

Zadanie 3. Łańcuch koralików.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla

Łańcuch koralików Zadanie 3

Treść problemu:

W naczyniu typu zlewki znajduje się długi łańcuch nanizanych na nitkę koralików. Gdy odpowiednio długą część tego łańcucha wyciągniemy poza brzeg naczynia i puścimy, zacznie on pod wpływem siły ciężkości spadać w dół z rosnącą szybkością. W pewnej chwili łańcuch oderwie się od krawędzi szklanki. Zbadaj i wyjaśnij to zjawisko.

Analiza teoretyczna i założenia

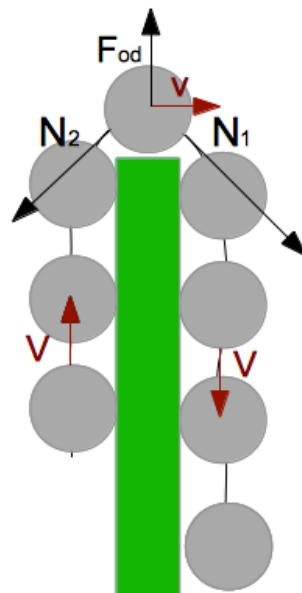
By zrozumieć mechanikę problemu należy zastanowić się jakie siły działają na korale podczas ich spadku i prześlizgiwania się przez krawędź naczynia. Na rysunku 1 przedstawiono schemat zakładanego rozkładu następujących sił:

F_{od} – siła odśrodkowa (układ odniesienia związany z koralami);

N_1 – naprężenie generowane przez część łańcucha zwisającą z prawej;

N_2 – naprężenie generowane przez część łańcucha zwisającą z lewej;

V – prędkość chwilowa łańcucha;



Rys. 1. Schemat przedstawiający początkowo zakładany rozkład sił.

Źródło: Opracowanie własne.

Postawiona w oparciu o przedstawiony na rys. 1 rozkład sił **pierwsza hipoteza zakłada, że na skutek wyprowadzenia łańcucha z równowagi (poprzez nadanie mu prędkości początkowej) zaczyna się on poruszać ruchem niejednostajnie przyspieszonym, a jego prędkość wzrasta co skutkuje wzrostem siły odśrodkowej F_{od}** . Dodatkowo coraz większa ilość koralików znajduje się po jednej stronie ścianki zlewki a coraz mniejsza po drugiej co przekłada się na spadek wartości siły N_2 . Taka więc sytuacja sprawia, że korale są jednocześnie coraz słabiej przytrzymywane i coraz mocniej odciągane przez siłę F_{od} logicznym jest więc, że w pewnym momencie zamiast sunąć spokojnie przez krawędź zlewki zaczną się one podnosić. Korale jednak nie unoszą się od pewnego momentu na stałe i coraz wyżej, lecz zaczynają wykonywać drgania o coraz większej amplitudzie aż ostatecznie ich końcówka wystrzeliwuje zdecydowanie wyżej i łukiem spada na drugą stronę (jeden z wyników eksperymentu opisanego w sekcji Opis eksperymentów). Jednak pierwsza hipoteza przewiduje i taką sytuację. Jeśli korale wznoszą się to następują dwa dodatkowe zjawiska, których nawet na tak wstępnym etapie nie można zaniedbać. Po pierwsze, gdy

Zadanie 3. Łańcuch koralii.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla

korale podnoszą się wzrasta promień zataczanego przez nie łuku (co wiąże się ze spadkiem siły odśrodkowej). Po drugie korale, gdy poruszają się w górę ze względu na swoją bezwładność mijają punkt w którym siła N_2 i odśrodkowa się równoważą. Skutkuje to tym, że korale opadając mijają ponownie swój punkt równowagi, jednak teraz prędkość koralii jest odpowiednio większa więc i siła odśrodkowa jest odpowiednio większa. Efektem tego jest powtórzenie się cyklu, ale z większą wysokością maksymalną.

