazyliszków, występuje w Ameryce Południowej i jest największym stworzeniem, o którym wiadomo, że biegać po wodzie potrafi. […]

Bieg po wodzie różni się od biegu po lądzie między innymi tym, że środek masy zwierzęcia znajduje się praktycznie cały czas na tej samej wysokości. W takim razie przebieranie nogami musi wytwarzać prawie stałą siłę równoważącą grawitację. Jest ona sumą siły reakcji F_R na rozpędzanie wody przez na przemian wciskane w wodę nogi jaszczurki, siły parcia F_P wody na stopę oraz siły F_{NP} związanej z napięciem powierzchniowym odkształconej powierzchni wody. Bilans ten zakłada, że jaszczurka wyciąga nogę, zanim zamknie się bąbel powietrza tworzony w fazie wciskania kończyny w wodę. Jest tak w przypadku biegu bazyliszka. Gdyby bąbel się zamknął, to siły F_P i F_{NP} zostałyby zastąpione siłą oporu o przeciwnym znaku, związaną z koniecznością wyciągnięcia uwięzionej w wodzie nogi.

Siła F_{NP} jest proporcjonalna do obwodu stopy, czyli rozmiaru zwierzęcia w pierwszej potędze, więc jej wkład do kompensowania ciężaru (proporcjonalnego do sześcianu rozmiaru) pominiemy (jest on zauważalny tylko dla najmniejszych bazyliszątek).

Siła parcia F_P jest proporcjonalna do objętości bąbla, a jej znaczenie w bilansie sił zależy od efektywnej powierzchni stopy. Nawet dla obdarzonego pod tym względem szczodrze przez naturę bazyliszka wkład jest niewielki. Dlatego najistotniejsza jest siła F_R.

Średnią siłę reakcji można oszacować, wykorzystując równość:

$$F_R \cdot \Delta t = \Delta p$$

Z analizy wymiarowej wynika, że zmiana pędu (Δp) jest proporcjonalna do iloczynu masy bąbla $m = dV$* i średniej prędkości nogi u, natomiast czas jest stosunkiem głębokości zanurzenia nogi (w przypadku bazyliszka maksymalnie jest ona równa długości nogi, proporcjonalnej do rozmiaru zwierzęcia r) do prędkości u. Ostatecznie uzyskujemy:

$$F_R \propto dV \cdot u \cdot \frac{u}{r} \propto d \cdot r^2 \cdot u^2$$

Symbol $\propto$ oznacza, że wielkości są do siebie proporcjonalne.

* gdzie d to gęstość bąbla, a V to jego objętość

Prędkość *u* okazuje się słabo zależeć od rozmiaru zwierzęcia. Powoduje to, że o ile młode, ważące kilka gramów, osobniki mogą generować siłę przekraczającą ich ciężar ponad dwukrotnie, to największe jaszczurki (o masie około 200 g) generują siłę ledwie pozwalającą na bieganie po wodzie. Z tego względu młode mogą uciekać kilkanaście i więcej metrów, a najstarszym (jaszczurki rosną całe życie) udaje się przebiec zaledwie kilka metrów. Zajmijmy się teraz ludźmi.

Żeby móc biegać po wodzie jak bazyliszek, trzeba by mieć stopy w proporcji do wzrostu jak bazyliszek, zwinność i długość nóg jak bazyliszek oraz przebierać nimi tak szybko, żeby kwadrat prędkości był tyle razy większy, ile razy jesteśmy od bazyliszka większy, przy czym ważna jest tylko średnia pionowej składowej prędkości zanurzanej nogi. [...]

Krótko mówiąc, w taki sposób biegać po wodzie się nie da. A co by się stało, gdyby założyć płetwy? Nic nie stoi na przeszkodzie, żeby spróbować. Jeden krok na pewno da się zrobić.

