



0246 Statyka bryły sztywnej w obliczeniach

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Gra edukacyjna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



0246 Statyka bryły sztywnej w obliczeniach

Czy to nie ciekawe?

Śmigłowce to statki powietrzne mające wiele zalet – przede wszystkim możliwość pionowego startu i pionowego lądowania oraz możliwość zawisnięcia w powietrzu, czego zrobić nie mogą samoloty. Z tego względu helikoptery znalazły zastosowania w szczególności w trakcie operacji w trudnym terenie, np. w górach, w pogotowiu ratunkowym. Zaprojektowano wiele konstrukcji helikopterów, ale czy zwróciło Twoją uwagę, że bardzo często oprócz zlokalizowanego nad kabiną wielkiego wirnika (śmigła), pojawia się jeszcze jeden, mały wirnik, z tyłu? Umieszczony jest na końcu statku i skierowany pod kątem 90° do głównego wirnika. Po co instaluje się to tzw. śmigło ogonowe?



Rys. a. Szwajcarski helikopter ratunkowy (typ EC-145) w akcji.

Twoje cele

W tym materiale:

- wyjaśnisz rolę śmigła ogonowego w utrzymaniu stateczności helikoptera,
- wykorzystasz zasady dynamiki do analizy lotu helikoptera,
- zastosujesz wiedzę dotyczącą statyki bryły sztywnej w zadaniach.

Przeczytaj

Warto przeczytać

1. Kiedy bryła sztywna jest w równowadze?

Pełną odpowiedź na to pytanie znajdziesz w e-materiale „Warunki równowagi bryły sztywnej”. Tutaj przypomnimy jedynie podstawy tego zagadnienia.

1.1 Pierwsza zasada dynamiki Newtona

Jeśli na ciało obserwowane w inercjalnym układzie odniesienia nie działają żadne siły lub działające siły się równoważą, ciało to pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{0}$$

(1)

Ten warunek jest wystarczający dla punktów materialnych. Jego spełnienie oznacza, że ciało, którego rozmiary pomijamy, jest w równowadze.

1.2 Pierwsza zasada dynamiki Newtona w przypadku ruchu obrotowego

Bryła sztywna może się nie tylko przemieszczać, ale także obracać. Dlatego oprócz sił, ich wartości, kierunków i zwrotów, musimy jeszcze uwzględnić punkty ich przyłożenia do bryły. Inaczej mówiąc, musimy uwzględnić momenty tych sił. Tak jak suma sił, tak i suma ich momentów winna się zerować, by bryła trwała w stanie równowagi. Ten warunek często nazywamy pierwszą zasadą dynamiki dla ruchu obrotowego:

Jeśli na ciało nie działają żadne momenty sił lub działające momenty sił się równoważą, to ciało pozostaje w spoczynku lub obraca się ruchem jednostajnym.

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \dots + \vec{M}_n = \vec{0}$$

(2)

Jednoczesne spełnienie tych warunków nie zawsze jest łatwe do zapewnienia i opisanie, gdy dojdzie do analizy szczegółów. Bywa, że spełnienie pierwszego warunku wymusza podjęcie dodatkowych działań, by spełnić drugi. Tak jest w przypadku helikoptera.

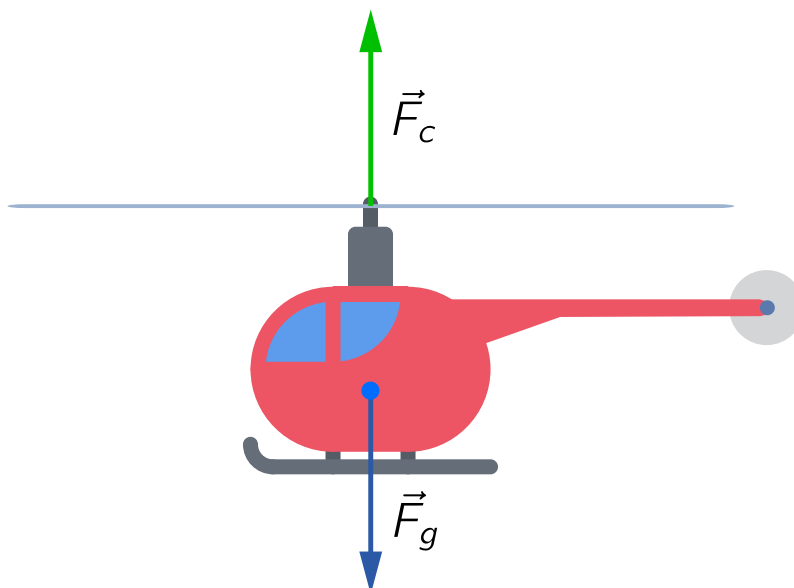
2. Kiedy helikopter może zawisnąć w powietrzu?