Odnosząc się do momentu zetknięcia koralika z krawędzią przeszkody możemy sformułować **drugą hipotezę**. *Zakłada ona, że wpływ na wyskoki koralika na krawędzi szklanki ma sferyczny kształt koralika i składowa odpowiednio dużej siły ciągnącej oraz siły reakcji ścianki szklanki na koralik.*

Według tej hipotezy na skutek sferycznego kształtu koralika krawędź przeszkody dostaje się w szczelinę między dwoma koralikami. W chwili gdy na korale zadziała odpowiednio duża siła ciągnąca (np. dużo większa liczba koralików będzie zwisać po jednej stronie ścianki lub końcówka zostanie odpowiednio wysoko podniesiona i puszczona swobodnie) składowa jej oraz siły reakcji ścianki na koralik poniesie całość nieco w górę i umożliwi wypadanie łańcucha ze zlewki. Jednak za chwilę krawędź dostanie się znowu w przerwę między koralikami. Cykl się powtórzy ale ze względu na prędkość (z którą będzie się oczywiście poruszał „zwolniony” łańcuch) będzie to zderzenie sprężyste. Korale odbiją się teraz i podniosą na pewną wysokość, opadną i cykl się powtórzy a wzrastająca prędkość sprawi, że te wyskoki będą miały coraz większą wysokość maksymalną osiąganą w podskoku. Na wzrost tej wysokości będzie miał także wpływ spadek siły N_2 (jest ona przecież zależna od ilości koralików po jednej stronie zlewki) ponieważ głównie ona odpowiada za ponowne dociśnięcie łańcucha do krawędzi po wyskoku. Jednym z efektów takiego ruchu będzie to, że krawędź nie wpada w każde zagłębienie między koralami. Przy większej prędkości nad krawędzią zdąży przelecieć jeszcze kilka takich przerw zanim korale opadną. Można więc porównać ten ruch do ślizgu łodzi motorowej (jeśli przyjmiemy, że koralik to górka fali a zagłębienie to dolinka). Analogicznie przy pewnej prędkości łańcuch będzie prześlizgiwał się przez krawędź, która nie będzie już wsuwała się pomiędzy koraliki.

Obie hipotezy w podobny sposób tłumaczą zachowanie się ostatniego koralika. Pierwsza hipoteza zakłada, że wyskok koralika jest tak duży ze względu na największą z wszystkich innych prędkość przy pokonywaniu krawędzi, skutkiem tego będzie na niego działała największa siła odśrodkowa oraz na to, że nie istnieje w tym momencie siła N_2 (wywoływana przecież przez koraliki które są za tym pokonującym krawędź).

Druga hipoteza zakłada, że do wyskoku przyczynia się nie tylko największa spośród wszystkich innych prędkość, ale i największa działająca na ostatni koralik siła N_1 . To wszystko sprawia, że siła reakcji R i naprężenia nici N_1 wytwarzają największą siłę wypadkową wyrzucającą ostatni koralik najwyżej. W kwestii wpływu braku siły N_2 teoria ta jest zgodna z pierwszą.

Opis eksperymentów

Aby zweryfikować postawione hipotezy została przeprowadzona seria eksperymentów mających wyjaśnić wpływ poszczególnych czynników na ruch koralii.