Piotr Zalewski, *Czy można biegać po wodzie?*, „Delta" 2010, nr 07

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

1. Średnia prędkość bazyliszka, kiedy biegnie po wodzie, to 8,4 $\frac{km}{h}$. Oszacuj, jaką ty musiałbyś rozwinąć prędkość, gdybyś chciał biegać w butach po wodzie. Czy potrafisz biec tak szybko?

2. Czy człowiek może przejść po wodzie bez zamoczenia nóg? Jeśli uważasz że tak, zaproponuj sposób.

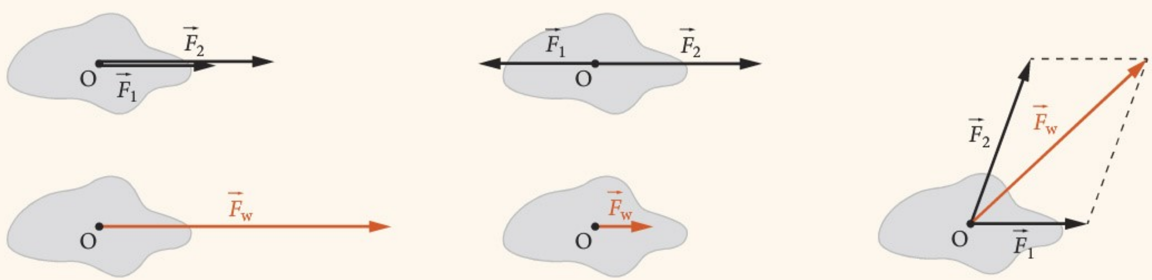
3. Której z wielkości fizycznych wymienionych w tekście jeszcze nie znasz?

4. Bazyliszek biega po wodzie, aby uciec drapieżnikom. Jak inne zwierzęta poruszają się po wodzie i do czego wykorzystują tę zdolność?

Pełny tekst artykułu dostępny jest pod adresem:
http://delta.mimuw.edu.pl/artykuly/delta2010-07/2010-07-aktualnosci.pdf

Podsumowanie Ruch i siły

- Wielkością opisującą oddziaływania jest **siła**. Siła jest wektorem o określonych cechach: wartości, kierunku, zwrocie i punkcie przyłożenia.
  - Jednostką siły jest **niuton**: $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.
  - Aby siły się równoważyły, muszą działać na to samo ciało.
  - Dodawanie dwóch sił o wspólnym punkcie przyłożenia oraz:

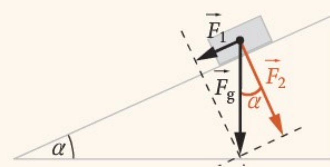


jednakowych kierunkach i zwrotach $F_w = F_1 + F_2$

jednakowych kierunkach i przeciwnych zwrotach $F_w = |F_1 - F_2|$

różnych kierunkach – metoda równoległoboku $\vec{F}_w = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

  - **Rozkładanie siły na składowe**



$$F_1 = F_g \sin\alpha \qquad F_2 = F_g \cos\alpha$$

- **Zasady dynamiki Newtona**
  - **Pierwsza zasada dynamiki**

Jeśli na ciało nie działa żadna siła albo działające na nie siły się równoważą, to ciało spoczywające będzie nadal spoczywać, a ciało poruszające się będzie poruszać się z tą samą prędkością po linii prostej.

  - **Druga zasada dynamiki**

Przyspieszenie, z którym porusza się ciało o masie m, jest wprost proporcjonalne do siły wypadkowej $\vec{F}$ działającej na to ciało i odwrotnie proporcjonalne do jego masy:

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

Kierunek i zwrot przyspieszenia są takie jak kierunek i zwrot siły.

  - **Trzecia zasada dynamiki**

Gdy ciało A działa na ciało B siłą $\vec{F}_{AB}$, to ciało B działa na ciało A siłą $\vec{F}_{BA}$. Siły te mają jednakową wartość i ten sam kierunek, ale przeciwne zwroty i różne punkty przyłożenia.

