Analiza ruchu ciał w układach nieinercjalnych

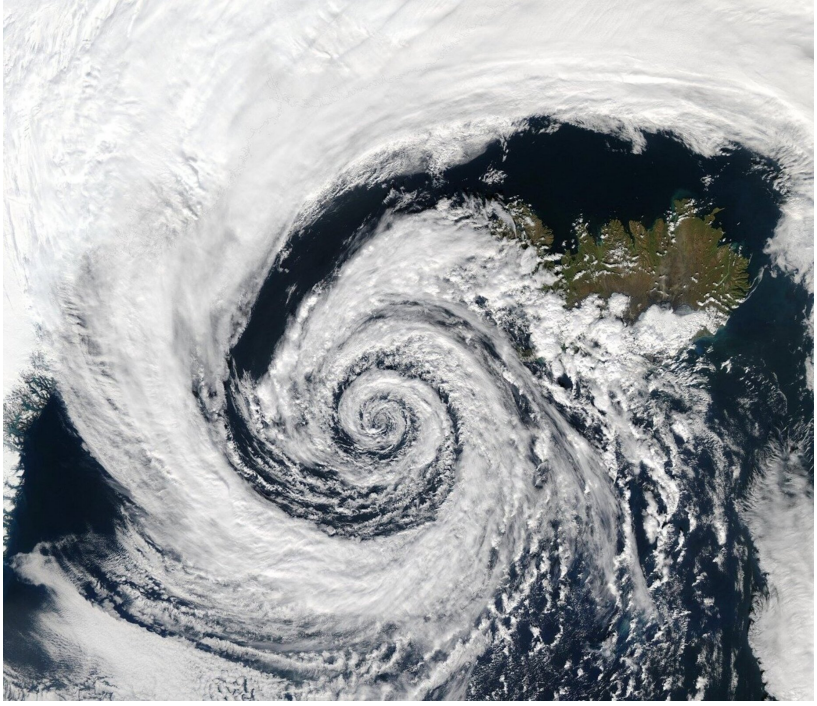
- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Symulacja interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://pixabay.com/pl/photos/kettenkarusell-karuzela-oktoberfest-4500762/ [dostęp 20.08.2022], domena publiczna.

Czy to nie ciekawe?

W układach nieinercjalnych, tj. poruszających się z przyspieszeniem, ruch ciał opisywany jest w inny sposób niż w układach inercjalnych. Wynika to z faktu, że na ciała w układzie nieinercjalnym działa dodatkowa, pozorna, siła bezwładności powodująca ich ruch względem tego układu. Oznacza to, że w ogólności wyniki obserwacji ruchu ciała w układzie nieinercjalnym będą inne, od tych uzyskanych przez obserwatora w układzie inercjalnym.

Łatwo podać przykłady układów nieinercjalnych. Pasażer w hamującym autobusie, kierowca skręcającego samochodu, czy dziecko na wirującej karuzeli to przykłady ciał, z którymi wiążemy układy nieinercjalne. Także wirująca Ziemia jest takim układem.



Rys. a. Dzięki analizie ruchu ciał w układzie nieinercjalnym możemy wytłumaczyć, dlaczego cyklony na półkuli północnej obracają się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.
Źródło: dostępny w internecie: https://visibleearth.nasa.gov/images/68992/low-off-iceland [dostęp 21.04.2022], domena publiczna.

W tym e-materiale rozważymy kilka przypadków, w których analiza ruchu w układzie nieinercjalnym pozwala szybciej i prościej opisać ten ruch.

Twoje cele

- dowiesz się, jakie siły działają na ciała w układach nieinercjalnych,
- zastosujesz analizę w układzie nieinercjalnym do szybszego i prostszego opisania ruchu,
- przeanalizujesz sposoby podejścia do tych samych zagadnień w układach inercjalnych,
- przeanalizujesz ruch w układzie nieinercjalnym na przykładzie samochodu wchodzącego w zakręt.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Układy nieinercjalne związane są z ciałami poruszającymi się z przyspieszeniem. Układem nieinercjalnym jest na przykład hamujący samochód, rozpędzający się samolot lub rowerzysta wjeżdżający ze stałą szybkością w łuk zakrętu. W pierwszych dwóch przypadkach istnienie przyspieszenia związane jest ze zmianą wartości wektora prędkości ciała, w trzecim – ze zmianą kierunku wektora prędkości.

Aby poprawnie opisać ruch ciał w układach nieinercjalnych (np. kierowcy w hamującym samochodzie), do sił działających na ciało należy dodać tzw. **siły pozorne**. Najprostszą siłą pozorną jest **siła bezwładności**. Jej istnienie wynika z faktu, że ciało porusza się względem przyspieszającego układu odniesienia. Siła ta wynosi $\overrightarrow{F_B} = -m\overrightarrow{a}$, gdzie $\overrightarrow{a}$ jest przyspieszeniem układu. Znak minus wskazuje, że siła ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora przyspieszenia.

Więcej informacji na temat układów nieinercjalnych i sił bezwładności znajdziesz m.in. w e-materiałach „W jaki sposób definiujemy układ inercjalny, nieinercjalny i laboratoryjny?”, „Co to jest siła bezwładności i jakie są jej cechy” oraz „W jaki sposób opisać ruch ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych?”. W tym e-materiale skupimy się na analizie kilku przykładów, w których wykorzystanie układu nieinercjalnego do opisu ruchu jest wygodniejsze niż wykorzystanie układu inercjalnego.