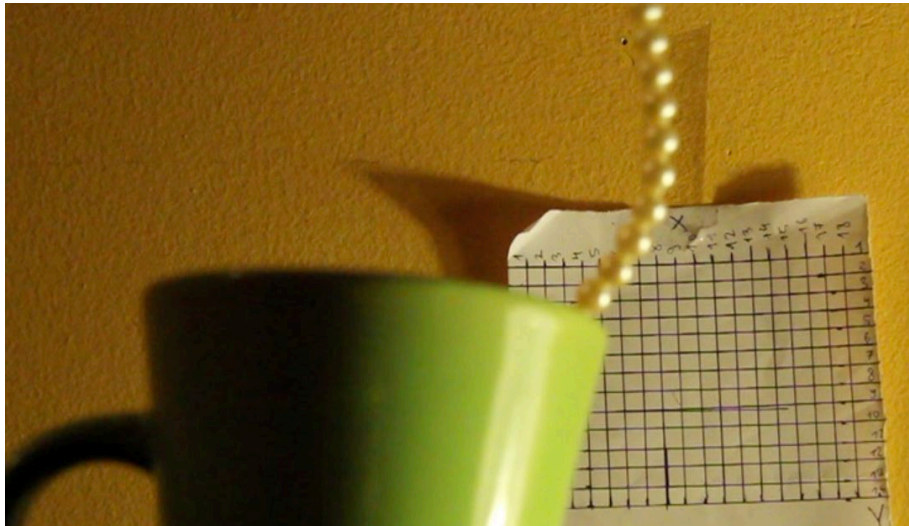
Pierwszą próbą miała sprawdzić zachowanie się koralii w warunkach przewidzianych w problemie (łańcuch prześlizguje się przez krawędź naczynia typu zlewka).

Do wykonania eksperymentu zostały użyte:

- Kubek porcelanowy o parametrach zbliżonych do zlewki (cienka stosunkowo ostro zakończona ścianka lekko wywinięta na zewnątrz);
- Łańcuch „sztucznych pereł”-plastikowych koralii o średnicy ok. 0.5 cm;
- Taśma klejąca;
- Kartka w 0.5cm kratkę jako skala;
- Aparat cyfrowy z funkcją nagrywania filmu (jako urządzenie rejestrujące).

Zadanie 3. Łańcuch korali.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla



Fot. 1. Korale tuż przed upuszczeniem.

źródło: Opracowanie własne.

Kartka została przytwierdzona do ściany (tuż za kubkiem) przy pomocy taśmy. Korale zostały umieszczone w kubku ustawionym naprzeciwko obiektywu aparatu. Następnie została rozpoczęta rejestracja filmu. Jeden koniec łańcucha został wyciągnięty poza obręb kubka, podniesiony na pewną wysokość (ok $\frac{1}{4}$ długości łańcucha) i puszczone swobodnie. Eksperyment powtórzono kilkakrotnie a film poddano analizie przy użyciu komputera. Wyniki zamieszczono w sekcji wyniki.



Fot. 2. Zrzut ekranu przebiegu przetwarzania danych z eksperymentu.

źródło: Opracowanie własne.

Drugi eksperyment miał sprawdzić zachowanie się korali w warunkach, gdy siła odśrodkowa ma ograniczony wpływ na łańcuch korali (łańcuch sunie po płaskiej powierzchni

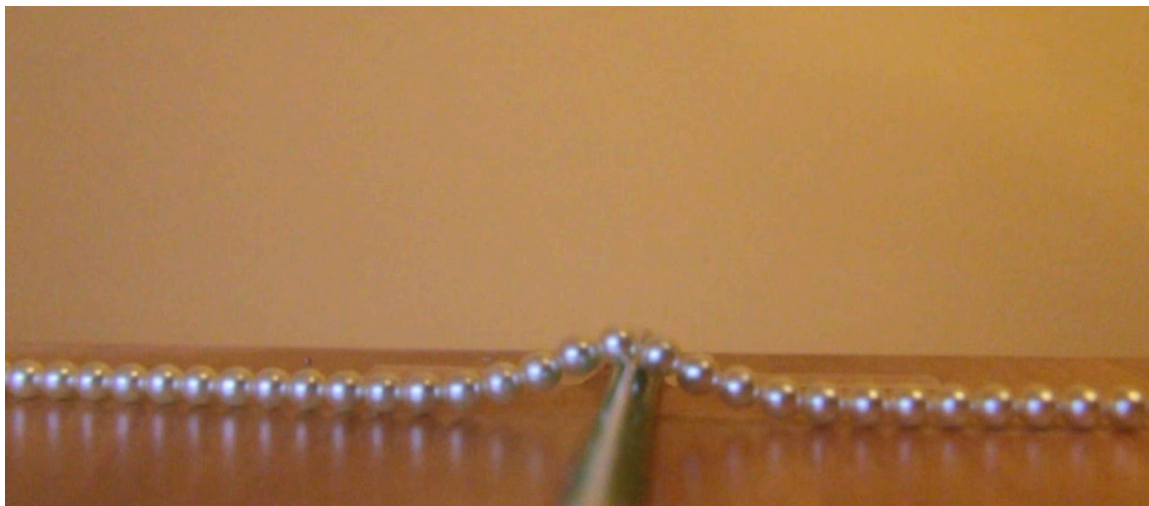
Zadanie 3. Łańcuch koralu.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla

i napotyka na mały garb).

Do wykonania eksperymentu użyto:

- Ołówek o trójkątnym przekroju (jako „garb”)
- Łańcuch „sztucznych pereł”-plastikowych koralu o średnicy ok. 0.5 cm
- Aparatu cyfrowego z funkcją nagrywania filmu (jako urządzenie rejestrujące)
- Taśmy klejącej
- Stołu



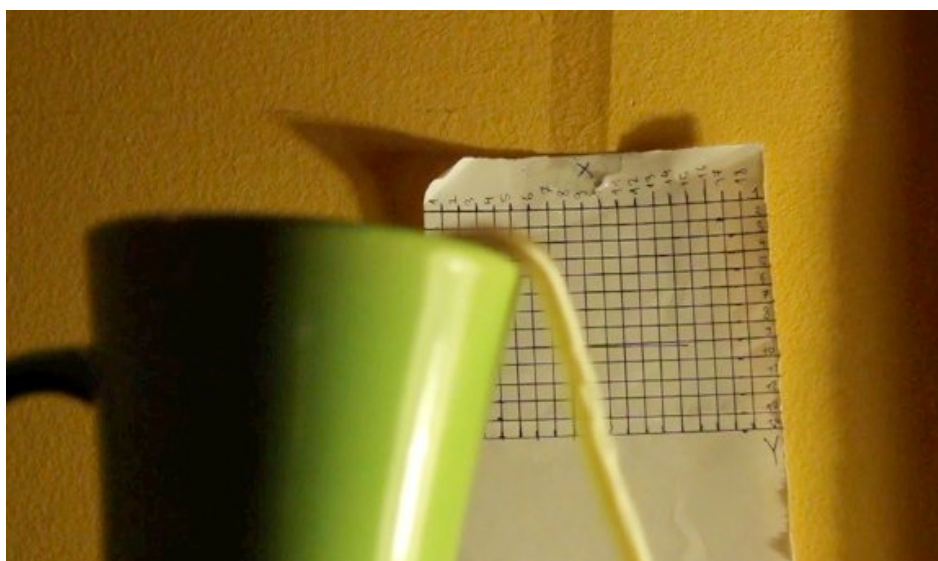
Fot. 3. Korale tuż przed rozpoczęciem eksperymentu.

Źródło: Opracowanie własne.

Ołówek został przytwierdzony do stołu za pomocą taśmy klejącej. Korale zostały położone płasko na stole tak by przechodziły przez ołówek mniej więcej w połowie swej długości a jeden koniec mógł zwisać poza krawędź stołu. Została rozpoczęta rejestracja filmu. Końcówka łańcucha została podniesiona ponad płaszczyznę stołu na całą swą długość i puszczona swobodnie. Eksperyment powtórzono kilkakrotnie a film poddano analizie na komputerze. Wyniki zamieszczono w sekcji wyniki.