Rodzaje tarcia

Tarcie

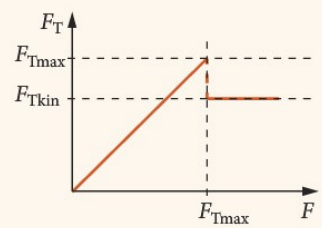
kinetyczne | statyczne

Siła tarcia statycznego może przyjmować różne wartości wynoszące od zera do F_{Tmax}:

$$F_{Tmax} = f_s \cdot F_N$$

gdzie: f_s – współczynnik tarcia statycznego, F_N – siła nacisku.

Siła tarcia kinetycznego F_{Tkin} jest mniejsza niż maksymalna wartość tarcia statycznego. Zależność siły F_{Tkin} od siły nacisku F_N przedstawia wzór:



$$F_{Tkin} = f_k \cdot F_N$$

gdzie: f_k – współczynnik tarcia kinetycznego, F_N – siła nacisku.

Zależność między współczynnikami tarcia: $f_s > f_k$.

- Siłę powodującą ruch po okręgu nazywamy **siłą dośrodkową**:

$$F_d = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$$

gdzie: m – masa ciała poruszającego się po okręgu, v – prędkość liniowa, r – promień okręgu, ω – prędkość kątowa.

- **Siły bezwładności** $\vec{F}_b$ to siły pozorne, które nie wynikają z żadnych oddziaływań. Ich działanie obserwujemy tylko wtedy, gdy układ odniesienia porusza się ruchem przyspieszonym:

$$\vec{F}_b = -m\vec{a}$$

- W **układzie inercjalnym** działają wyłącznie rzeczywiste siły, wynikające z oddziaływania ciał.

- W **układzie nieinercjalnym** oprócz sił rzeczywistych działają siły pozorne, związane ze zmianą prędkości układu.

- Gdy siła bezwładności działa w tym samym kierunku co siła grawitacji, jej działanie odczuwamy jako pozorne zwiększenie ciężaru ciała – **przeciążenie**, jego pozorne zmniejszenie – **niedociążenie** lub pozorny brak ciężaru – **nieważkość**. Przeciążenie występuje np. w windzie ruszającej w górę, a niedociążenie – w windzie ruszającej w dół. Nieważkość natomiast występuje m.in. na stacji kosmicznej na orbicie Ziemi.

- Obracający się układ odniesienia jest układem nieinercjalnym. Działa w nim siła bezwładności zwana **siłą odśrodkową**:

$$F_{od} = \frac{mv^2}{r} = F_d$$

Siła ta jest skierowana wzdłuż promienia na zewnątrz okręgu.

WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Sposób na zadanie

Stosowanie praw fizyki i modelowanie zjawisk

Zadanie 1. (0–1)

Wskaż właściwe dokończenie poniższego zdania.
Jeśli na spoczywający kamyk działają tylko trzy siły: $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ oraz $\vec{F}_3$, których wartości są równe: $F_1 = 3$ N, $F_2 = 4$ N oraz $F_3 = 5$ N, to siła będąca wypadkową $\vec{F}_2$ i $\vec{F}_3$, czyli suma $\vec{F}_2 + \vec{F}_3$, ma wartość

A. 1 N. **B.** 3 N. **C.** $\sqrt{41}$ N. **D.** 9 N.

Rozwiązanie:

Poprawna jest odpowiedź **B**.
Jeżeli ciało spoczywa, oznacza to, że wypadkowa działających na nie sił wynosi zero.
Skoro wiemy, że na ciało działają trzy siły, to aby ich wypadkowa wynosiła zero, suma dwóch z nich musi być co do wartości równa trzeciej sile i mieć przeciwny zwrot:

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 = -\vec{F}_1$$

Oznacza to, że szukana wartość to 3 N. Zauważ, że nie musimy znać kątów między kierunkami sił, aby odpowiedzieć na to pytanie. Wartości sił F_1 i F_2 również nie są nam potrzebne.