Przykład 1

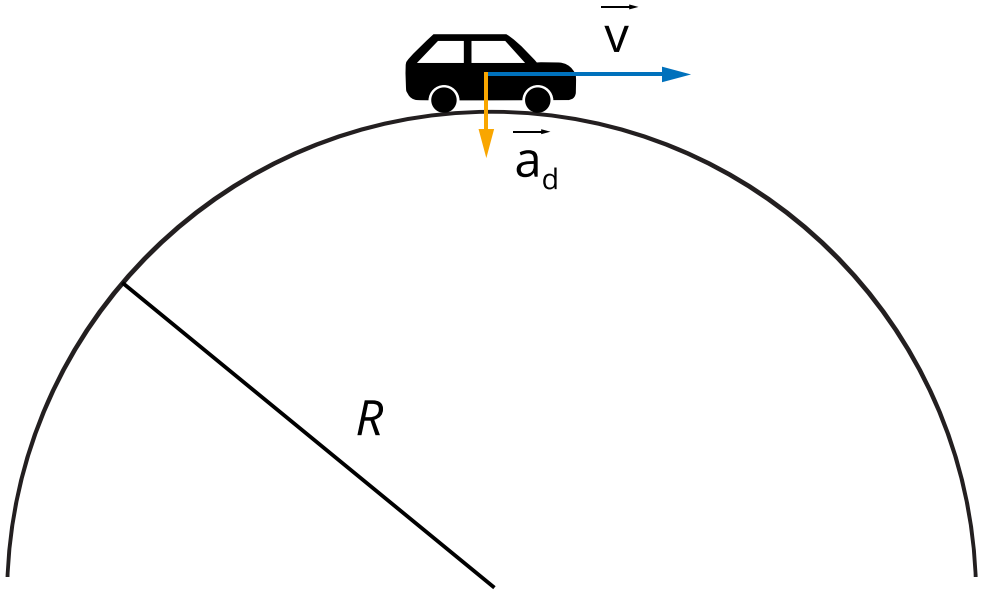
Samochód wjeżdża z prędkością $v = 72\,\mathrm{km/h}$ na most w kształcie łuku o promieniu $R = 200\,\mathrm{m}$. Wyznacz wartość siły nacisku, jaką wywiera kierowca na fotel samochodu w najwyższym punkcie mostu, jeśli masa kierowcy wynosi $m = 75\,\mathrm{kg}$. Przy jakiej prędkości samochodu kierowca znajdowałby się w stanie nieważkości?

Dane:	Szukane:

Dane:	Szukane:
prędkość samochodu $v = 72\,\mathrm{km/h}$ promień mostu $R = 200\,\mathrm{m}$ masa kierowcy $m = 75\,\mathrm{kg}$ przyspieszenie ziemskie $g = 9,81\,\mathrm{m/s^2}$	wartość siły nacisku kierowcy na fotel samochodu w najwyższym punkcie mostu $F_N = ?$ prędkość samochodu, dla której kierowca znajdowałby się w stanie nieważkości $v_n = ?$

Analiza zadania

W inercjalnym układzie odniesienia (Rys. 1.) samochód porusza się po łuku z prędkością o stałej wartości 20 m/s. Kierunek wektora prędkości ulega zmianie, za co odpowiada przyspieszenie dośrodkowe o wartości $a_d = \frac{v^2}{R}$.



Rys. 1. Prędkość i przyspieszenie dośrodkowe w układzie inercjalnym.

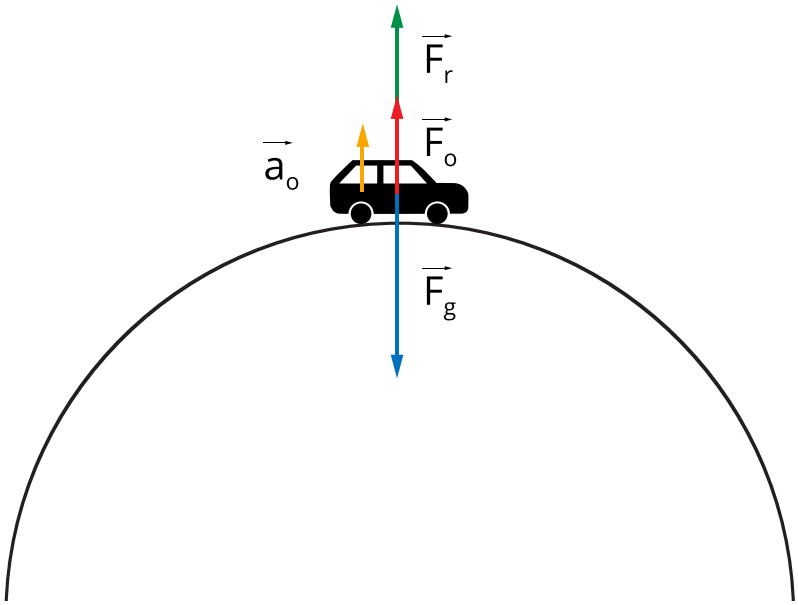
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Znamy zatem wartość przyspieszenia, z jakim porusza się samochód. Oznacza to, że w związanym z samochodem układzie nieinercjalnym, na kierowcę będzie działała pewna siła bezwładności. Ponieważ przyspieszenie w układzie inercjalnym wynosi $a_d = \frac{v^2}{r}$ i jest skierowane do środka okręgu, to siła bezwładności (pozorna) w układzie nieinercjalnym skierowana musi być przeciwnie – od środka okręgu. Siłę taką nazywamy siłą odśrodkową

$\overrightarrow{F_o}$. Związane z nią jest przyspieszenie odśrodkowe $\overrightarrow{a_o}$ o tej samej wartości, co przyspieszenie dośrodkowe $\overrightarrow{a_d}$. Wartość siły odśrodkowej wynosi zatem

$$F_o = \frac{mv^2}{R}.$$

Wszystkie siły działające na kierowcę w układzie nieinercjalnym przedstawiliśmy na Rys. 2. Są to: siła ciężkości kierowcy $\overrightarrow{F_g}$, siła odśrodkowa $\overrightarrow{F_o}$ oraz siła reakcji $\overrightarrow{F_r}$, związana z naciskiem kierowcy na fotel samochodu.