2.1 Równowaga sił działających na helikopter.

Jakie to siły? W kierunku pionowym w dół przyłożona jest do niego siła grawitacji. W kierunku pionowym do góry – siła ciągu, wytwarzana przez **główny wirnik**. Siła ciągu wytwarzana przez wirnik spełnia funkcję **siły nośnej**. Skoro helikopter nie zniża swojego lotu, ani się nie unosi, to wiemy, że w kierunku pionowym działające siły się równoważą:

$$\vec{F}_g + \vec{F}_c = \vec{0}$$

Sytuację taką schematycznie zaprezentowano na Rys. 1. Siły ciągu $\vec{F}_c$ oraz grawitacji $\vec{F}_g$ przyłożone są wzdłuż osi obrotu wirnika. Przechodzi ona przez środek masy układu, do którego przyłożona jest siła grawitacji.



Rys. 1. Schematyczny widok helikoptera z siłami: ciągu wirnika i grawitacji.

Niebieskim punktem zaznaczono środek masy helikoptera.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

2.2 Warunek równowagi sił działających na helikopter

Siła grawitacji ma stałą wartość $F_g = mg$, gdzie m to całkowita masa helikoptera, a g to przyspieszenie ziemskie.

Siła ciągu wirnika może być regulowana. Zależy ona od parametrów samego wirnika: od długości jego łopat, ich profilu oraz kąta nachylenia do płaszczyzny obrotu wirnika. Istotna jest gęstość powietrza, w którym następuje lot. Najłatwiejsza do regulacji jest prędkość

łopat względem powietrza, czyli prędkość kątowna wirnika ω_R . Intuicyjnie jest jasne, że wzrost ω_R powoduje zwiększenie siły ciągu.

Przyjmijmy bardzo uproszczone założenie: siła ciągu wirnika jest proporcjonalna do jego prędkości kątowej. Zapiszemy to:

$$F_c = k_R \cdot \omega_R$$

Oznacza to, że wszystkie parametry techniczne związane z budową skrzydła oraz warunkami lotu umownie zawarliśmy w stałym parametrze k_R .

Warunek równoważenia się sił przyjmuje wtedy postać

$$F_c = F_g$$

czyli

$$k_R \omega_R = mg$$

Problem 1

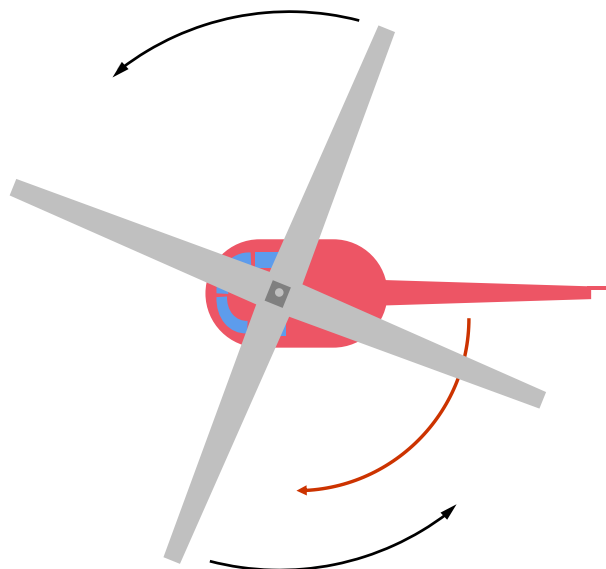
Określ jednostki współczynnika k_R .

3. Helikopter zawisł, ale wiruje - jak to zatrzymać?

Mogło zwrócić Twoją uwagę, że helikopter ma **śmigło ogonowe**. Pracuje ono cały czas, nie tylko w momencie wykonywania manewrów. Do czego służy? Do zapobiegania obrotowi helikoptera wokół pionowej osi.

3.1 Trzecia zasada dynamiki dla ruchu obrotowego

Silnik, który wprawia w ruch obrotowy główny wirnik, przykładą do niego określony moment siły. Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki, moment o takiej samej wartości, ale przeciwnie skierowany, przyłożony jest do silnika, połączonego sztywno z resztą kadłuba helikoptera. Helikopter zawieszony w powietrzu obracałby się w przeciwną stronę niż jego wirnik (Rys. 2.)



Rys. 2. Kadłub helikoptera pozbawionego śmigła ogonowego obracałby się w kierunku przeciwnym do obrotu wirnika.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

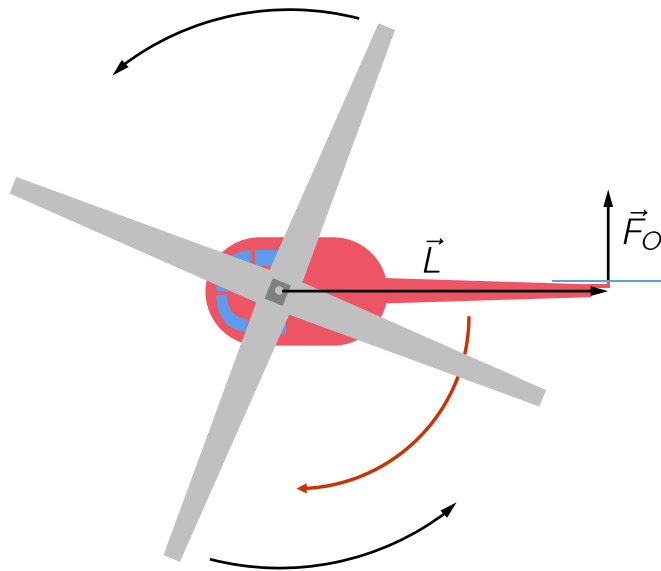
Sytuacja taka bywa pokazywana w filmach wojennych, gdy dochodzi do ostrzału helikoptera. Uszkodzenie śmigła ogonowego sprawia, że helikopter zaczyna obracać się dookoła własnej osi.