Warto zapamiętać!

- Jeżeli ciało spoczywa, to siła wypadkowa działająca na to ciało wynosi zero. Ale nie jest odwrotnie: jeśli siła wypadkowa wynosi zero, ciało może się poruszać (ruchem jednostajnym).

Zadanie 2. (0–1)

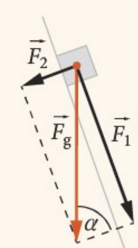
Kostka lodu ześlizguje się bez tarcia po równi pochyłej.
Wybierz właściwe dokończenie zdania spośród A–C oraz jego poprawne uzasadnienie spośród 1–3.
Pomiń opory powietrza.
Kostka lodu, ślizgając się po równi, cały czas się topi, a jej przyspieszenie

A.	wzrasta,	ponieważ	**1.**	maleje masa kostki.
B.	maleje,		**2.**	nie zależy od masy kostki.
C.	nie zmienia się,		**3.**	maleje siła wypadkowa działająca na kostkę.

Rozwiązanie:

Poprawna jest odpowiedź **C–2**.

> **Wskazówka 1.** Przyspieszenie zawsze jest związane z siłą działającą na ciało. Wskaż odpowiednią siłę.



Jeżeli ciało zsuwa się z równi bez tarcia, to działa na nie tylko siła ciężkości: $F_g = mg$. Siłę tę rozkładamy na składowe: siłę prostopadłą do równi i siłę równoległą do równi (patrz rysunek).

Za zsuwanie się ciała z równi odpowiada składowa równoległa:

$$F_1 = mg\sin\alpha$$

Zgodnie z II zasadą dynamiki $F_1 = ma$, gdzie a to przyspieszenie ciała. Możemy przyrównać te dwa wzory na siłę F_1 i wyznaczyć z nich a:

$$\cancel{m}a = \cancel{m}g\sin\alpha \longrightarrow a = g\sin\alpha$$

Przyspieszenie ciała zsuwającego się bez tarcia po równi pochyłej nie zależy więc od masy ciała.

Warto zapamiętać!

- Siła ściągająca ciało z równi, czyli składowa siły ciężkości równoległa do równi, jest proporcjonalna do masy ciała. Dlatego przyspieszenie ciała jest niezależne od masy.

Zadanie 3. (0–2)

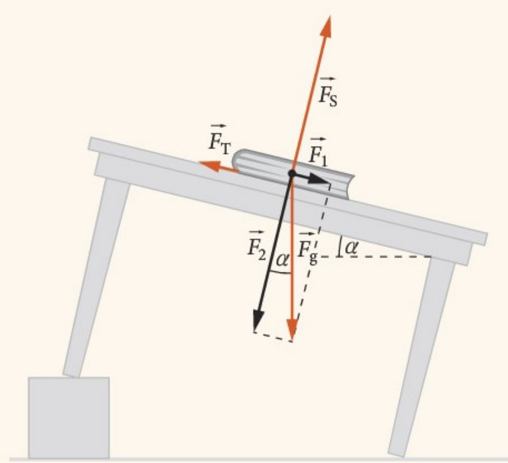
Książka o masie $m = 0{,}5$ kg położona na płaskim stole lekko uniesionym z jednej strony pozostaje w spoczynku. Kąt nachylenia blatu stołu do poziomu wynosi α. Co można powiedzieć o współczynniku tarcia statycznego między książką a stołem?

Rozwiązanie:

Ważne jest poprawne sporządzenie rysunku.

Siłę ciężkości $\vec{F}_\mathrm{g}$, działającą na książkę, rozkładamy na składowe jak na rysunku:

$$F_1 = F_\mathrm{g}\sin\alpha \quad \text{i} \quad F_2 = F_\mathrm{g}\cos\alpha$$



Skoro książka spoczywa, to działająca na nią siła wypadkowa wynosi zero.