Rys. 2. Przyspieszenie odśrodkowe i siły działające na kierowcę w układzie nieinercjalnym.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Rozwiązanie

Widzimy, że nacisk kierowcy na fotel F_N w tym przypadku będzie związany z różnicą siły ciężkości i siły odśrodkowej:

$$F_N = F_g - F_o = mg - \frac{mv^2}{R} = m\left(g - \frac{v^2}{R}\right).$$

Stąd

$$F_N = 75\ \mathrm{kg} \cdot \left(9,81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} - \frac{\left(20\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2}{200\ \mathrm{m}}\right) \approx 586\ \mathrm{N}.$$

Dla mostu o ustalonym promieniu łuku siła odśrodkowa zależy tylko od masy i prędkości samochodu i będzie rosła wraz z prędkością. Oznacza to, że dla pewnej wartości prędkości stanie się ona równa sile ciężkości działającej na kierowcę, co oznacza, że nacisk kierowcy na fotel stanie się równy zeru. Sytuację taką nazywamy stanem nieważkości.

$$F_o = F_g \quad \rightarrow \quad \frac{mv^2}{R} = mg$$

$$v^2 = gR \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{gR} = \sqrt{9,81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 200\ \mathrm{m}} \approx 44,3\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Odpowiedź:

Nacisk kierowcy na fotel przy szybkości samochodu wynoszącej 20 m/s wynosi 586 N. Aby kierowca znalazł się w stanie nieważkości, samochód powinien poruszać się z prędkością ok. 44,3 m/s.

Komentarz:

Zadanie to byłoby o wiele trudniejsze do rozwiązania w układzie inercjalnym, gdzie na kierowcę w najwyższym punkcie mostu działa siła ciężkości. Jest ona skierowana pionowo w dół. Widzimy, że w tym układzie na pierwszy rzut oka nie widać siły, która powodowałaby zmniejszenie nacisku na fotel. Siła ta „ukryta jest” w sile reakcji podłoża na nacisk i nazywamy ją siłą reakcji więzów.

Przykład 2

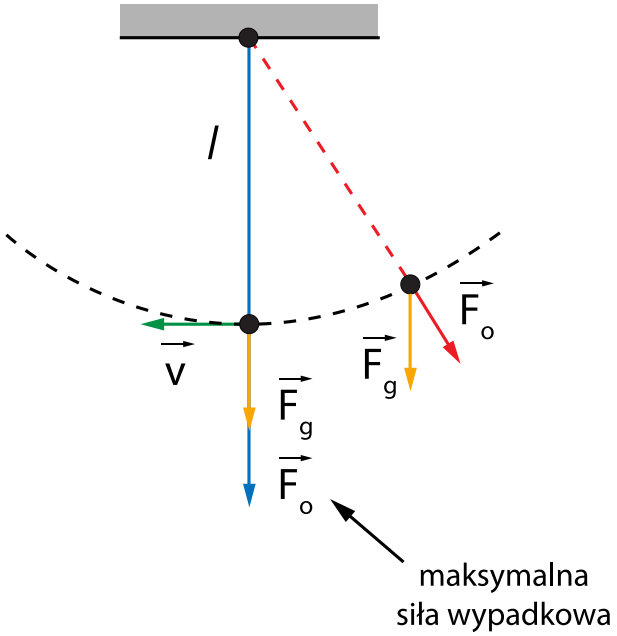
Mały ciężarek o masie m = 250 g zawieszony jest na nici o długości l = 50 cm i wykonuje drgania w płaszczyźnie pionowej. Maksymalne naprężenie, które może wytrzymać nić, aby się nie zerwać, wynosi F_N = 8 N. Wyznacz maksymalną częstotliwość drgań tego ciężarka.

Dane:	**Szukane:**
masa ciężarka m = 250 g = 0,25 kg długość nici l = 50 cm = 0,5 m maksymalne naprężenie nici F_N = 8 N przyspieszenie ziemskie g = 9,81 m/s^2	maksymalna częstotliwość drgań ciężarka f =?

Analiza zadania:

W układzie inercjalnym zmiana kierunku wektora prędkości wynika z istnienia przyspieszenia dośrodkowego $a_d = \frac{v^2}{r}$, podobnie jak w przykładzie 1. W układzie nieinercjalnym na ciężarek, oprócz siły ciężkości, działa siła odśrodkowa o wartości $F_o = \frac{mv^2}{r}$. W tym przykładzie promień okręgu, po którym porusza się ciało, wynosi l. Wahadło jest ciężarkiem umieszczonym na nitce, której drugi koniec jest zaczepiony i wykonuje ruch po fragmencie okręgu względem tego punktu.

Zastanówmy się teraz, w jakiej sytuacji nitka może się zerwać? Będzie to miało miejsce wtedy, gdy siła ją naprężająca będzie największa. Sytuacja ta wystąpi, gdy ciężarek będzie przechodzić przez najniższy punkt swojego ruchu, gdyż wtedy siła ciężkości i siła odśrodkowa będą skierowane zgodnie i pionowo w dół, co przełoży się na największe naprężenie nici. Sytuację tę przedstawiliśmy na Rys. 3.



Rys. 3. Siły działające na ciężarek (oraz naprężające nić) w układzie nieinercjalnym.