Dla zainteresowanych

Podobny efekt możesz odczuć włączając czy wyłączając elektryczny silnik niewielkiego urządzenia, które trzymasz w ręce. Może to być odkurzacz, ręczny młyn do kawy czy plastikowy wentylator na biurko. W chwili rozruchu odczuwasz lekkie szarpnięcie. Reagujesz na nie, odruchowo, „mocniejszym chwytem”. To wystarcza, by korpus urządzenia nie zaczął się obracać w przeciwną stronę, niż jego silnik.

3.2 Moment siły śmigła ogonowego

Tu przydaje się **śmigło ogonowe**. Jest to mały wirnik, który obraca się w pionowej płaszczyźnie. Ustawienie śmigła zapewnia, że wytwarzana przezeń siła ciągu $\vec{F}_O$ ma kierunek poziomy, prostopadły do ogona helikoptera. Jest ona przyłożona w pewnej odległości L od osi obrotu helikoptera i przeciwstawia się obrotowi kadłuba (Rys. 3.).



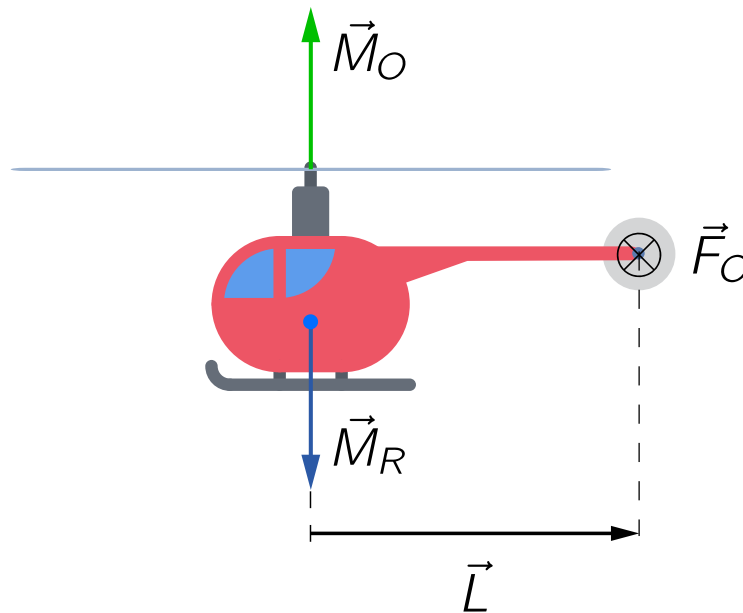
Rys. 3. Siła ciągu śmigła ogonowego przyłożona w odległości $L = |\vec{L}|$ od osi obrotu zatrzymuje obrót kadłuba wywoływany obrotem głównego wirnika.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Skutkiem działania śmigła ogonowego jest moment siły

$$\vec{M}_O = \vec{L} \times \vec{F}_O .$$

Wektor $\vec{L}$ jest zaczepiony w osi obrotu helikoptera a jego koniec pokazuje punkt przyłożenia siły $\vec{F}_O$ (Rys. 4.). Wektory te są do siebie prostopadłe, więc wartość tego iloczynu wektorowego obliczymy jako $M_O = LF_O \sin 90^\circ = LF_O$. Odpowiedni dobór siły ciągu śmigła ogonowego zapewni zatrzymanie efektu wirowania kadłuba helikoptera.



Rys. 4. Schematyczny widok helikoptera z działającymi na niego momentami sił: moment siły wytwarzany przez wirnik główny i skrzydło ogonowe.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Zatrzymanie ruchu obrotowego uzyskujemy gdy spełniony jest warunek

$$\vec{M}_O = -\vec{M}_R,$$

w którym $\vec{M}_R$, oznacza moment siły, jakim wirnik działa na kadłub helikoptera za pośrednictwem silnika. Dla potrzeb szacunkowych obliczeń przyjmuje się, że wartość M_R jest proporcjonalna do siły ciągu wirnika F_c , a zatem także do prędkości kątowej ω_R głównego wirnika.

$$M_R = 2r \cdot F_c = 2r \cdot k_R \omega_R$$

Zależność ta ma charakter **empiryczny**, a wielkość r oznacza promień trzpienia, na którym osadzony jest wirnik i za pośrednictwem którego jest on wprowadzany w ruch przez silnik helikoptera. Wielkość k_R charakteryzuje pracę wirnika i została omówiona w sekcji 2.2.

Problem 2

Patrzysz z góry na helikopter z Rys. 4. Rozstrzygnij, czy jego wirnik obraca się - z Twojego punktu widzenia - zgodnie ze wskazówkami zegara czy przeciwnie.