Wyniki

Wyniki pierwszego eksperymentu:



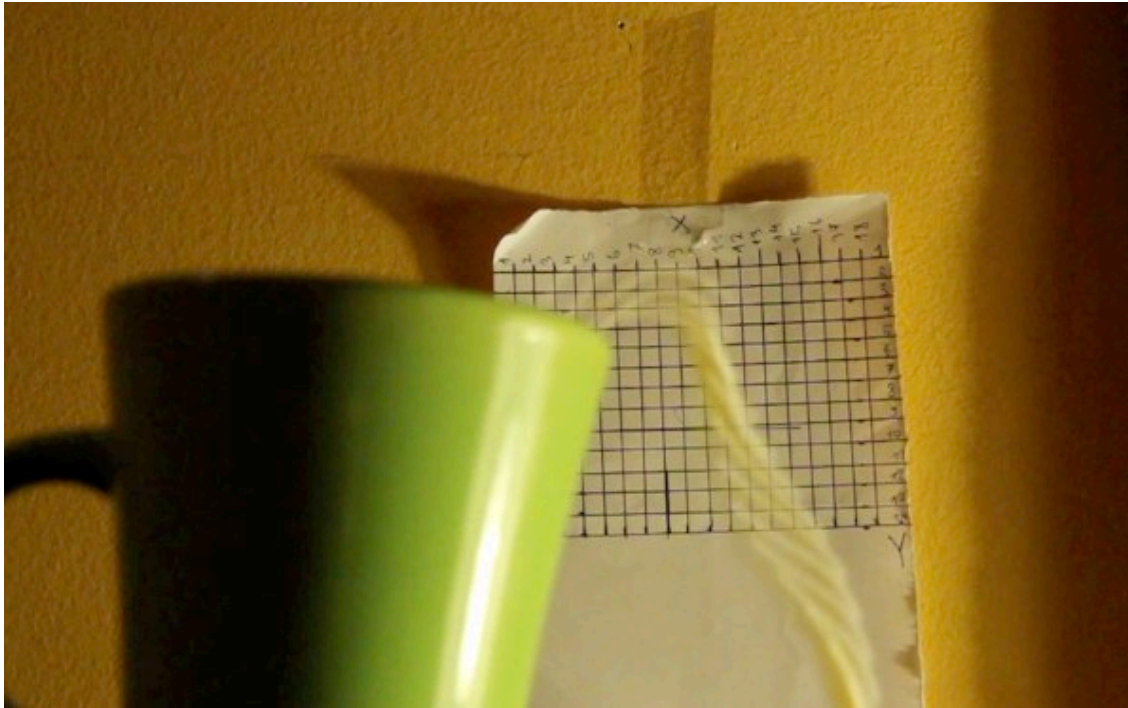
Fot.4 Jeden z podskoków łańcucha

Źródło: Opracowanie własne.

Zadanie 3. Łańcuch koralik.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla

Korale początkowo suną równo bez większych podskoków przez krawędź naczynia. Ich prędkość wzrasta niejednostajnie i wkrótce osiągają prędkość około 0.12 m/s (w drugiej sekundzie spadku). Lecz już po ok. 1 sekundzie od swobodnego puszczenia koralik przestają się one spokojnie prześlizgiwać, cały łańcuch zaczyna podskakiwać. Początkowo na kilka mm, ale z każdym podskokiem coraz wyżej i wyżej. Jednak nawet tuż przed wysunięciem się ostatniego koralika podskoki te mają najwyżej 0.6 cm, lecz gdy na krawędzi naczynia znajduje się ostatni koralik zostaje on wybity na prawie 3 cm, a cały koniec łańcucha zatacza w powietrzu łuk i spada na podłogę w odległości kilkunastu centymetrów od naczynia.