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

Rozwiązanie:

Aby nić uległa zerwaniu, siła na nią działająca musi być równa maksymalnemu dopuszczalnemu naprężeniu:

$$F_N = mg + F_o$$

Aby wyznaczyć maksymalną częstotliwość, z jaką wahadło może wykonywać drgania, musimy znaleźć związek siły odśrodkowej i częstotliwości. W tym celu wykorzystamy

związek pomiędzy prędkością liniową v ciała poruszającego się po okręgu o promieniu r oraz jego prędkością kątową ω:

$$v = \omega r$$

Z kolei prędkość kątowa związana jest z częstotliwością f za pomocą następującej relacji:

$$\omega = 2\pi f$$

Siłę odśrodkową możemy zatem wyrazić następująco:

$$F_o = \frac{mv^2}{l} = \frac{m(\omega l)^2}{l} = m\omega^2 l = m\Big(2\pi f\Big)^2 l = 4\pi^2 f^2 ml$$

Wstawiając otrzymany wzór do warunku naszego zadania i wyznaczając częstotliwość otrzymujemy:

$$F_N = mg + 4\pi^2 f^2 ml \qquad \rightarrow \qquad f = \sqrt{\frac{F_N - mg}{4\pi^2 ml}}$$

$$f = \sqrt{\frac{8\mathrm{N} - 0,25\mathrm{kg} \cdot 9,81\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 0,25\mathrm{kg} \cdot 0,5\mathrm{m}}} \approx 1,06\mathrm{Hz}$$

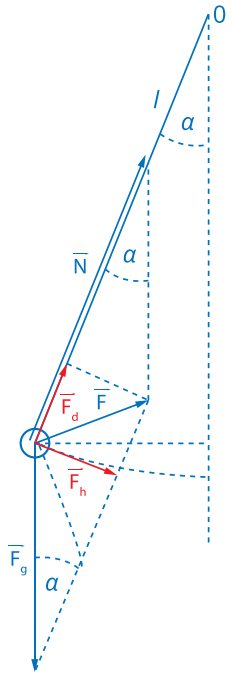
Odpowiedź:

Maksymalna częstotliwość drgań ciężarka wynosi ok. 1,06 Hz (ciężarek wykonuje 1,06 drgania w ciągu sekundy).

Komentarz:

Zwróć uwagę, że zadanie to, rozpatrywane w układzie inercjalnym (tj. niezwiązanym z wirującą nicią) byłoby o wiele trudniejsze do rozwiązania (Rys. 4.). W układzie inercjalnym na wirujący ciężarek działa siła grawitacji $\overrightarrow{F_g}$ (zawsze skierowana pionowo w dół) oraz siła naciągu nici $\overrightarrow{N}$ (skierowana zawsze do środka okręgu). Wypadkowo, dają one siłę $\overrightarrow{F}$, której składowa $\overrightarrow{F_d}$ jest siłą dośrodkową (wymuszającą ruch ciała po okręgu), a składowa $\overrightarrow{F_h}$ jest składową styczną do okręgu (powoduje ruch wzdłuż okręgu z przyspieszeniem). Analizując siły w układzie inercjalnym moglibyśmy zatem dojść do wniosku, że w najniższym punkcie

naciąg nici $\overrightarrow{N}$ będzie najmniejszy, gdyż wtedy siła dośrodkowa skierowana będzie pionowo w górę, czyli przeciwnie do siły grawitacji. Rozumowanie to jest jednak błędne, gdyż w układzie inercjalnym siła dośrodkowa WYNIKA z istnienia sił naciągu nici oraz grawitacji (nie jest niezależną siłą). Z kolei w układzie nieinercjalnym, jest to niezależna siła wynikająca z przyspieszenia układu.



Rys. 4. Siły działające na ciężarek w układzie inercjalnym.

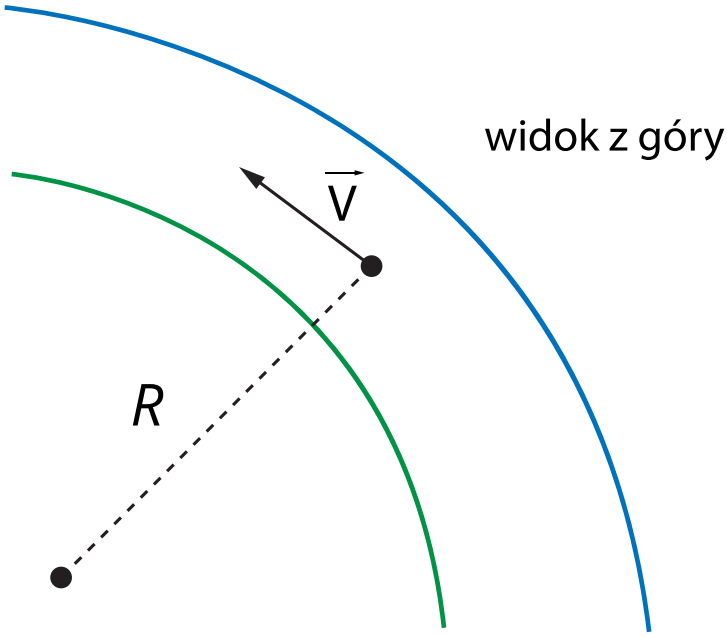
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Przykład 3. (Zadanie przeznaczone jest dla poziomu rozszerzonego)

Samochód porusza się po zakręcie o promieniu R z prędkością o stałej wartości v. Zakręt jest wyprofilowany, tj. skierowany pod kątem α do poziomu. Określ, jaka może być maksymalna prędkość samochodu, by nie wypadł on z zakrętu. Współczynnik tarcia kół o podłoże wynosi μ.