Składową $\vec{F}_1$ równoważy równa jej co do wartości siła tarcia $\vec{F}_\mathrm{T}$, a składową $\vec{F}_2$ – siła sprężystości $\vec{F}_\mathrm{S}$.

Wiemy, że siła tarcia statycznego nie może przekroczyć wartości $f_\mathrm{s} \cdot F_2$, a więc:

$$F_1 = F_\mathrm{T} \leqslant f_\mathrm{s} \cdot F_2$$

czyli

$$F_\mathrm{g}\sin\alpha \leqslant f_\mathrm{s} \cdot F_\mathrm{g}\cos\alpha \longrightarrow f_\mathrm{s} \geqslant \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \mathrm{tg}\,\alpha$$

Odpowiedź: Współczynnik tarcia statycznego jest równy lub większy od $\mathrm{tg}\,\alpha$.

Warto zapamiętać!

- Współczynnik tarcia statycznego pozwala obliczyć tylko **maksymalną** wartość siły tarcia. Jeśli siła zewnętrzna próbująca poruszyć ciało jest mniejsza, to tak samo jest z siłą tarcia, której wartość jest tylko taka, jakiej potrzeba do zrównoważenia siły zewnętrznej.

WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

Zadanie 1. Rakieta Proton

Rosyjska rakieta klasy Proton jest przeznaczona m.in. do wynoszenia satelitów na niską orbitę okołoziemską. Proton jest rakietą trójczłonową. Po zakończeniu odliczania uruchamiane są silniki pierwszego członu, które pracują przez 120 s i wytwarzają w tym czasie siłę ciągu o stałej wartości 9500 kN. Po wyczerpaniu się paliwa i odrzuceniu pierwszego członu rakiety uruchamiane są silniki drugiego członu, pracujące przez 206 s i nadające maszynie siłę ciągu 2300 kN, a następnie silniki trzeciego członu, działające przez 238 sekund i wytwarzające siłę ciągu 707 kN.

Człon rakiety	Masa członu [t]	
	z paliwem	bez paliwa
I	451	31
II	168	12
III	51	4

1.1. Oblicz:

a) masę startującej rakiety,

b) wartość siły wypadkowej działającej na rakietę w chwili startu,

c) wartość przyspieszenia rakiety w chwili startu.

1.2. Sporządź wykres zależności przyspieszenia rakiety względem Ziemi od czasu w ciągu pierwszych 120 s lotu. Przyjmij, że wartość przyspieszenia ziemskiego jest stała. Pomiń opory powietrza.

Wskazówka. Zauważ, że przy korzystaniu z drugiej zasady dynamiki należy wziąć pod uwagę masę rakiety w danej chwili. Jej masa się zmienia, możesz założyć, że jest to zmiana jednostajna.

1.3. Oszacuj wartość prędkości rakiety pod koniec pierwszej minuty lotu. Pomiń opory powietrza.

Wskazówka. Przyrost prędkości rakiety jest równy polu pod wykresem zależności przyspieszenia od czasu.

1.4. Oblicz prędkość względem rakiety, z jaką gazy spalinowe są wyrzucane przez drugi człon rakiety. Skorzystaj ze wzoru:

$$F_c = u\frac{\Delta m}{\Delta t}$$

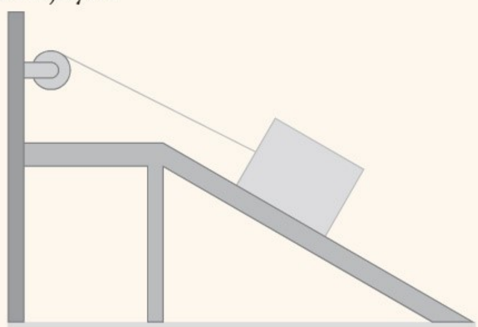
gdzie:

F_c – siła ciągu rakiety, u – prędkość gazów spalinowych względem rakiety, $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ – szybkość zużycia paliwa, Δm – masa wyrzuconego paliwa, Δt – czas pracy silnika.

