



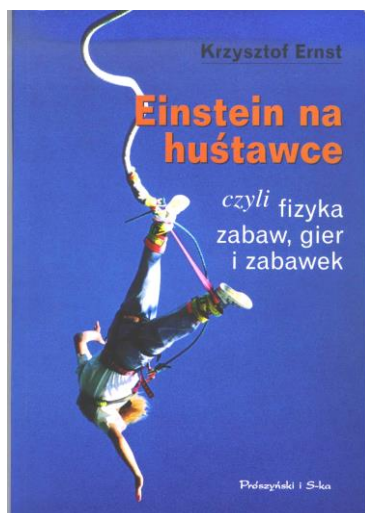
## CO CZYTAĆ

### „Diabelskie koło”

*Fragment książki Krzysztofa Ernsta*

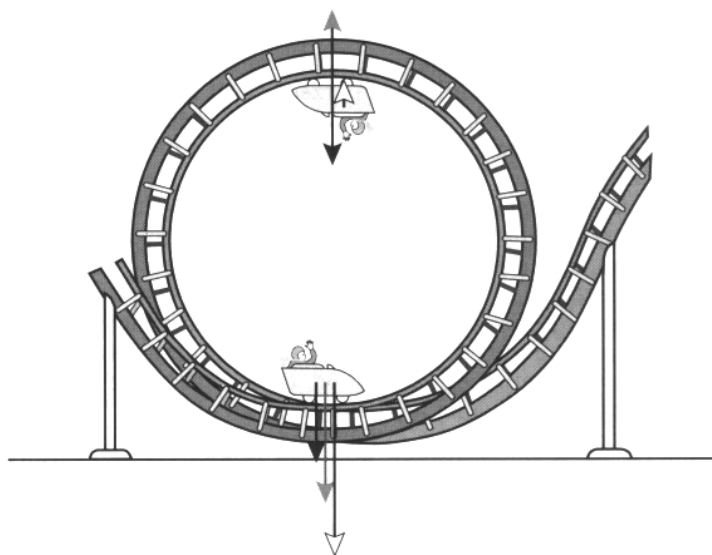
#### Od Redakcji:

Zachęcamy Państwa do lektury książki, niedawno zmarłego, Profesora Krzysztofa Ernsta *Einstein na huśtawce, czyli fizyka zabaw, gier i zabawek*, Wydawnictwo Prószyński i S-ka SA, Warszawa 2002. Aby pokosztować przyjemności czytania, drukujemy fragment.



„Elementem budzącym największy respekt wśród potencjalnych pasażerów jest pętla śmierci. Tylko odpowiednio duże konstrukcje mogą sobie pozwolić na wkomponowanie tego elementu do oferty proponowanych atrakcji. Aby opisać doznania przeżywane przez pasażerów w pętli śmierci, a także określić warunki, jakie musi ona spełniać, przyjmijmy upraszczające założenie, że kolejka składa się z jednego tylko wagonika. Wagonik ten zwiększa swoją prędkość w miarę zbliżania się do najniższego punktu pętli. W punkcie tym (rys. 100) wektor przyspieszenia dośrodkowego skierowany jest pionowo ku górze, co oznacza, że odczuwana przez pasażera siła odśrodkowa bezwładności (strzałka szara) skie-

rowana jest do dołu, czyli zgodnie z jego ciężarem (strzałka czarna). Działająca na niego siła wypadkowa (strzałka biała) sprawia, że czuje się tak, jak gdyby znajdował się w polu grawitacyjnym o przyspieszeniu równym  $3g$  (wartość przyjęta na rysunku). W szczególnych przypadkach wielokrotność  $g$  może być większa. Wjeżdżając pod górę, wagonik wytraca swoją prędkość i w najwyższym punkcie pętli osiąga jej wartość minimalną. Przyspieszenie, tym razem o wartości mniejszej niż na dole, skierowane jest przez cały czas ku środkowi pętli (rys. 100), a tym samym odczuwana przez pasażera siła ma kierunek przeciwny do jego ciężaru. W konsekwencji czuje się on lżejszy lub nieważki, a nawet może doznać odczucia (jak na rysunku), że znajduje się w polu o przeciwnym kierunku grawitacji.



rys. 100

Większość kolejek zaprojektowana jest w ten sposób, że odczuwana przez pasażerów siła wypadkowa przez cały czas skierowana jest na zewnątrz pętli. Teoretycznie można by nie zapinać w takiej sytuacji szelek zabezpieczających, proponując w ten sposób emocje przekraczające zapewne granice wytrzymałości większości uczestników zabawy. Czyni się to jednak zarówno dla uspokojenia pasażerów, jak i usatysfakcjonowania towarzystw ubezpieczeniowych. W kolejkach, gdzie siła pojawiająca się w wyniku ruchu przyspieszonego nie jest w stanie zrównoważyć ciężaru

w górnej części pętli, przymocowanie szelkami do krzesełek jest oczywiście niezbędne. Pasażerowie w pewnym momencie po prostu zawisają na nich, a jeśli nie chcą stracić kapelusza, to muszą go ręką przytrzymywać.