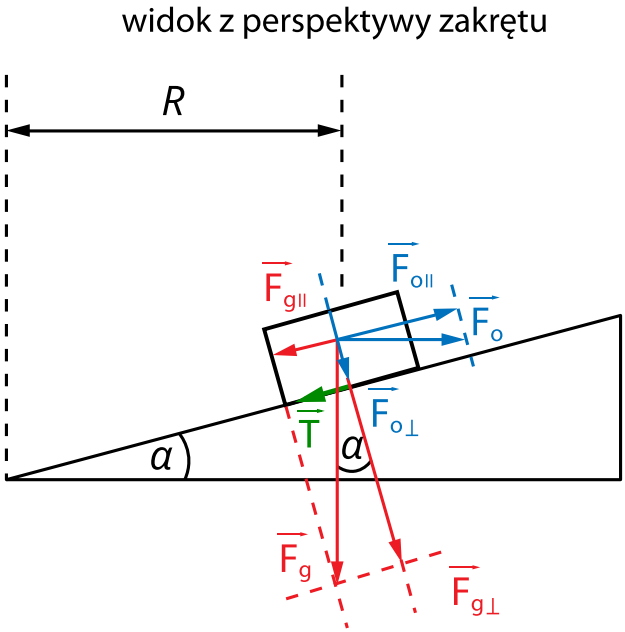
Analiza zadania:

Sytuację rozważaną w zadaniu przedstawiliśmy na Rys. 5., a siły działające – na Rys. 6. W układzie nieinercjalnym występują trzy siły: ciężkości samochodu, odśrodkowa oraz tarcia. Aby sprawdzić, czy samochód utrzyma się na łuku zakrętu, musimy przeanalizować, jakie siły działają na niego wzdłuż jezdni. Na Rys. 6. widzimy, że równoległa do jezdni składowa siły odśrodkowej $\overrightarrow{F_{o\|}}$ próbuje wypchnąć samochód „na zewnątrz” zakrętu. W przeciwną stronę skierowane są z kolei: siła tarcia $\overrightarrow{T}$ oraz równoległa składowa siły ciężkości $\overrightarrow{F_{g\|}}$.



Rys. 5. Sytuacja rozważana w zadaniu – samochód poruszający się po łuku zakrętu.

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



Rys. 6. Siły działające na samochód znajdujący się na wyprofilowanym zakręcie, przed zerwaniem tarcia statycznego w kierunku poprzecznym do kierunku ruchu.

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

Siła odśrodkowa i jej składowe zmieniają się jedynie wraz z prędkością samochodu (promień łuku zakrętu jest stały). Siła ciężkości oraz jej składowe mają stałe wartości. Siła tarcia zależy od wartości siły nacisku $\overrightarrow{F_N}$ kół samochodu na podłoże. Ta (nie zaznaczona na rysunku dla zachowania jego czytelności) jest sumą prostopadłej składowej siły odśrodkowej $\overrightarrow{F_{o\perp}}$ oraz składowej prostopadłej siły ciężkości $\overrightarrow{F_{g\perp}}$.

W przypadku, gdy równoległa składowa siły odśrodkowej $\overrightarrow{F_{o\|}}$ stałaby się większa niż suma: równoległej składowej siły ciężkości $\overrightarrow{F_{g\|}}$ oraz tarcia $\overrightarrow{T}$, samochód zostałby wypchnięty na zewnątrz zakrętu. Zauważmy ponadto, że znany wzór opisujący wartość siły tarcia $T = \mu F_N$ opisuje **maksymalną** możliwą wartość tej siły dla danego nacisku i współczynnika tarcia. Oznacza to, że wraz ze wzrastającą wartością siły odśrodkowej wzrastać będzie siła tarcia utrzymująca ciało na zakręcie, aż do jej maksymalnej wartości. Dla pewnych, odpowiednio dużych, prędkości samochodu, suma: składowej równoległej siły ciężkości $\overrightarrow{F_{g\|}}$ oraz siły tarcia $\overrightarrow{T}$ stanie się niewystarczająca, by zrównoważyć równoległą składową siły odśrodkowej $\overrightarrow{F_{o\|}}$ i samochód wypadnie z zakrętu.

Rozwiązanie:

Maksymalną bezpieczną prędkość samochodu możemy wyznaczyć opierając się na warunku:

$$F_{g\|} + T_{max} = F_{o\|}$$

$$T_{max} = \mu F_N = \mu(F_{o\perp} + F_{g\perp})$$

Aby wyznaczyć odpowiednie składowe sił, wykorzystamy proste zależności trygonometryczne:

$$F_{g\|} = mg \sin \alpha$$

$$F_{g\perp} = mg \cos \alpha$$

$$F_{o\|} = F_o \cos \alpha = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha$$

$$F_{o\perp} = F_o \sin \alpha = \frac{mv^2}{R} \sin \alpha$$

Warunek ruchu po łuku zakrętu przybiera zatem postać:

$$mg \sin \alpha + \mu \left(mg \cos \alpha + \frac{mv^2}{R} \sin \alpha \right) = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha$$

Wyznaczając z powyższego wyrażenia prędkość, otrzymamy:

$$v = \sqrt{\frac{gR(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}}$$

Odpowiedź:

Samochód wypadnie z zakrętu, jeśli jego prędkość będzie większa niż

$$\sqrt{\frac{gR(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}}.$$

Komentarz:

Widzimy, że maksymalna bezpieczna prędkość samochodu zależy od promienia łuku R, kąta wyprofilowania zakrętu α oraz współczynnika tarcia μ. Zależność od promienia łuku jest prosta – im większy będzie promień łuku zakrętu, tym większa jest maksymalna bezpieczna prędkość samochodu. Dlatego też drogi szybkiego ruchu mają zazwyczaj duże promienie skrętów. Przeanalizujmy teraz wyrażenie $\frac{\sin\alpha+\mu\cos\alpha}{\cos\alpha-\mu\sin\alpha}$. Wartość tego wyrażenia rośnie wraz z kątem α, co oznacza, że profilowanie zakrętu również zwiększa dopuszczalną, bezpieczną wartość prędkości. Aby przekonać się, że wyrażenie to rośnie wraz z kątem, możesz przygotować odpowiedni wykres w dowolnym arkuszu kalkulacyjnym, np. OpenOffice Calc.

