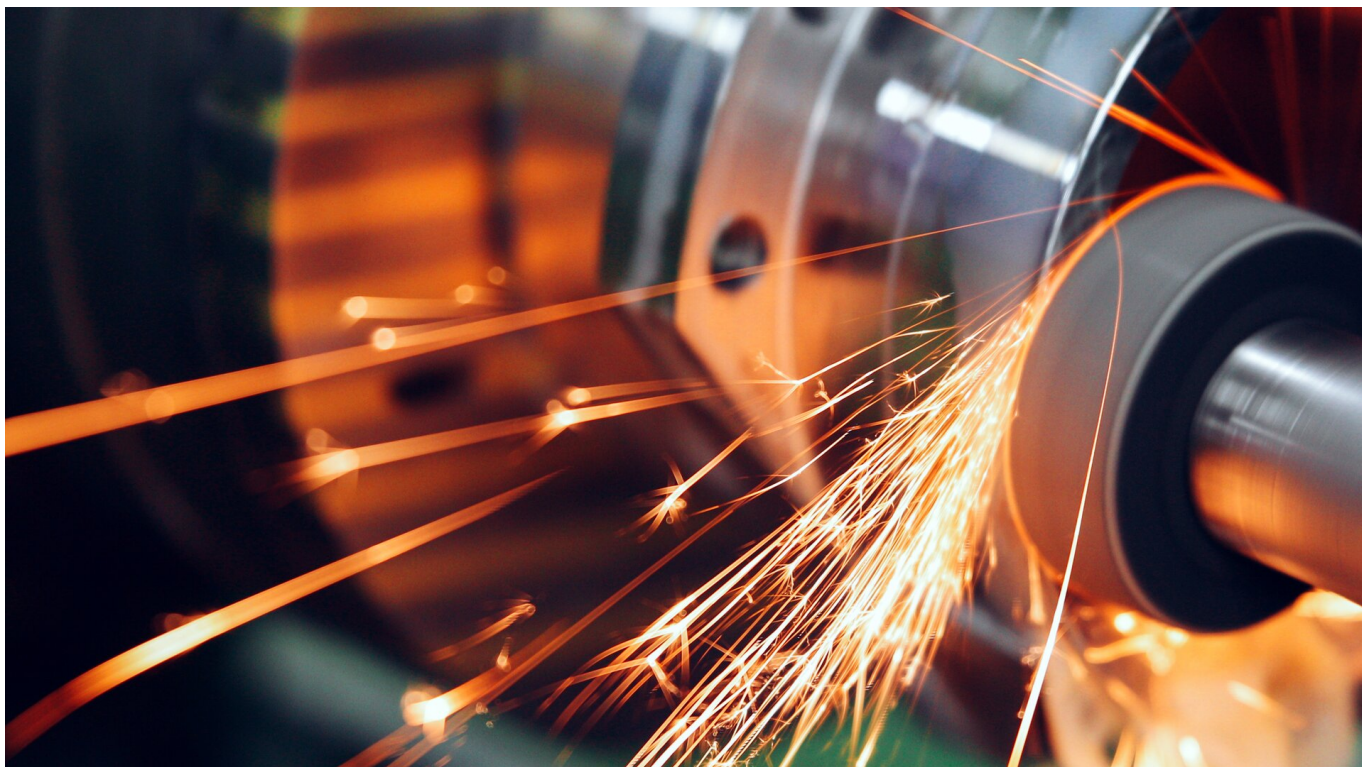




Wyznaczamy wartość współczynnika tarcia statycznego na podstawie analizy zachowania ciała na równi pochyłej

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film \(standardowy\)](#)
- [Symulacja interaktywna](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Wyznaczamy wartość współczynnika tarcia statycznego na podstawie analizy zachowania ciała na równi pochyłej

Źródło: dostępny w internecie: <https://www.istockphoto.com/pl/zdj%C4%99cie/iskry-lataj%C4%85ce-podczas-siatki-maszyn-i-wyka%C5%84czania-metalu-gm914855976-251789759> [dostęp 22.08.2019], iStockphoto, tylko do użytku edukacyjnego na zpe.gov.pl.

Czy to nie ciekawe?

Tarcie statyczne pomiędzy dwiema powierzchniami występuje w bardzo wielu codziennych zjawiskach. Przejście piechura od bezruchu do marszu na poziomym chodniku następuje dzięki sile tarcia statycznego podeszwy buta o podłogę. Jadący samochód – podobnie – w typowej sytuacji zatrzymuje się dzięki sile tarcia statycznego opon o jezdnię. Gdy chcesz przesunąć biurko lub szafę po podłodze, musisz doprowadzić do zerwania tarcia statycznego (siła tarcia statycznego przestaje działać). Zanim to osiągniesz, siła tarcia statycznego uniemożliwia wprowadzenie przedmiotu w ruch. Zdarza się, że zerwanie tarcia statycznego, któremu towarzyszy wprowadzenie obu powierzchni we względny ruch, jest bardzo niepożądane. Na przykład, dzieje się tak wtedy, gdy samochód wpada w poślizg podczas hamowania lub kiedy turysta w górach „traci przyczepność” na zboczu i... z powodu skręconej nogi, kończy wycieczkę w szpitalnej izbie przyjęć.