Problem 3

Patrzysz na helikopter z Rys. 4. od jego lewej burty. Rozstrzygnij, czy jego śmigło ogonowe obraca się zgodnie ze wskazówkami zegara czy przeciwnie.

3.3 Śmigło ogonowe pozwala zmienić kierunek ustawienia kadłuba

Jak to uzyskać? Nieco zwiększając lub zmniejszając wartość siły ciągu F_O przy niezmienionej wartości ω_R . Spowoduje to naruszenie stanu równowagi opisanego w poprzedniej sekcji - kadłub helikoptera musi zacząć się obracać.

Problem 4

Pilot zwiększył wartość F_O na rysunku 4. Rozstrzygnij, czy ułatwił sobie patrzenie w prawo czy w lewo.

Problem 5

Pilot zamierzał obrócić helikopter w określonym kierunku o kąt 60° . Rozstrzygnij, czy osiągnięcie tego celu wymaga:

- (a) zwiększenia F_O do określonej wartości, zależnej od wartości tego kąta, czy też
- (b) zwiększenia F_O do dowolnej wartości, utrzymania jej do uzyskania żadanego obrotu, po czym zmniejszenia jej do wartości mniejszej od wyjściowej - zatrzyma to obrót. Wtedy należy znowu zwiększyć F_O do wartości wyjściowej.

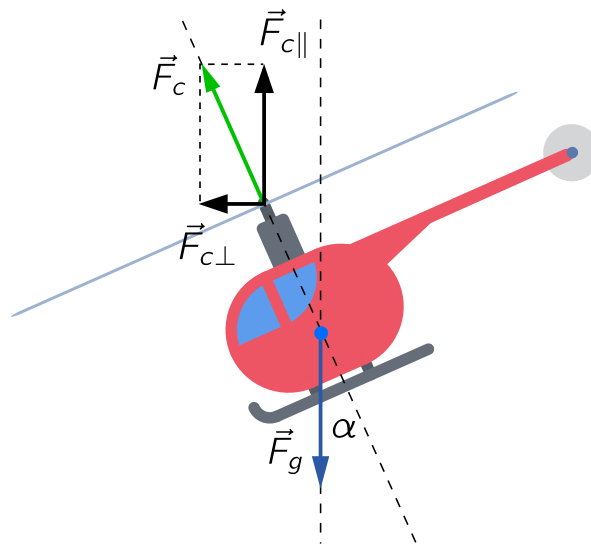
4. Jak polecieć helikopterem, nie tylko do przodu?

Helikopter w trakcie lotu może wykonywać bardzo skomplikowane manewry. Oprócz pionowego startu i lądowania, ma możliwość latania do przodu i do tyłu, a także na boki. Wyszkolony pilot wykona wiele ciekawych figur, łącznie z lotem po okręgu z dziobem wycelowanym w jeden punkt na Ziemi. Większość tych manewrów nie ma charakteru statycznego, ale niektóre można opisać jako niewielkie odstępstwo od stanu statyki i opisujących go zasad.

4.1 Lot poziomy do przodu

Przejście od zawisu do lotu w przód (także w tył, w bok) musi polegać na odstąpieniu od równań (1) oraz (2), przytoczonych w sekcji 1. Helikopter musi bowiem przyspieszyć. Osiąga to dzięki odpowiednim zmianom geometrii łopat wirnika.

Uzyskany efekt można opisać, znów w przybliżeniu, za pomocą modelu helikoptera pochyłonego (Rys. 5.)



Rys. 5. Schematyczny widok helikoptera - rozkład siły ciągu na składowe.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Pochylenie helikoptera o kąt α spowoduje, że siła ciągu $\vec{F}_c$ odchyli się od pionu o ten sam kąt. Celowe więc będzie rozłożenie jej na dwie składowe. Jedną z nich, $\vec{F}_{c\parallel}$, jest równoległa do siły grawitacji $\vec{F}_g$. Druga, $\vec{F}_{c\perp}$, jest prostopadła do $\vec{F}_g$. Składowa $\vec{F}_{c\perp}$ pozostaje niezrównoważona i powoduje ruch postępowy helikoptera w kierunku pochylenia. Składowa $\vec{F}_{c\parallel}$ może równoważyć skierowaną pionowo w dół siłę grawitacji. Wtedy ruch pod wpływem $\vec{F}_{c\perp}$ odbywa się na stałej wysokości.

Ruch ten jest przyspieszony – na tym właśnie polega zapowiadane „niewielkie odstępstwo od stanu statycznego”.

4.2 Problemy do samodzielnego rozwiązania

Problem 6

Przeanalizuj szczegółowo Rys. 5. Przypomnij sobie e-materiał „Rozkład sił działających na ciało umieszczone na równi pochyłej”. Czy widzisz jakieś podobieństwa, analogie?

Jak dasz sobie radę z takim ćwiczeniem:

Wstaw funkcje trygonometryczne by uzyskać relacje wiążące wartości siły ciągu wirnika i jej składowych.

$$F_{c\parallel} = F_c \cdot \boxed{}$$

$$F_{c\perp} = F_c \cdot \boxed{}$$

ctg α

cos α

sin α

tg α

Problem 7

Czy przejście od zawisu helikoptera do lotu w poziomie wymaga zmiany wartości siły ciągu $\vec{F}_c$? Jak to pilot uzyskuje? Czy ma to jakiś skutek uboczny?