Słowniczek

prędkość kątowa

(ang. *angular velocity*) – wielkość występująca w ruchu obrotowym. Określa, jak szybko zmienia się kąt zatoczony przez dane ciało w czasie.

siła dośrodkowa

(ang. *centripetal force*) – siła występująca przy opisie ruchu w układzie inercjalnym. Nie jest niezależną siłą, gdyż nie istnieje oddziaływanie z nią związane. Siłą dośrodkową nazywamy każdą siłę skierowaną prostopadle do prędkości ciała, która wymusza zakrzywienie toru jego ruchu. Jeśli ciało porusza się z prędkością v po łuku o promieniu

R, to siła dośrodkowa dana jest wzorem $F_d = \frac{mv^2}{R}$. Przykładowo, w ruchu planet wokół Słońca rolę siły dośrodkowej pełni siła grawitacji.

siła odśrodkowa

(ang. *centrifugal force*) – siła bezwładności występująca w obracających się układach odniesienia. Jest ona skierowana „od środka” łuku, po którym porusza się ciało, a jej wartość jest równa wartości siły dośrodkowej działającej na ciało w układzie inercjalnym.

Symulacja interaktywna

Analiza ruchu ciał w układach nieinercjalnych

Zakręty na szosach nierzadko bywają „uniesione” po zewnętrznej stronie. Podobnie szyny kolejowe: szyna wewnętrzna w zakręcie jest ułożona nieco niżej niż zewnętrzna. Wykorzystaj symulację do rozpoznania skutków takiego postępowania.

Doświadczenie 1
Rozpoznanie terenu

Zamieszczona symulacja przedstawia ruch samochodu na zakręcie o zadanym promieniu r. Rozważany zakręt jest dodatkowo nachylony pod kątem α do poziomu.

Problem badawczy

Rozpoznanie sposobu wyprofilowania zakrętu na podstawie jego schematu.

Instrukcja

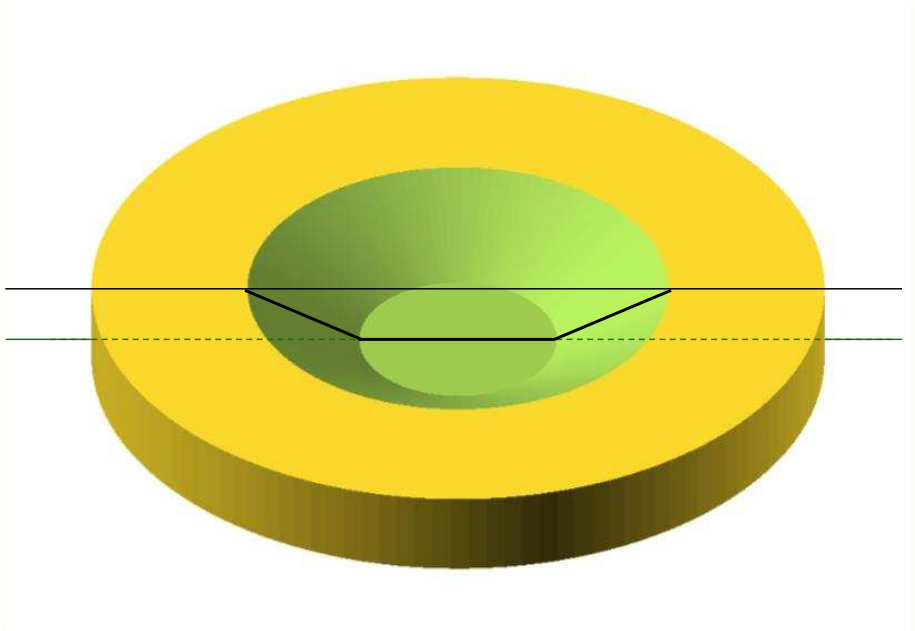
Uruchom symulację i wybierz opcję „Pokaż schemat 3D”. Jest to schemat zakrętu, po którym porusza się samochód. Przeanalizuj ten schemat.

Zasób interaktywny dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/DvgKnxfvk

Żółta bryła na schemacie jest fragmentem wydrążonego walca z ciemnożółtą powierzchnią boczną. Zielona część to fragment powierzchni innej bryły, mającej - podobnie jak walec - symetrię obrotową. Wypełnia ona wydrążenie w walcu. Samochód w symulacji porusza się po nachylonej części powierzchni zielonej.

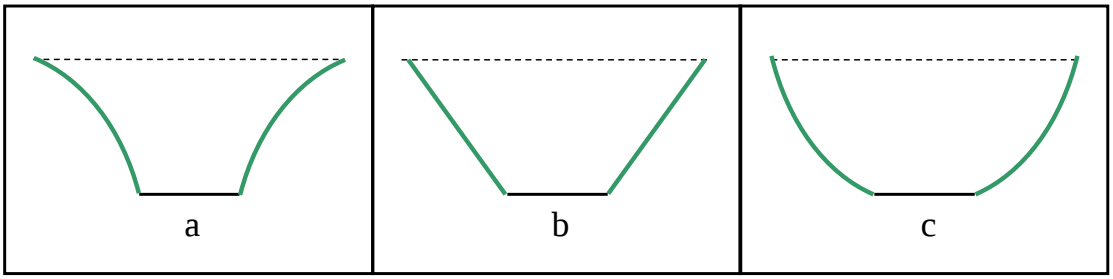
Polecenie 1

Wyobraź sobie, że obie bryły zostały przecięte pionową płaszczyzną zawierającą oś symetrii walca (Rys. 1). Płaszczyzna ta przecina zieloną powierzchnie wyznaczając otwartą figurę ograniczoną pogrubionymi liniami.