Rys. a. Podczas jednego pociągnięcia smyczka, struna jest wielokrotnie wprowadzana w drgania przez siłę tarcia statycznego.

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com> [dostęp 19.04.2022], domena publiczna.

Bardzo ciekawa sekwencja zrywania tarcia statycznego następuje przy grze na instrumentach smyczkowych. Muzyk przyciska smyczek do struny i przemieszcza go. W pierwszej fazie ruchu smyczka struna się napina, po czym dochodzi do zerwania tarcia statycznego. Struna wykonuje, przez bardzo krótki czas, silnie tłumione drgania – instrument wydaje dźwięk. Po wytłumieniu drgań smyczek ponownie „zaczepia” znieruchomiałą strunę – ponownie pojawia się tarcie statyczne, struna zostaje napięta, tarcie statyczne zerwane, struna drga. Takie szybko po sobie następujące sekwencje zapewniają instrumentom smyczkowym bardzo specyficzne brzmienie, niemożliwe do uzyskania w instrumentach strunowych szarpanych (np. gitara) czy młoteczkowych (np. pianino).

Nie ma wątpliwości: warto wykonać eksperyment, w którym zbadasz, pod pełną kontrolą, jeden z aspektów zrywania tarcia statycznego.

Twoje cele

- zdefiniujesz siłę tarcia statycznego,
- zdefiniujesz współczynnik tarcia statycznego pomiędzy dwiema powierzchniami,
- opisziesz, od czego zależy maksymalna wartość siły tarcia statycznego,
- zastosujesz wiedzę do sformułowania warunku zerwania tarcia statycznego na równi pochyłej,
- przeanalizujesz i zinterpretujesz wyniki sfilmowanego eksperymentu, w którym wyznaczana jest wartość współczynnika tarcia statycznego.

Przeczytaj

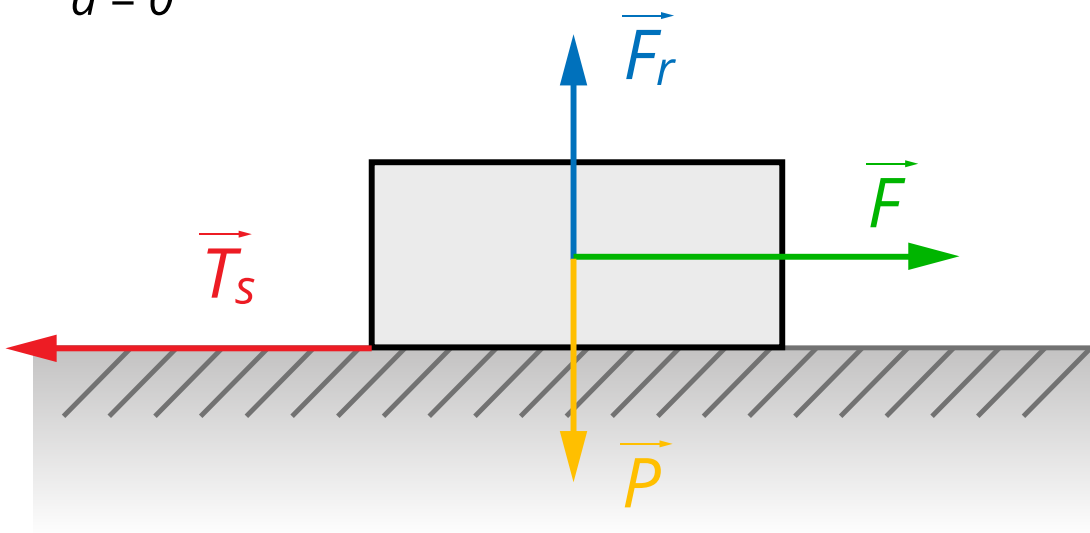
Warto przeczytać

Tarcie statyczne to zjawisko występujące na styku dwóch powierzchni, które względem siebie się nie przemieszczają. Najprostszą miarą tarcia statycznego jest **siła tarcia statycznego** $\vec{T}_s$. Ma ona niezerową wartość tylko wtedy, gdy występuje zewnętrzna wypadkowa siła $\vec{F}$ (lub jej składowa), równoległa do obu nieruchomych powierzchni. Sytuację taką pokazano na Rys. 1. Skoro przyspieszenie klocka jest zerowe, to prócz siły $\vec{F}$ musi nań działać inna siła, o przeciwnym do siły $\vec{F}$ zwrocie i jednakowej wartości. Siłę tę przypisujemy oddziaływaniu z powierzchnią, z którą styka się klocek i nazywamy **siłą tarcia statycznego** $\vec{T}_s$, gdyż prędkość klocka jest zerowa.