Problem 8

Przypomnij sobie siłę ciągu $\vec{F}_O$ śmigła ogonowego i rolę, jaką spełnia jej moment $\vec{M}_O$. Czy przejście od zawisu do lotu w poziomie wymaga zmiany wartości tej siły? Jak to pilot uzyskuje?

Słowniczek

wirnik główny

(ang. *main rotor*) – w helikopterze: śmigło obracające się (w przybliżeniu) w poziomej płaszczyźnie nad środkiem ciężkości maszyny, którego głównym zadaniem jest utrzymanie maszyny w powietrzu. Stosowane inne nazwy to rotor, śmigło, skrzydło.

śmigło ogonowe

(ang. *tail rotor*) – w helikopterze konstrukcji Sikorskiego wirnik znajdujący się na płacie ogonowym.

siła nośna

(ang. *lift force*) – siła działająca na ciało poruszające się w płynie, gazie lub cieczy, prostopadła do kierunku ruchu. W helikopterz siłą nośną jest siła ciągu głównego wirnika

lub jej pionowa składowa. Innym przykładem siły nośnej jest siła nośna skrzydła samolotu. Jest ona bezpośrednio wynikiem ciśnień, występujących na powierzchni skrzydła. Ciśnienia te na skutek ruchu są różne dla różnych punktów tej powierzchni, a siła nośna jest pionową składową sumy wszystkich elementarnych sił, wynikających z działania ciśnień na odpowiadające im elementarne powierzchnie ciała.

zależność empiryczna

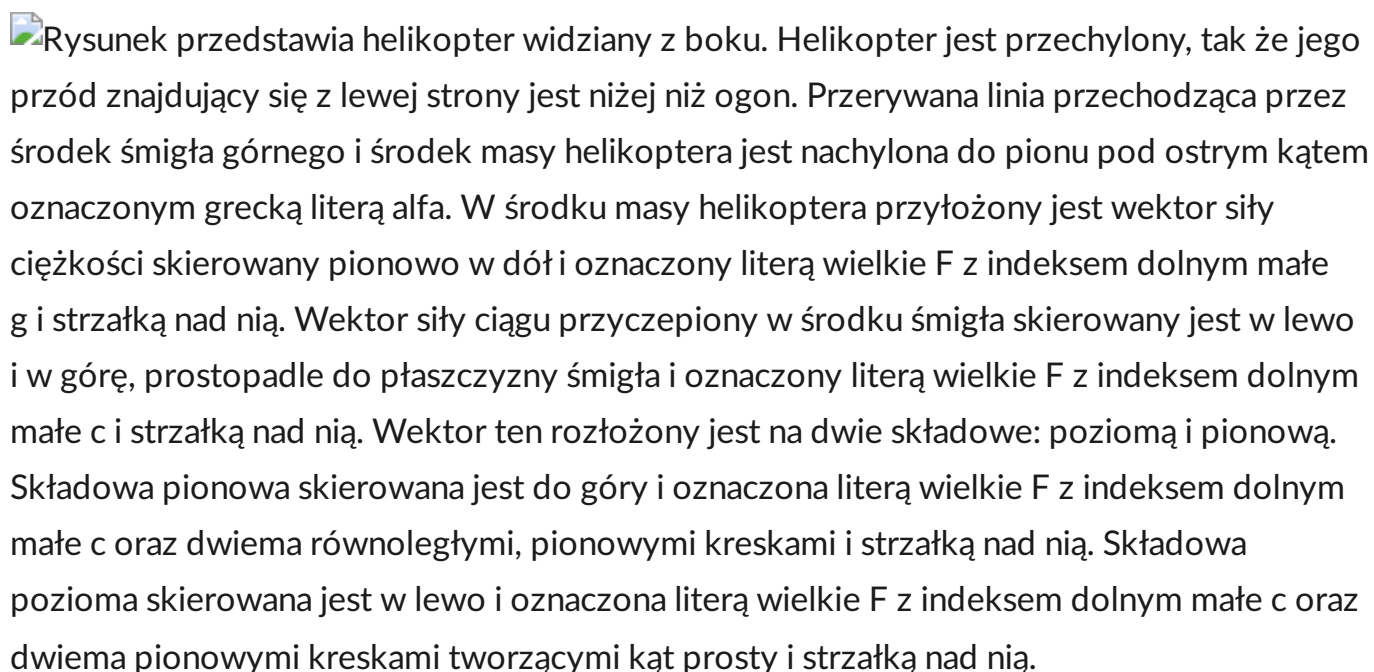
(ang. *empirical expression*) związek pomiędzy wielkościami ustalony wyłącznie lub w dużej mierze na podstawie badań eksperymentalnych, bez pełnej (rzadziej: bez żadnej) podbudowy teoretycznej.