Zadanie 2. Transport po pochylni

W magazynie na rampie o wysokości 1,5 m zamontowana jest wciągarka, która za pomocą liny transportuje po pochylni długości 3 m skrzynię o masie 500 kg i długości 1 m. Wytrzymałość liny jest równa 10 000 N, a współczynnik tarcia kinetycznego skrzyni o pochylnię wynosi 0,8.

2.1. Przerysuj poniższy rysunek do zeszytu. Na rysunku z zachowaniem odpowiednich proporcji narysuj i podpisz wektory sił działających na transportowaną skrzynię, przy założeniu, że porusza się ona ruchem jednostajnym.



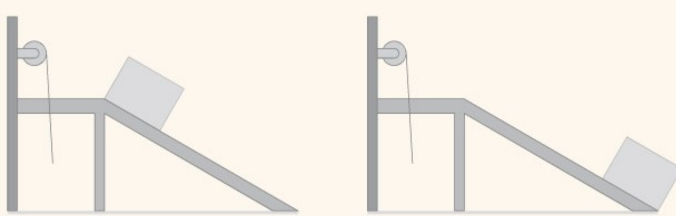
2.2. Wykaż, że po odczepieniu liny skrzynia pozostawiona na pochylni się nie zsunie.

Wskazówka. Nie znamy dokładnej wartości współczynnika tarcia statycznego skrzyni o pochylnię. Możemy jednak coś o nim powiedzieć. Co mianowicie?

2.3. Oblicz naprężenie liny, gdy skrzynia jest wciągana ruchem jednostajnym.

2.4. Oblicz maksymalne przyspieszenie, z jakim może być wciągana skrzynia.

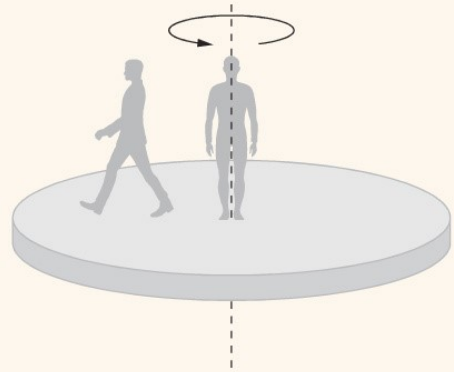
2.5. W zimowy dzień w wyniku oblodzenia współczynnik tarcia zmniejszył się do 0,1. Po odczepieniu liny na szczycie pochylni skrzynia zaczęła się zsuwać. Oblicz prędkość, jaką uzyska na dole pochylni (patrz rysunek).



Wskazówka. Skorzystaj z wiadomości o ruchu jednostajnym przyspieszonym lub o przemianach energii omawianych w szkole podstawowej. W tym drugim wypadku pamiętaj także o pracy przeciwko siłom tarcia.

Zadanie 3. Scena obrotowa

Aktor o masie 90 kg, stojący początkowo na środku obrotowej sceny o promieniu 5 m, która porusza się ze stałą prędkością kątową 0,2 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, zaczyna powoli iść w kierunku krańca sceny. Na nogach ma obuwie o współczynniku tarcia statycznego o podłoże 0,8. Środek sceny pokrywa się z osią obrotu.



3.1. Oblicz maksymalną odległość od osi obrotu, w jakiej siła odśrodkowa nie wyrzuci aktora ze sceny.

3.2. Na potrzeby przedstawienia na brzegu sceny zbudowano pionową ścianę, o którą w trakcie spektaklu aktor opiera się, stojąc prosto. Oblicz wartość siły nacisku działającej wówczas na ścianę.

3.3. Oblicz częstotliwość obrotów sceny, przy jakiej aktor może utrzymać się na jej brzegu bez podpierania się.

Informacja do punktów 3.4. i 3.5.