Fot. 5 Ostateczny wyskok łańcucha koralik

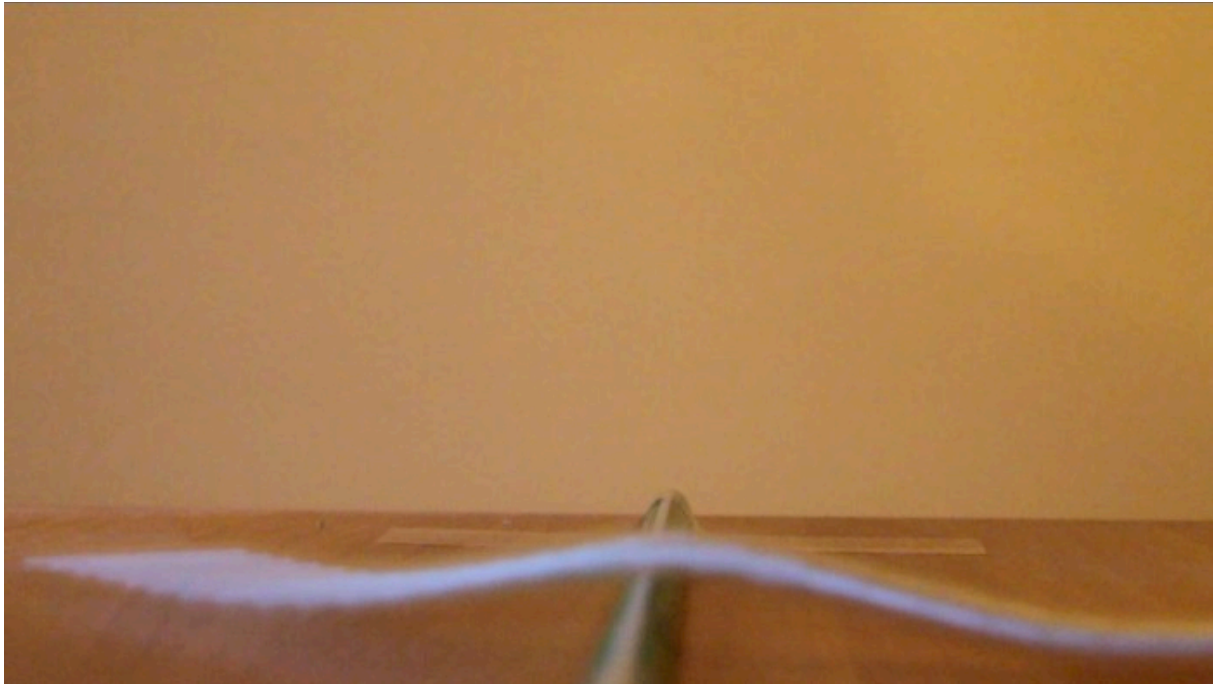
Źródło: Opracowanie własne.

Wyniki drugiego eksperymentu:

Początkowo korale również suną równo bez większych podskoków przez krawędź przeszkody. Lecz mimo tego, że łuk który zataczają jest duży a przez to siła odśrodkowa mała zaczynają podskakiwać. Czynią to jednak słabiej i dopiero pod koniec ich podskoki stają się bardziej wyraźne. Wykonują dwa gwałtowniejsze podskoki a gdy na przeszkodzie znajduje się ostatni koralik zostaje on wybity na kilka cm. A cała około 10 centymetrowa końcówka po łuku wypada poza obręb stołu.

Zadanie 3. Łańcuch koralu.

Autor rozwiązania: Krzysztof Pyrchla



Fot. 6 Końcowa faza ruchu łańcucha koralu z widocznym wyskokiem

Źródło: Opracowanie własne.

Wnioski

Wyniki eksperymentów:

- korale poruszają się ruchem niejednostajnie przyspieszonym;
- korale pokonują krawędź po łuku skutkiem tego działa na nie siła odśrodkowa, która ma znaczący wpływ na wysokość wyskoku;
- druga siła działająca na korale jest skutkiem ich kształtu (występowania przerwy między koralikami) i jest jedną ze składowych siły ciągnącej.

Wyniki eksperymentów potwierdzają prawdziwość obu hipotez. Na wyskok koralu ma wpływ zarówno siła odśrodkowa wywołana przez to, że krawędź pokonują po krzywoliniowym torze ruchu jak i to że krawędź wciska się w szparę pomiędzy koralami i powoduje powstanie dodatkowej siły reakcji wyrzucającej korale w górę.

Źródła:

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker – Podstawy fizyki, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005
2. A. Januszajtis – Fizyka dla Politechnik, t. I, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1977.
3. http://pl.wikipedia.org/wiki/Nieinercjalny_układ_odniesienia
4. http://pl.wikipedia.org/wiki/Siła_odśrodkowa