Zapisujemy to w następujący sposób:

$$\vec{T}_s = -\vec{F}.$$

$$\begin{aligned}\vec{v} &= 0 \\ \vec{a} &= 0\end{aligned}$$



Rys. 1. Siły działające na nieruchomy względem poziomego podłoża klocek: $\vec{F}$ - siła zewnętrzna, $\vec{T}_s$ - siła tarcia statycznego, $\vec{P}$ - siła ciężkości, $\vec{F}_r$ - siła reakcji podłoża, którą dla czytelności rysunku przyłożono w środku klocka.

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Ważne!

Na Rys. 1. siła zewnętrzna $\vec{F}$ i siła tarcia statycznego $\vec{T}_s$ są **równoległe do powierzchni styku** obydwu ciał (klocka i płaszczyzny). Oprócz tych sił na klocek działają jeszcze siła ciężkości $\vec{P}$ i siła reakcji (sprężystości) podłoża $\vec{F}_r$, które są **prostopadłe do powierzchni styku** obydwu ciał, równe co do wartości, ale przeciwnie skierowane.

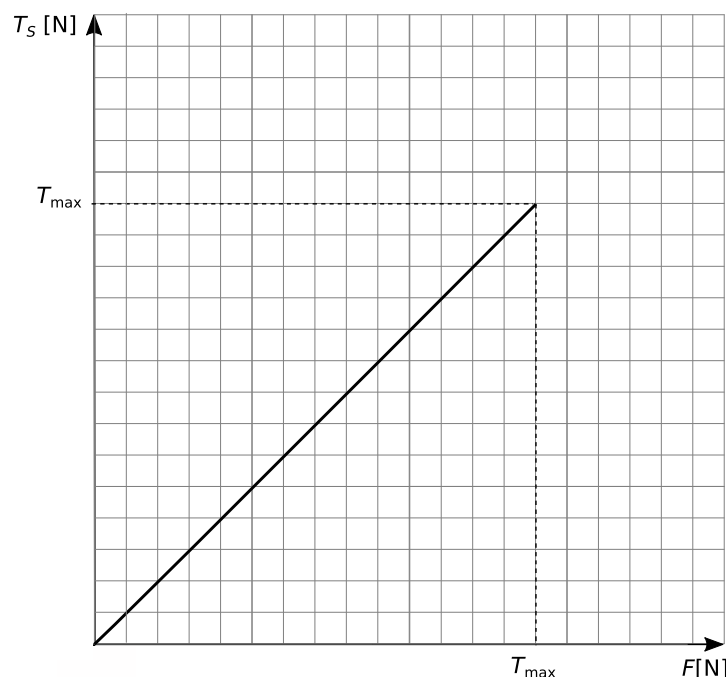
Siła tarcia statycznego ma określoną maksymalną wartość!

Z powyższego wynika, że zwiększenie wartości siły zewnętrznej $\vec{F}$ powoduje wzrost wartości siły $\vec{T}_s$. Tak jednak jest tylko do osiągnięcia przez siłę tarcia statycznego określonej granicznej wartości $T_{\max}$ (Rys. 2.). Wartość ta zależy od dwóch czynników:

- od mikroskopowych właściwości powierzchni klocka i podłoża; właściwości te opisuje **współczynnik tarcia statycznego** f ,
- od wartości siły nacisku $\vec{F}_n$, z jaką klocek działa na podłoże; przypomnijmy, że zgodnie z III zasadą dynamiki, siła ta jest co do wartości równa sile sprężystości, ale przeciwnie do niej skierowana: $\vec{F}_n = -\vec{F}_r$ oraz $F_n = m \cdot g$ (zob. Rys. 1.).

Można to zapisać przy pomocy wzoru

$$T_s \leq T_{\max}, \quad \text{gdzie} \quad T_{\max} = f \cdot F_n.$$



Rys. 2. Siła tarcia statycznego ma tę samą wartość, co siła zewnętrzna F . Gdy wartość F osiągnie $T_{\max}$, następuje zerwanie tarcia statycznego.

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Zerwanie tarcia statycznego

Zwiększanie zewnętrznej siły $\vec{F}$ powoduje wzrost siły $\vec{T}_s$. Gdy jednak wartość tej ostatniej osiągnie graniczną wartość $T_{\max}$, następuje zerwanie tarcia statycznego – klocek zaczyna poruszać się względem podłoża. Siła tarcia statycznego przestaje działać – oddziaływanie klocka i podłoża opisujemy za pomocą siły tarcia kinetycznego lub tocznego (zob. e-materiał pt. *Klasyfikujemy opory ruchu*). Warunek zerwania tarcia statycznego zapisujemy w następujący sposób:

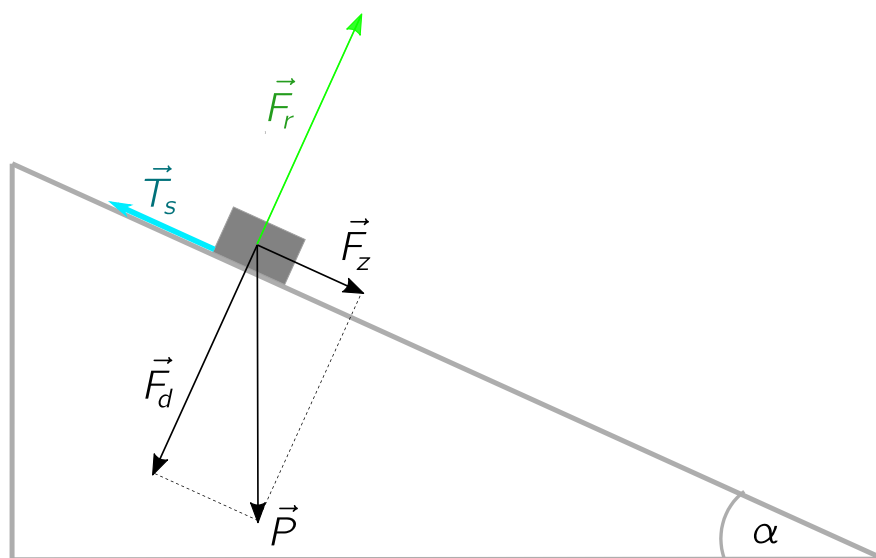
$$F \geq T_{\max} \quad \text{albo} \quad F \geq f \cdot F_n .$$

W powyższych relacjach F oznacza wartość wypadkowej siły (lub jej składowej) działającej na ciało w płaszczyźnie styku klocka i podłoża, F_n – wartość siły nacisku klocka na podłoże, f – **współczynnik tarcia** klocka o podłoże.

Zrywanie tarcia statycznego na równi pochyłej

Często mamy do czynienia z sytuacją, w której na nachylonym podłożu ciało utrzymuje się w spoczynku dzięki sile tarcia statycznego. Przykładem może być człowiek na stoku góry – siła tarcia jego buta o podłoże zapewnia mu stabilność. Ale nie w każdych warunkach!

Turysta musi unikać sytuacji, w których nastąpiłoby zerwanie tarcia statycznego – dochodzi wtedy do poślizgnięcia się. Mówimy, że but „stracił przyczepność”. Od czego to zależy? Od współczynnika tarcia statycznego? Od nachylenia stoku? Od masy turysty? Jeszcze od jakiegoś czynnika? Spróbujemy odpowiedzieć na te pytania za pomocą najprostszego modelu: przeanalizujemy klocek, który spoczywa na równi pochyłej o kącie nachylenia α (Rys. 3.).



Rys. 3. Siły działające na klocek spoczywający na równi pochyłej. Siłę ciężkości $\vec{P}$ rozłożono na składowe: równoległą $\vec{F}_z$ i prostopadłą $\vec{F}_d$ do równi. Dla czytelności na rysunku nie przedstawiono siły nacisku klocka na równię $\vec{F}_n$, zaś siłę reakcji równi $\vec{F}_r$ przyłożono w środku klocka.

Na klocek działają następujące siły i ich składowe:

- Siła ciężkości klocka $\vec{P}$ o wartości $P = m \cdot g$.
- Składowa $\vec{P}$ wzdłuż równi, $\vec{F}_z$, ma wartość $F_z = mg \sin \alpha$. Składowa ta sprawiłaby klocek w ruch, gdyby nie działanie siły tarcia statycznego.
- Składowa $\vec{P}$ prostopadła do równi, $\vec{F}_d$, ma wartość $F_d = mg \cos \alpha$. Składowa ta dociska klocek do równi, powodując pojawienie się siły nacisku klocka na równię $\vec{F}_n$ (nieprzedstawiona na rysunku) oraz siły reakcji równi $\vec{F}_r$.
- Siła reakcji $\vec{F}_r$, z jaką równia działa na klocek. Z III zasady dynamiki Newtona wynika, że wartości F_r oraz F_n są jednakowe.
- Siła tarcia statycznego $\vec{T}_s$ jest zwrócona przeciwnie do $\vec{F}_z$ i równa jej co do wartości.

Do zerwania tarcia statycznego i ześlizgu klocka po równi dochodzi, gdy

$$F_z \geq T_{\max},$$

czyli

$$F_z \geq f \cdot F_n.$$

Po podstawieniu do tego warunku wartości sił F_z i F_n otrzymujemy:

$$mg \sin \alpha \geq f mg \cos \alpha,$$

więc ostatecznie

$$\operatorname{tg} \alpha \geq f.$$

W ostatnim przekształceniu założyliśmy, że $\alpha < 90^\circ$. Powyższy warunek możemy wypowiedzieć następująco: **Dopóki nachylenie równi jest odpowiednio małe, klocek nie zsuwa się z równi**. Gdy zwiększamy jej nachylenie, to po osiągnięciu granicznego kąta α_g następuje zerwanie tarcia statycznego. Ten kąt zależy wyłącznie od [współczynnika tarcia statycznego](#):

$$\operatorname{tg} \alpha_g = f.$$

Wygląda więc na to, że pomysł na wyznaczenie współczynnika tarcia statycznego ciała o sztywną powierzchnię jest dość prosty: połóż taką powierzchnię (na przykład deskę) na stole, połóż na niej klocek. Unoś powoli jeden koniec deski, aż klocek zacznie się ślizgać. Zmierz w tym momencie kąt, jaki tworzy deska z blatem stołu, oblicz za pomocą kalkulatora tangens tego kąta. Taki pomiar możesz wykonać nawet w domu – warto!