Gra edukacyjna

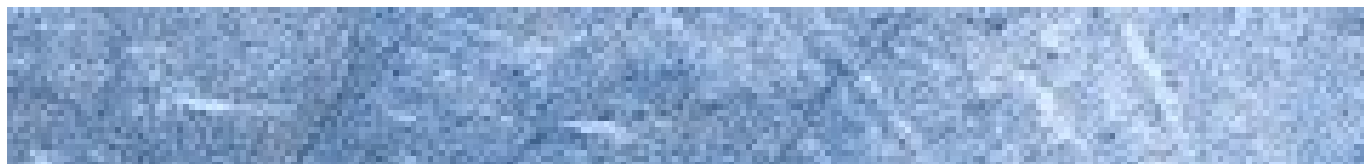
Statyka lotu helikopterem

Poznajesz poniższy schemat? Zapewne powiodła Ci się jego analiza, zaproponowana w części Przeczytaj.

Przypomnij sobie też schematy z rysunków 1. oraz 4. Przydadzą Ci się, gdy spróbujesz swych sił w grze. Powodzenia!

Rysunek przedstawia helikopter widziany z boku. Helikopter jest przechylony, tak że jego przód znajdujący się z lewej strony jest niżej niż ogon. Przerywana linia przechodząca przez środek śmigła górnego i środek masy helikoptera jest nachylona do pionu pod ostrym kątem oznaczonym grecką literą alfa. W środku masy helikoptera przyłożony jest wektor siły ciężkości skierowany pionowo w dół i oznaczony literą wielkie F z indeksem dolnym małe g i strzałką nad nią. Wektor siły ciągu przyczepiony w środku śmigła skierowany jest w lewo i w górę, prostopadle do płaszczyzny śmigła i oznaczony literą wielkie F z indeksem dolnym małe c i strzałką nad nią. Wektor ten rozłożony jest na dwie składowe: poziomą i pionową. Składowa pionowa skierowana jest do góry i oznaczona literą wielkie F z indeksem dolnym małe c oraz dwiema równoległymi, pionowymi kreskami i strzałką nad nią. Składowa pozioma skierowana jest w lewo i oznaczona literą wielkie F z indeksem dolnym małe c oraz dwiema pionowymi kreskami tworzącymi kąt prosty i strzałką nad nią.

Rozkład siły ciągu wirnika helikoptera na składowe.



Test

Statyka lotu helikopterem

Uruchom grę i sprawdź się w roli kandydata na pilota helikoptera, który zdaje test z fizycznych podstaw teorii lotu. Test jest trójstopniowy. Sprawdzisz, po kolei, czy

wiesz:

- dlaczego helikopter może zawisnąć w powietrzu;
- w jaki sposób spowodować, by nie obracał się on przy tym;
- jakie są relacje pomiędzy poszczególnymi siłami w trakcie poziomego lotu ze stałą prędkością.

Poziom trudności:

łatwy

Limit czasu:

7 min

Twój ostatni wynik:

-

Uruchom

Polecenie 1

Podaj etymologię (pochodzenie) słowa helikopter.

Zanim zajrzysz do słownika czy encyklopedii, postaraj się odgadnąć znaczenie greckich wyrazów składających się na tę nazwę. Zajrzyj też do podpowiedzi.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Jakie warunki muszą być spełnione, aby bryła sztywna była w równowadze? Zaznacz wszystkie odpowiedzi poprawne:

- ☐ Przyłożone siły muszą równoważyć przyłożone momenty sił.
- ☐ Przyłożone do niej siły muszą się równoważyć.
- ☐ Przyłożone do niej momenty sił muszą się równoważyć.
- ☐ Nie może być przyłożona do niej żadna siła.

Ćwiczenie 2



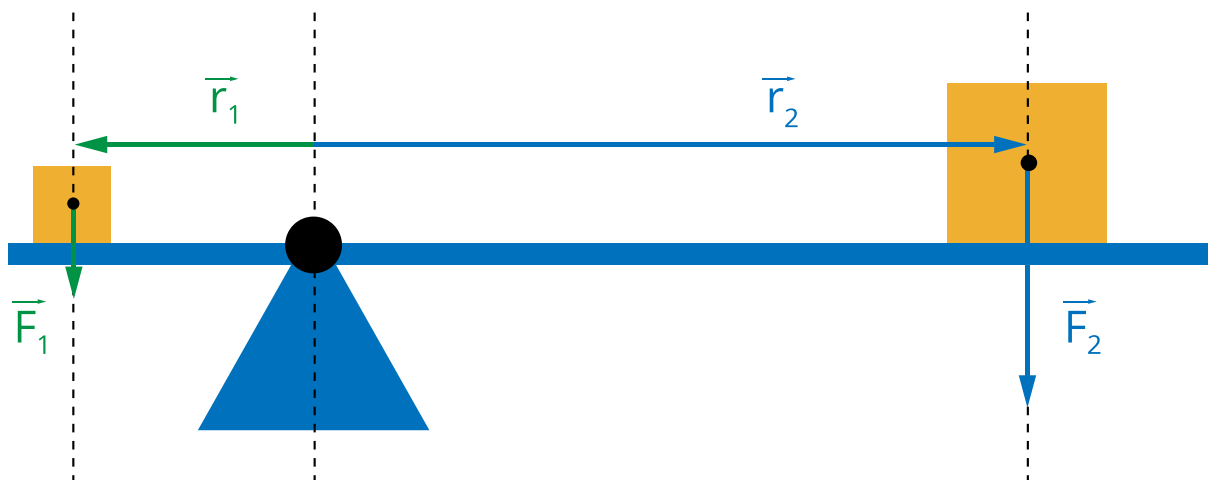
Jaką rolę pełni skrzydło ogonowe w helikopterze?