Narzuca się natychmiast pytanie, jakie musi być przewyższenie miejsca startu kolejki nad najwyższym punktem pętli, aby wagonik utrzymał się na torach bez konieczności wprowadzenia dodatkowych zabezpieczeń. Uproszczenie sprowadzające kolejkę do jednego wagonika wprowadziliśmy już wcześniej. Jeśli ponadto nie uwzględnimy straty energii powstałej w wyniku wszelkich oporów ruchu, to odpowiedź na pytanie wynika z elementarnych obliczeń. Wystarczy zauważyć, że w najwyższym punkcie pętli siła dośrodkowa musi być przynajmniej równa ciężarowi wagonika, a ponadto pamiętać o obowiązaniu zasady zachowania energii. Pojawiają się w ten sposób dwa proste równania:

$$Mv^2/r = Mg \quad (1)$$

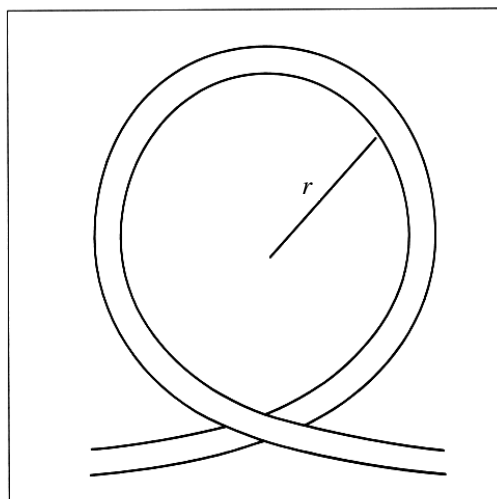
$$Mv^2 = Mgh \quad (2)$$

gdzie  $M$  jest masą wagonika,  $g$  – przyspieszeniem ziemskim,  $r$  – promieniem pętli,  $v$  – prędkością wagonika w jej najwyższym punkcie i  $h$  – różnicą wysokości najwyższego punktu toru i punktu startu. Rozwiązanie równań prowadzi do odpowiedzi  $h = r/2$ , co oznacza, że różnica ta musi być przynajmniej równa połowie promienia. W praktyce musi być ona większa, niż wskazują teoretyczne obliczenia, ze względu na przyjęte w naszym rachunku uproszczenia, a także na konieczny margines bezpieczeństwa.

Postawmy teraz kolejne pytanie. Jakie przeciążenie będzie odczuwał pasażer w najniższym punkcie pętli, jeśli spełnione zostaną wyznaczone przed chwilą warunki, zapewniające wagonikowi utrzymanie się na torach na całej ich długości? W chwili startu z minimalnej (potrzebnej do tego) wysokości energia potencjalna wagonika w stosunku do najniższego punktu pętli równa jest  $2,5Mgr$ . Jej zamiana na energię kinetyczną ( $Mv_m^2/2$ ) oznacza, że maksymalna prędkość  $v_m$  w tym punkcie wyniesie  $\sqrt{5gr}$ . W ten sposób wartość siły dośrodkowej, działającej na pasażera o masie  $m$  ( $mv_m^2/r$ ) a jednocześnie odczuwanej przez niego jako dodatkowo wciskająca go w krzeselko kolejki, będzie równa  $5mg$ . Jeśli uwzględnić jeszcze jego własny ciężar, to nasz nieszczęsny pasażer poddany zostanie przeciążeniu sięgającemu  $6g$ , czyli znacznie przekraczającemu wartość uznaną za dopuszczalną na diabelskich kolejkach.

Czy otrzymany przez nas wynik miałby oznaczać niemożność realizacji pętli spełniających stawiane wymagania? A może jedynymi dopuszczalnymi są konstrukcje wymagające przymocowania pasażera do krze-

selka, ze względu na niemożliwość skompensowania siły ciężkości w najwyższym ich punkcie? Odpowiedź na oba pytania brzmi: nie. Da się bowiem zbudować taką pętlę, która – nie gwałcąc praw fizyki – spełni również stawiane jej wymagania. Jej kształt przedstawiony został na rys. 101. Jest to krzywa zwana klotoidą, charakteryzująca się mniejszym promieniem krzywizny swej górnej części niż dolnej. Zmniejsza to wymaganą prędkość w najwyższym punkcie toru, a jej osiągnięcie pozwala na obniżenie prędkości na dole. Wszelkie doznania, jakich ma doświadczyć pasażer na górze, zostają zachowane bez konieczności zmuszania go do przechodzenia poprzedzających je katuszy.



rys. 101

Warto zauważyć, a widać to na rys. 101, że wjazd na pętlę i wyjazd z niej odbywają się po znacznie łagodniejszym łuku, niż gdyby miały one natychmiast przechodzić do toru poziomego. W ten sposób dodatkowo złagodzone zostają przeciążenia w dolnej jej części. Oba rozwiązania stosowane są przy konstrukcji pętli diabelskich kolejek.”