Słowniczek

Tarcie statyczne

(*ang.: static friction*) oddziaływanie przeciwdziałające wprawieniu w ruch względem siebie dwóch powierzchni. Jego miarą jest siła tarcia statycznego.

Współczynnik tarcia statycznego

(*ang.: static friction coefficient*) wielkość charakteryzująca stykające się ze sobą powierzchnie, określająca maksymalną siłę tarcia statycznego.

Film (standardowy)

Doświadczalne wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego

Obejrzyj film prezentujący pomiar granicznego kąta, przy którym drewniany klocek, wraz z umieszczonym na nim dodatkowym obciążeniem, zaczyna się zsuwać z równi pochyłej. Pomiar tego kąta wykorzystamy do wyznaczenia współczynnika tarcia statycznego tego klocka o równię.

Po obejrzeniu filmu przeczytaj i wykonaj zamieszczone poniżej polecenia, przy pomocy których krok po kroku pokazujemy i tłumaczymy, w jaki sposób należy „analizować” wykonane pomiary. Polecenia te pomogą Ci zinterpretować uzyskane wyniki i określić wartość współczynnika tarcia.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1Wq7meOYuuZe>

Wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Film przedstawia eksperyment, w którym klocek drewniany zsuwa się z równi pochyłej. Na podstawie kąta nachylenia równi wyznaczany jest współczynnik tarcia statycznego. Zapoznaj się z audiodeskrypcją filmu.

I. Na rozgrzewkę...

Polecenie 1

Wskaż, spośród poniższych, elementy wyposażenia **nieprzydatne** w wykonywanym doświadczeniu.

☐ kątomierz

☐ woltomierz

☐ odważniki

☐ linijka

☐ amperomierz

☐ deska (równia)

☐ klocek

☐ waga

II. Przedstawienie wyników w tabeli i na wykresie

Polecenie 2

Zapoznaj się z wynikami pomiarów. Przygotuj tabelkę wyników, np. w arkuszu kalkulacyjnym oraz wykres kąta α_g w funkcji m – masy odważników dociążających klocek. Następnie zapoznaj się z tabelą wyników oraz z wykresem zależności $\alpha_g(m)$ zamieszczonymi w odpowiedziach. Sprawdź, czy Twoja tabela i wykres są takie same. Jeśli stwierdzisz niezgodność, usuń ją.

Polecenie 3

Zgodnie z wyrażeniem wyprowadzonym w części "Przeczytaj", kąt graniczny α_g , przy którym następuje zerwanie tarcia statycznego, zależy wyłącznie od współczynnika tarcia statycznego f klocka o deskę. Można więc postawić hipotezę, że kąt graniczny nie zależy od masy m dodanych odważników. Wskaż najbardziej trafny wniosek związany z tą hipotezą, wynikający z analizy wykresu.

☐ Wykres nie pozwala rozstrzygnąć tej hipotezy, gdyż uzyskane wartości α_g są różne.

☐ Wykres pokazuje, że zmierzone wartości α_g są wprawdzie różne, ale różnice te wynikają raczej z niepewności pomiarowej, niż z zależności od dodanej masy.

☐ Wykres nie ma żadnego związku z tą hipotezą.

III. Wyznaczanie wartości oraz niepewności pomiaru kąta

Polecenie 4

Oblicz $\alpha_{\text{śr}}$. Wykorzystaj przygotowany arkusz kalkulacyjny i uzupełnij tabelę o odpowiedni wiersz.

Polecenie 5

Oblicz niepewność standardową $u(\alpha_g)$ pomiaru kąta granicznego. Wykorzystaj przygotowany arkusz kalkulacyjny i zastosuj odpowiednie wzory. Jeśli ich nie pamiętasz - zajrzyj do podpowiedzi.

Ważne!