Aktor, aby zachować równowagę na brzegu sceny, odchyla się od pionu w stronę jej osi obrotu.

3.4. Narysuj w zeszycie i podpisz wektory sił działających na aktora w układzie odniesienia związanym z ziemią. Zachowaj proporcje długości wektorów.

3.5. Oblicz kąt, o jaki odchylone jest od pionu ciało aktora.

Projekt Wahadło Oberbecka

Zadania

1. Przygotuj krótką prezentację na temat zastosowania koła zamachowego w silniku spalinowym.
2. Podaj przykłady urządzeń technicznych, w których działaniu znaczenie ma moment bezwładności elementów.
3. Wykonaj wahadło Oberbecka (czyt. oberbeka) według zamieszczonej niżej instrukcji.

Instrukcja wykonania wahadła Oberbecka

Przygotuj: cztery jednakowe, długie, grube śruby, osiem nakrętek pasujących do przygotowanych śrub, cztery masywne podkładki z otworami na tyle dużymi, aby można je było nałożyć na śruby, sześcienny drewniany klocek o boku 3–4 razy dłuższym niż średnica pojedynczej śruby użytej do wykonania wahadła, szpulkę o dość dużej średnicy, np. po plastrze opatrunkowym, długą, mocną nić, ciężarek, statyw z poziomym prętem, np. laboratoryjny (dobrze, jeżeli średnica pręta statywu będzie zbliżona do średnicy użytych śrub), ołówek.

- Zaznacz ołówkiem środki wszystkich ścianek klocka.
- Przewierć przez środek jednej ze ścian klocka, prostopadle do niej, otwór o średnicy odpowiadającej średnicy pręta statywu. Pośrodku każdej z czterech pozostałych ścianek klocka wywierć prostopadle do niej otwór o średnicy umożliwiającej wkręcenie śrub.

  Wskazówka. Użyj wiertła o średnicy nieco mniejszej od średnicy śrub. Najwygodniej jest najpierw wywiercić otwory na pożądaną głębokość, a potem ostrożnie je rozwiercić, zataczając wiertłem kształt stożka. W ten sposób śruby przy wkręcaniu będą się coraz bardziej klinować.
- Na każdą ze śrub nakręć jedną nakrętkę, następnie nałóż podkładkę i unieruchom ją na śrubie, dokręcając drugą nakrętkę.
- Śruby z nakrętkami i podkładkami wkręć w otwory w klocku na taką samą głębokość. Pamiętaj, aby śruby po wkręceniu nie były widoczne w otworze, który posłuży do zawieszenia klocka ze śrubami na statywie.
- Do ścianki z otworem przymocuj szpulkę, np. za pomocą kleju bądź dwustronnej taśmy klejącej. Zawiąż na szpulce jeden z końców nici i nawiń ją na szpulkę.
- Klocek ze śrubami i szpulką nałóż na poziomy pręt statywu.
- Do wolnego końca nici przywiąż ciężarek.

Opis doświadczenia

1. Przykręć nakrętki i podkładki jak najbliżej główek śrub.
2. Nawiń nić na szpulkę, przytrzymując ciężarek.
3. Przygotuj stoper. Jednocześnie włącz stoper i puść ciężarek.
4. Zmierz czas, w jakim wahadło się rozpędziło.
5. Przy zachowaniu tego samego układu nakrętek i podkładek na śrubach powtórz kilkakrotnie próbę i pomiar czasu. Wyznacz przyspieszenie kątowe podczas każdej z prób. Oblicz niepewność pomiarową.
6. Na śrubach zmień położenie nakrętek z podkładkami i wykonaj czynności opisane w punktach 2–5.
7. Powtórz kilkakrotnie opisane wyżej czynności.
8. Opracuj wyniki uzyskane w doświadczeniu i na ich podstawie wyznacz zależność między momentem bezwładności a rozmieszczeniem masy względem osi obrotu.