- ☐ Pozwala regulować wysokość lotu.
- ☐ Dostarcza dodatkowy ciąg, zwiększając prędkość maszyny.
- ☐ Umożliwia lot helikoptera w bok.
- ☐ Wytwarza moment siły równoważący moment siły wirnika głównego, umożliwiając kontrolowane obracanie się helikoptera dookoła osi pionowej.

Ćwiczenie 3



Poniższy rysunek przedstawia dwie bryły o różnych masach, umieszczone na ramionach dźwigni dwustronnej. Jaki warunek musi być spełniony, aby układ ten był w równowadze?



☐ $r_1^2 F_1^2 = r_2^2 F_2^2$

☐ $r_1 F_2 = r_2 F_1$

☐ $r_1^2 F_1 = r_2^2 F_2$

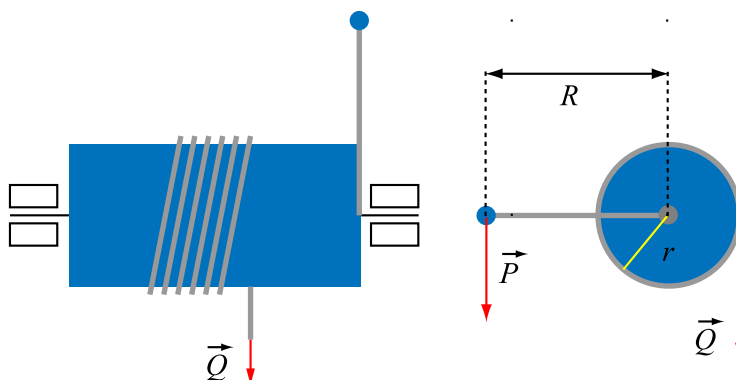
☐ $r_1 F_1 = r_2 F_2$

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 4



Poniższy schemat prezentuje studzienny kołowrót. Poprzez przyłożenie do korby o długości R siły $\vec{P}$ wytwarzamy moment siły, który wprawia środkowy walec o promieniu r w ruch obrotowy. W efekcie na walec ten nawija się lina, na której zawieszone jest wiadro z wodą, o ciężarze $\vec{Q}$, które unosi się do góry. Wiadro z wodą ma masę $m_w = 15$ kg. Z rysunku wynika, że korbą jest trzy razy dłuższa niż promień kołowrotu, czyli $R = 3r$. Korbę przekręcono do położenia poziomego i zawieszono na niej ciężar tak, że całość pozostaje w równowadze. Jaka była masa m_x tego obciążnika?



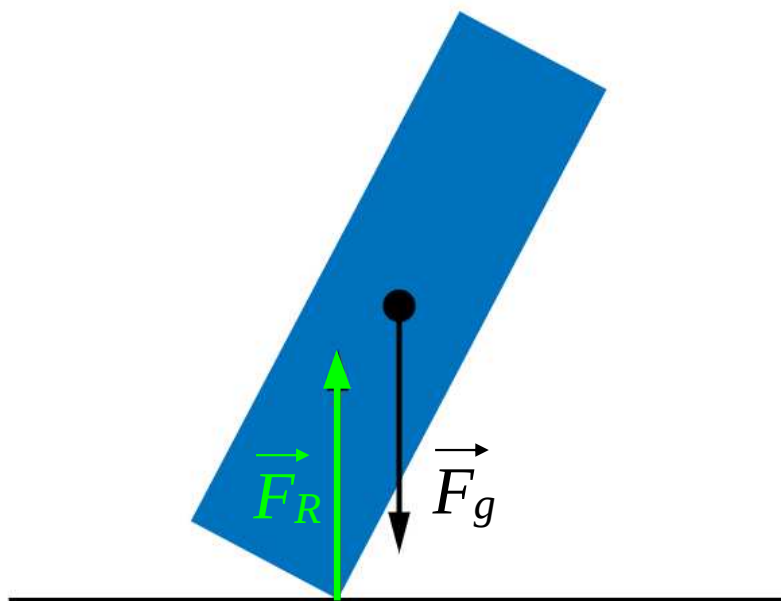
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

$m_x =$ kg.

Ćwiczenie 5



Do poniższej bryły sztywnej przyłożone są dwie siły skierowane pionowo: siła grawitacji, przyłożona w środku masy tej bryły, skierowana pionowo w dół oraz siła reakcji podłoża, przyłożona w miejscu styku bryły z ziemią, skierowana do góry. Siły te mają tę samą wartość, ten sam kierunek i przeciwne zwroty, więc znoszą się wzajemnie - ich wypadkowa wynosi zero. Czy zatem bryła ta pozostaje w równowadze?