Tę część opracowania wyników podsumowujemy podając α_g oraz $u(\alpha_g)$:

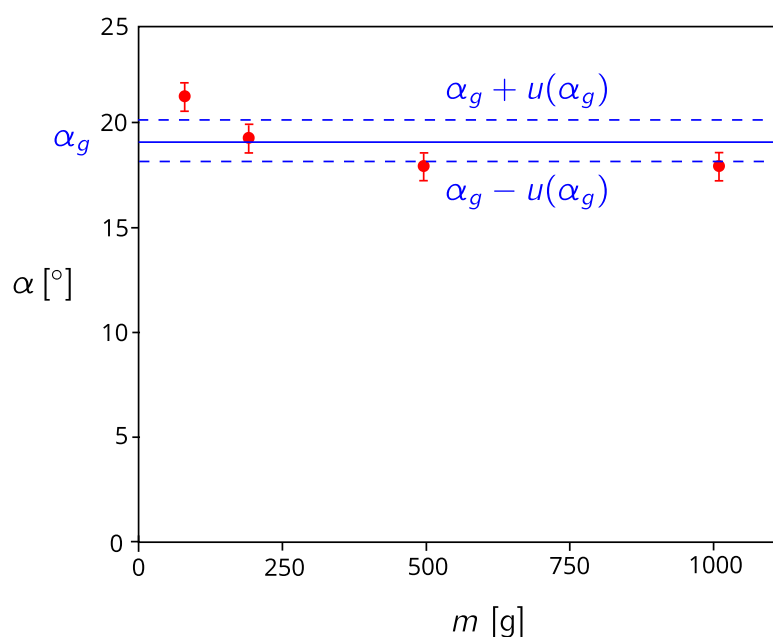
$$\alpha_g = 18,8^\circ, \quad u(\alpha_g) = 1,3^\circ,$$

przy czym dopuszczalny jest też poniższy zapis:

$$\alpha_g = 18,8 (1,3)^\circ.$$

Zauważ, że wartość średnia $\alpha_{\text{śr}}$ została zaokrąglona do takiej liczby cyfr znaczących, by ostatnia cyfra znacząca wyniku odpowiadała ostatniej cyfrze znaczącej niepewności pomiaru.

Powyższy wynik można nanieść na wykres, na którym umieszczono kolejne wyniki pomiaru kąta granicznego:



Wykres niepewności pomiarowych dla wykonanego eksperymentu

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Na wykresie punkty pomiarowe wraz z odcinkami niepewności granicznych są zaznaczone kolorem czerwonym (zob. Polecenie 1.). Ciągłą niebieską linią zaznaczono średnią wartość kąta: $\alpha_g = \alpha_{sr}$ (zob. Polecenie 4.), a niebieskimi przerywanymi liniami zaznaczono niepewność pomiarową $u(\alpha_g)$ tej wielkości (zob. Polecenie 5.). Z wykresu wynika, że pierwszy pomiar, dla klocka obciążonego masą $m = 100$ g, znacząco odbiega od pozostałych. Leży on poza odcinkiem niepewności zmierzonego kąta granicznego: $\alpha_g = 18,8 (1,3)^\circ$.

IV. Wyznaczenie współczynnika tarcia statycznego klocka o deskę oraz niepewności jego pomiaru

Ważne!

Wartość współczynnika tarcia nie jest wyznaczana *bezpośrednio* – na podstawie pojedynczego pomiaru przyrządem. W naszym doświadczeniu współczynnik tarcia f jest wyznaczany jako wielkość mierzona *pośrednio*. Oznacza to, że f jest funkcją wielkości zmierzonej bezpośrednio: kąta granicznego α_g , przy którym zerwane zostaje tarcie statyczne, skoro

$$f(\alpha_g) = \operatorname{tg} \alpha_g.$$

Niepewność pomiarową takiej wielkości, tzn. zależnej od jednego pomiaru bezpośredniego, wyznacza się z następującego wzoru:

$$u(f) = \frac{1}{2} |f(\alpha_g + u(\alpha_g)) - f(\alpha_g - u(\alpha_g))|,$$

czyli

$$u(f) = \frac{1}{2} |\operatorname{tg}(\alpha_g + u(\alpha_g)) - \operatorname{tg}(\alpha_g - u(\alpha_g))|,$$

gdzie $u(\alpha_g)$ jest niepewnością standardową pomiaru kąta, którą wyznaczyliśmy w ramach jednego z poprzednich poleceń.

Metody wyznaczania niepewności w pomiarach pośrednich są szczegółowo omówione w e-materiale pt. *Niepewności pomiarów pośrednich*.

Polecenie 6

Oblicz wartość współczynnika tarcia uzyskaną w tym doświadczeniu.

Polecenie 7

Oblicz niepewność pomiaru pośredniego $u(f)$, związaną z niepewnością pomiaru bezpośredniego $u(\alpha_g)$.

Ważne!

Możemy już podać ostateczny wynik naszego pomiaru:

$$f = 0,339, \quad u(f) = 0,051,$$

co można również zapisać w następujący sposób:

$$f = 0,339 (0,051).$$

Wartość f została zaokrąglona do trzeciej cyfry po przecinku, ponieważ ostatnia cyfra znacząca niepewności pomiaru przypada właśnie na trzecią cyfrę po przecinku.

Symulacja interaktywna

Symulacja zrywania tarcia statycznego na równi pochyłej

Zdarzyło Ci się stać na stromym zboczu? W porządnych butach górskich, czy w miejskim obuwiu? W suchy letni dzień, w jesienną słońce, a może mroźną zimą? Kiedy „traci się przyczepność do podłoża”? Czy to zależy od stromizny stoku? Od masy wędrowca?