Rys. 1. Pionowy przekrój przez powierzchnię zakrętu.

Trzy najprostsze warianty wyprofilowana pochylonej części zakrętu przedstawia Rys. 2. Przeanalizuj inne elementy widoczne na ekranie symulacji i rozstrzygnij, który profil został w niej wykorzystany.



- ◯ a
- ◯ b

c

Podsumowanie

Polecenie 2

Sporządź krótką notatkę, w której wymienisz po jednej wadzie i jednej zalecie stosowania w rzeczywistości profilowania zakrętów innego, niż zastosowanego w symulacji.

Doświadczenie 2
Siły w układzie nieinercjalnym

Ruch samochodu jest opisany przy pomocy sił istniejących w układzie nieinercjalnym, tj. siły ciężkości $\vec{F}_g$, odśrodkowej $\vec{F}_o$, sprężystości $\vec{F}_r$ i tarcia $\vec{T}$.

W symulacji możesz m.in. zmienić: kąt α nachylenia jezdni, promień łuku R oraz wartość prędkości v, z jaką samochód „wchodzi" w zakręt. Możesz też zmienić współczynnik tarcia statycznego f kół o nawierzchnię drogi. Współczynnik ten odnosi się do kierunku poprzecznego do kierunku ruchu, w którym to kierunku samochód się nie porusza.
W zamieszczonej symulacji tarcie kinetyczne całkowicie zaniedbujemy.

Problem badawczy

Analiza działających sił w układzie i zależności prędkości samachodu i parametrów układu.

Hipoteza

W poniższym układzie nieinercjalnym możliwe jest znalezienie wartości prędkości pozwalającej na zmianę trajektorii ruchu.

Instrukcja

Uruchom symulację w trybie pełnoekranowym i możliwa jest modyfikacja parametrów układu oraz prędkości samochodu.

Zasób interaktywny dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/DvgKnxfvk

Polecenie 3

Czy możliwe jest, by samochód utrzymał się na płaskim zakręcie, jeśli nie występowałoby tarcie? Spróbuj rozważyć ten przypadek teoretycznie, a następnie sprawdź wynik używając symulacji.

Polecenie 4

Na podstawie wyników symulacji oraz własnych analiz wyjaśnij, dlaczego drogi szybkiego ruchu, tj. autostrady i drogi ekspresowe, posiadają duże promienie skrętów.

Polecenie 5

Na podstawie wyników symulacji oraz własnych obliczeń wyjaśnij, dlaczego na drogach szybkiego ruchu zakręty są „wyprofilowane” pod pewnym kątem do poziomu, w taki sposób, że po jednej stronie nawierzchnia drogi jest wyżej niż po drugiej stronie.

Oszacuj, ile powinien wynosić kąt nachylenia nawierzchni drogi na zakręcie o promieniu R=250 m, przy założeniu, że średnia prędkość samochodów na tym zakręcie wynosi 90 km/h. Załóż, że zakręt powinien być bezpieczny nawet w warunkach mokrej nawierzchni, gdy przyczepność kół jest bliska zeru.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Wskaż poprawną definicję siły odśrodkowej

- rzeczywista siła występująca w obracającym się układzie nieinercjalnym, skierowana od środka okręgu
- pozorna siła występująca w obracającym się układzie nieinercjalnym, skierowana od środka okręgu
- pozorna siła występująca w obracającym się układzie inercjalnym skierowana od środka okręgu
- pozorna siła występująca w obracającym się układzie nieinercjalnym, skierowana do środka okręgu

Ćwiczenie 2

Samochód o masie M zaczyna poruszać się z przyspieszeniem $\overrightarrow{a}$. Wektor przyspieszenia skierowany jest w prawo. Na dachu samochodu stoi kubek z kawą o masie m, który nieuważny kierowca zapomniał zabrać do środka pojazdu. Jaka siła bezwładności będzie działać na kubek w nieinercjalnym układzie związanym z samochodem?

- $F_b = ma$, skierowana w prawo
- $F_b = Ma$, skierowana w prawo
- $F_b = Ma$, skierowana w lewo
- $F_b = ma$, skierowana w lewo

Ćwiczenie 3

Zaznacz wszystkie sytuacje, w których na danego obserwatora (wyszczególnionego w konkretnej sytuacji) będzie działać siła bezwładności.

- [ ] poruszający się ze stałą szybkością rowerzysta wchodzi w zakręt
- [ ] dziewczynka siedzi na rozpędzającej się karuzeli
- [ ] maszynista pociągu rozpędza pojazd na prostym odcinku torów
- [ ] pies wraz ze swoim opiekunem przechodzą ze stałą szybkością przez przejście dla pieszych i obserwują hamujące przed nimi samochody

Ćwiczenie 4

Przyporządkuj siły bezwładności odpowiednim sytuacjom, w których występują.

Pasażer rozpędzającego się samolotu	odczuwa siłę skierowaną do zewnętrznego brzegu fotela
Kierowca gwałtownie hamującego samochodu	odczuwa siłę wpychającą go w fotel
Dziewczynka siedząca na fotelu wirującej karuzeli	odczuwa siłę wypychającą go z fotela
Użytkownik wagonika kolejki na „diabelskiej pętli” znajdujący się w najniższym punkcie toru	odczuwa siłę wpychającą go w podłoże

Ćwiczenie 5

Zaczepiony na nitce o długości l = 25 cm ciężarek wiruje z ustaloną częstotliwością w płaszczyźnie pionowej. Jaka to częstotliwość, jeżeli wartość siły odśrodkowej w najwyższym punkcie toru jest trzy razy większa od siły wypadkowego naciągu nici? Przyjmij wartość g = 9,81 m/s ^{2}, a wynik podaj z dokładnością do trzech miejsc znaczących.