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 6



W helikopterze wirnik na skrzydle ogonowym ma za zadanie wytwarzać siłę ciągu, która - ponieważ przyłożona jest na końcu długiego ramienia - tworzy moment siły dość duży, aby zrównoważyć moment siły powstający na głównym wirniku. Zwróćmy jednak uwagę, że tak samo jak silnik rozpędzający główny wirnik doznaje działania momentu siły, tak samo silnik obracający śmigłem ogonowym doznaje działania momentu siły. Dlaczego nie równoważy się tego momentu siły dodatkowym wirnikiem?

Przedstawiony na zdjęciu helikopter nie posiada wirnika ogonowego! Jak to zatem możliwe, że w trakcie lotu nie obraca się wokół własnej osi?



Zastosowanie dwóch wirników obracających się w przeciwnych kierunkach sprawia, że ich momenty sił wzajemnie znoszą się.



Zastosowano tu dwa wirniki, gdy jeden się włącza, drugi się wyłącza, w efekcie nie ma ciągłego ruchu obrotowego, który generowałby moment siły na helikopter.



Nie jest to możliwe, to zapewne model pokazowy, który naprawdę nie lata.



Śmigło ogonowe nie jest konieczne, jeśli wirnik ma możliwość zmiany kąta natarcia łopat.

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/pl/photos/%c5%9bmig%c5%82owiec-pokazy-lotnicze-air-show-4210032/> [dostęp 8.04.2022], domena publiczna.

Ćwiczenie 8



Bryła sztywna jest w równowadze, jeśli do zera sumują się przyłożone do niej siły oraz ich momenty.

Uzupełnij oba wzory, by stanowiły matematyczny zapis tego faktu.

$$\boxed{} = \boxed{} \vec{\mathbf{F}}_i = \boxed{}$$

$$\boxed{} = \sum_{i=1}^n \boxed{} = 0$$

$$\boxed{0} \quad \boxed{\vec{\mathbf{M}}_1 + \vec{\mathbf{M}}_2 + \cdots + \vec{\mathbf{M}}_n} \quad \boxed{\vec{\mathbf{M}}_i} \quad \boxed{\vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \cdots + \vec{\mathbf{F}}_n} \quad \boxed{\sum_{i=1}^n}$$

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Dariusz Aksamit
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Statyka bryły sztywnej w obliczeniach
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres 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 rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 5) rozróżnia wielkości wektorowe i skalarne, wykonuje graficznie działania na wektorach (dodawanie, odejmowanie, rozkładanie na składowe); 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. III. Mechanika bryły sztywnej. Uczeń: 3) stosuje warunki statyki bryły sztywnej; posługuje się pojęciem momentu sił wraz z jednostką.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wykorzystuje zasady dynamiki do analizy lotu helikoptera, 2. stosuje statykę bryły sztywnej w zadaniach.
Strategie i metody nauczania:	grywalizacja/gamifikacja
Formy zajęć:	praca grupowa, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	komputery dla każdego ucznia, wydrukowane materiały
Materiały pomocnicze:	–
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel przed lekcją drukuje kilka darmowych zdjęć z Internetu, prezentujących śmigłowce różnej konstrukcji: układ Sikorskiego, układ Kamowa, układ Piaseckiego i układ Flettnera. W trakcie lekcji nauczyciel dzieli uczniów na grupy, każdej przydzielając po jednym układzie – nauczyciel prosi uczniów o zaznaczenie na obrazkach wektorów sił i momentów sił występujących w tych układach. Następnie każda z grup prezentuje reszcie klasy, co ustaliła (nauczyciel ewentualnie komentuje i uzupełnia). Nauczyciel podsumowuje całość stwierdzeniem, że równowaga bryły sztywnej oznacza znoszenie się zarówno sił, jak i momentów sił przyłożonych do tej bryły.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel prosi uczniów o indywidualne zagranie w grę z niniejszego e-materiału, rywalizując na czas wykonania całej gry. Uczniowie udzielają odpowiedzi, które nauczyciel wprowadza do gry, notując który z uczniów pierwszy udzielał poprawnych odpowiedzi. Gra może być czasochłonna, możliwe, że na lekcji zostanie zrealizowane tylko kilka etapów, pozostałe można zalecić jako pracę domową.	
Faza podsumowująca:	
Nauczyciel podsumowuje wyniki gry, nagradzając zwycięzców. Prosi również o indywidualne rozwiązanie zadań 1, 2 i 7 dla upewnienia się, że wszyscy uczniowie zrozumieli najważniejsze założenia lekcji. Nauczyciel podsumowuje ostatni raz warunki równowagi bryły sztywnej i zadaje pracę domową.	
Praca domowa:	
Dokończenie gry oraz wykonanie zadań 3, 4 i 8 z zestawu ćwiczeń w celu powtórzenia i utrwalenia wiadomości o warunkach statyki bryły sztywnej.	

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Medium może być wykorzystane przez uczniów w domu przed lekcją metodą odwróconej klasy. Uczniowie w domu grają w grę z e-materiału, a na lekcji omawiane są otrzymane rezultaty.
--	--