Na te pytania (i wiele podobnych) znajdziesz odpowiedź korzystając z symulacji. Zawiera ona najprostszy model pozwalający rozgraniczyć pomiędzy utrzymaniem się na stromiznie, a zsuwaniem się z niej.

Symulacja przedstawia nachyloną pod kątem α równię pochyłą, w polu grawitacyjnym g , z umieszczonym na niej klockiem o masie m . Możesz wybrać wartość:

- współczynnika tarcia klocka o równię f_{tarcia} ,
- masy klocka m .



Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/D14w0gHhb>

Polecenie 1

Zwiększaj stopniowo wysokość lewego końca równi przedstawionej na symulacji - zwiększa się wtedy kąt α . Obserwuj zmiany wartości sił (także ich składowych) działających na klocek. Zwróć uwagę, że w miarę zwiększania się stromizny równi, zmienia się także wartość maksymalna siły tarcia statycznego. Staraj się uchwycić graniczną wartość α_g , przy której następuje zerwanie tarcia statycznego. Klocek traci wtedy przyczepność i ześlizguje się z równi. Czy wartość α_g zależy od masy klocka?

Polecenie 2

W miarę zwiększania się stromizny równi, maleje wartość maksymalna siły tarcia statycznego $T_{\max}$. Wskaż bezpośredni powód tej zmiany.

- ☐ Maleje współczynnik tarcia statycznego f klocka o równię.
- ☐ Wzrasta wartość siły nacisku F_n klocka na równię.
- ☐ Maleje wartość siły nacisku F_n klocka na równię.
- ☐ Wzrasta wartość składowej ciężaru, równoległej do równi F_s .

Polecenie 3

Ciało spoczywa na równi, której początkowe nachylenie jest równe $\alpha = 5^\circ$. Współczynnik tarcia statycznego $f \neq 0$. Wskaż charakter zmiany wartości sił (składowych sił), gdy kąt α zacznie się zwiększać.

1. ciężar klocka ,

2. składowa zsuwająca ciężaru ,

3. wartość składowej dociskającej ciężaru ,

4. wartość siły tarcia statycznego ,

5. maksymalna wartość siły tarcia statycznego .

Polecenie 4

Kłosek spoczywa na nachylonej równi. Nagle doszło (np. wskutek zmiany temperatury i właściwości powierzchni) do samoczynnego wzrostu współczynnika tarcia statycznego kłosa o równię f . Wskaż charakter zmiany wartości sił (składowych sił) w takiej sytuacji.

1. ciężar kłosa ,

2. składowa zsuwająca ciężaru ,

3. wartość składowej dociskającej ciężaru ,

4. wartość siły tarcia statycznego ,

5. maksymalna wartość siły tarcia statycznego .

Polecenie 5

Ciało spoczywa na równi o niezerowym nachyleniu. Taki układ przenosimy na Marsa (przyspieszenie grawitacyjne przy jego powierzchni ma mniejszą wartość niż ziemskie g). Wskaż charakter zmiany wartości sił (składowych sił) w takiej sytuacji.

1. ciężar klocka ☐ wzrośnie ☐ nie zmieni się ☐ zmaleje ☐ ,

2. wartość składowej zsuwającej ciężaru ☐ wzrośnie ☐ nie zmieni się ☐ zmaleje ☐ ,

3. wartość składowej dociskającej ciężaru ☐ wzrośnie ☐ nie zmieni się ☐ ☐ zmaleje ☐ ,

4. wartość siły tarcia statycznego ☐ wzrośnie ☐ nie zmieni się ☐ zmaleje ☐ ,

5. wartość maksymalnej siły tarcia statycznego ☐ wzrośnie ☐ nie zmieni się ☐ ☐ zmaleje ☐ .

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji

Imię i nazwisko autora:	Włodzimierz Natorf
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Wyznaczanie współczynnika tarcia statycznego za pomocą równi pochyłej
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony

Podstawa programowa:	Cele kształcenia – wymagania ogólne III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji oraz doświadczeń i wnioskowanie na podstawie ich wyników. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 6) tworzy teksty, tabele, diagramy lub wykresy, rysunki schematyczne lub blokowe dla zilustrowania zjawisk bądź problemu; właściwie skaluje, oznacza i dobiera zakresy osi; 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach; 8) rozpoznaje zależność rosnącą bądź malejącą na podstawie danych z tabeli lub na podstawie wykresu; rozpoznaje proporcjonalność prostą na podstawie wykresu; 10) przeprowadza wybrane obserwacje, pomiary i doświadczenia korzystając z ich opisów; planuje i modyfikuje ich przebieg; formułuje hipotezę i prezentuje kroki niezbędne do jej weryfikacji; 13) rozróżnia błędy przypadkowe i systematyczne; 14) wyznacza średnią z kilku pomiarów jako końcowy wynik pomiaru powtarzanego; 15) posługuje się pojęciem niepewności pomiaru wielkości prostych i złożonych; zapisuje wynik pomiaru wraz z jego jednostką oraz z uwzględnieniem informacji o niepewności; uwzględnia niepewności przy sporządzaniu wykresów; 16) przeprowadza obliczenia i zapisuje wynik zgodnie z zasadami zaokrąglania oraz zachowaniem liczby cyfr znaczących wynikającej z dokładności pomiaru lub z danych. II. Mechanika. Uczeń: 17) opisuje opory ruchu (opory ośrodka, tarcie statyczne, tarcie kinetyczne); rozróżnia współczynniki tarcia kinetycznego oraz tarcia statycznego; omawia rolę tarcia na wybranych przykładach.
------------------------------------	--