Odpowiedź: f = _____ Hz.

Ćwiczenie 6

Z jaką minimalną prędkością należy kręcić wiadrem zawierającym wodę umieszczonym na lince o długości l = 40 cm, aby w najwyższym punkcie toru woda nie wylewała się z wiadra? Przyjmij wartość g = 9,81 m/s ^{2}, a wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Odpowiedź: $v_{\min}$ = _____ m/s.

Ćwiczenie 7

Samochód porusza się po zakręcie o promieniu R=250 m, który wyprofilowany został pod kątem α=15° do poziomu. Droga jest oblodzona, więc tarcie trzeba zaniedbać. Z jaką prędkością powinien się poruszać ten samochód, by nie wypaść z zakrętu? Przyjmij wartość g=9,81 m/s ^{2}, a wynik podaj z dokładnością do trzech miejsc znaczących.

Odpowiedź: v = _____ m/s = _____ km/h.

Ćwiczenie 8

Samochód porusza się po zakręcie o promieniu R=450 m z prędkością v=108 km/h. Zakręt jest wyprofilowany pod kątem α=8° do poziomu. W pewnym momencie samochód wjeżdża w kałużę, w wyniku czego współczynnik tarcia kół o podłoże maleje do f=0,02. Czy samochód utrzyma się na zakręcie? Podaj maksymalną bezpieczną prędkość samochodu dla takich parametrów zakrętu oraz wartości współczynnika tarcia. Przyjmij wartość g=9,81 m/s ^{2}, a wynik podaj z dokładnością do trzech miejsc znaczących.

Odpowiedź:

Samochód nie utrzyma się na zakręcie.

Maksymalna bezpieczna szybkość wynosi: v_{max} = _____ m/s= _____ km/h.

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji

Imię i nazwisko autora:	Przemysław Michalski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Jak wygląda ruch w układzie nieinercjalnym?**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości. II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu; II. Mechanika. Uczeń: 9) rozróżnia układy inercjalne i nieinercjalne; posługuje się pojęciem siły bezwładności. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu; II. Mechanika. Uczeń: 18) rozróżnia układy inercjalne i nieinercjalne; omawia różnice między opisem ruchu ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych; posługuje się pojęciem siły bezwładności.
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. wyjaśnia różnice między opisem ruchu ciała w układzie inercjalnym i nieinercjalnym, 2. dostrzega i wyjaśnia korzyści wynikające z użycia układów nieinercjalnych, 3. stosuje wiedzę na temat sił bezwładności do analizy ruchu ciał w układach nieinercjalnych, 4. wyjaśnia związek między przyczepnością kół samochodu (tj. współczynnika tarcia statycznego kół o nawierzchnię drogi) a maksymalną bezpieczną prędkością na zakręcie o zadanych parametrach, 5. analizuje ruch samochodu na wyprofilowanych zakrętach.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obserwacyjna
Metody nauczania:	- pokaz multimedialny, - eksperyment.
Formy zajęć:	praca zespołowa
Środki dydaktyczne:	kamera (np. w telefonie), elementy z zestawu do doświadczeń z mechaniki
Materiały pomocnicze:	brak
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Na poprzedniej lekcji nauczyciel poprosił uczniów o przypomnienie wiadomości nt. siły bezwładności i siły dośrodkowej. Na początku lekcji nauczyciel prosi uczniów o podanie kilku przykładów takich sił. Cennymi przykładami są: człowiek w poruszającej się windzie, biedronka na płycie gramofonowej i dziecko na karuzeli. Nauczyciel poprosi uczniów o wyjaśnienie, jakie siły działają na człowieka, biedronkę i dziecko, oraz o rozrysowanie tych sił na tablicy.	
Faza realizacyjna:	

Analiza tych samych zjawisk w układzie inercjalnym i nieinercjalnym. Przykładowe pomysły: 1. Ruch obrotowy: na płycie, która może wirować, mocujemy kamerę (np. z telefonu) oraz jakiś inny obiekt, np. kulkę z plasteliny. Kamera jest „obserwatorem” w układzie nieinercjalnym. Drugą kamerą nagrywamy równolegle to samo zjawisko, obserwowane z układu inercjalnego. Zadanie uczniów polega na porównaniu ruchu na obydwu filmach. Kwestie do rozważenia: dlaczego w układzie inercjalnym widoczny jest ruch ciała, a w nieinercjalnym nie? Jakie siły działają w każdym przypadku? 2. Badanie wartości siły odśrodkowej: na wirującym dysku umieszczamy samochodzik (lub coś innego, co da małą siłę tarcia) i mocujemy siłomierzem do osi obrotu. Badamy wartość wskazania siłomierza w zależności od odległości od osi. 3. Ruch postępowy: na dużym wózku ustawiamy mały wózek i łączymy go z dużym za pomocą siłomierza. Na dużym wózku montujemy również jedną kamerę, drugą nagrywamy obraz z układu inercjalnego. Duży wózek wprawiamy w ruch przyspieszony. Analizujemy siły w obydwu układach, na podstawie wskazań siłomierza próbujemy określić przyspieszenie układu.	
Faza podsumowująca:	
Omówienie wykonanej analizy ruchu, odpowiedzi na ewentualne pytania uczniów.	
Praca domowa:	
Rozwiązanie zadań dołączonych do e-materiału.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Multimedium można wykorzystać na lekcji dotyczącej działania sił bezwładności. Umożliwia ono omówienie sił bezwładności, sił tarcia oraz rozkładu wektorów sił na składowe. Można też skupić się na badaniu wpływu pojedynczego parametru (np. kąta lub współczynnika tarcia) na zachowanie się symulowanego pojazdu. Można również zlecić uczniom samodzielne opracowanie tematyki siły odśrodkowej w domu przy wykorzystaniu symulacji.