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. definiuje siłę tarcia statycznego, 2. definiuje współczynnik tarcia statycznego pomiędzy dwiema powierzchniami, 3. opisuje, od czego zależy maksymalna wartość siły tarcia statycznego, 4. formułuje warunek zerwania tarcia statycznego na równi pochyłej, 5. przeprowadza eksperyment, w którym badane jest zrywanie tarcia statycznego na równi, 6. analizuje i interpretuje wyniki eksperymentu; wyznacza wartość współczynnika tarcia statycznego.
Strategie nauczania:	IBSE; strategia eksperymentalno-obszewacyjna
Metody nauczania:	praca eksperymentalna uczniów
Formy zajęć:	w grupach 3-osobowych oraz w zespole klasowym
Środki dydaktyczne:	Każda grupa wyposażona jest w zestaw doświadczalny: - deska (lub inne sztywne podłoże) o długości od 40 do 100 cm; - klocek lub podobny przedmiot, na którym można ustawiać odważniki (lub inne elementy dociążające) w sposób uniemożliwiający ich zsunięcie przy nachyleniu klocka; - odważniki 50 gramowe (lub komplet 50 g, 100 g, 200 g) albo inne obciążniki o jednakowych masach, rzędu 8 sztuk; - sztywna linijka o długości nie mniejszej niż długość deski, wystarczająca jest dokładność 0,5 cm; - kalkulator.
Materiały pomocnicze:	instrukcja wykonania doświadczenia, sporządzona przez nauczyciela
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Nauczyciel prosi uczniów o przypomnienie podstawowych własności siły tarcia statycznego. Przeprowadza jeden wzorcowy pomiar, z klockiem nieobciążonym. Wskazuje istnienie granicznego nachylenia, przy którym zerwane zostaje tarcie statyczne.

Uczniowie spekulują, czy nachylenie to wzrastałoby, malałoby, czy pozostawało jednakowe w miarę dociążania klocka. Nauczyciel podaje wzór łączący kąt granicznego nachylenia równi ze współczynnikiem tarcia. Zapowiada, że w ramach pracy domowej uczniowie zapoznają się z wyprowadzeniem tego wzoru.

Nauczyciel formułuje hipotezę badawczą: „Nachylenie graniczne, przy którym zerwane zostaje tarcie statyczne, nie zależy od masy klocka” oraz cele doświadczenia: „Zweryfikować tę hipotezę. W przypadku jej potwierdzenia, wyznaczyć wartość współczynnika tarcia”.

Faza realizacyjna:

Uczniowie w grupach mierzą (bezpośrednio, z dokładnością do 1 cm) wysokość graniczną, na jaką należy podnieść jeden koniec równi, by doprowadzić do zerwania tarcia statycznego. Pomiar (pojedynczy) przeprowadzają dla 6-8 różnych obciążeń klocka, w tym dla klocka nieobciążonego. Uczniowie mierzą jednokrotnie (bezpośrednio, z dokładnością do 0,5 cm lub lepszą) długość użytej deski. Wyniki pomiarów wpisują do tabeli (wzór w załączeniu). Po zakończeniu pomiarów uczniowie uzupełniają tabelę, obliczając graniczny kąt nachylenia równi. Sporządzają wykres zależności kąta α_g od obciążenia klocka.

Faza podsumowująca:

Uczniowie rozstrzygają, na podstawie swych pomiarów, postawioną hipotezę badawczą. Nauczyciel, kierując dyskusją, wskazuje problematykę niepewności każdego pojedynczego pomiaru. Zwraca uwagę na rozrzuty otrzymanych wyników. Podsumowuje dyskusję i formułuje rozstrzygnięcie hipotezy. Wskazuje przy tym, że przyjąć można, iż podany na początku lekcji związek ma zastosowanie do wykonanego eksperymentu.

Praca domowa:

Uczniowie (w grupach) zapoznają się z e-materiałem. Przeprowadzają symulację wykonanego w klasie eksperymentu. Na podstawie zestawu ćwiczeń dokonują analizy własnych wyników, uzyskanych w klasie. Wyznaczają wartość współczynnika tarcia wraz z niepewnością pomiarową.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Cały e-materiał może służyć jako wprowadzenie do analogicznej lekcji doświadczalnej, jak opisana powyżej.
--	---