

8

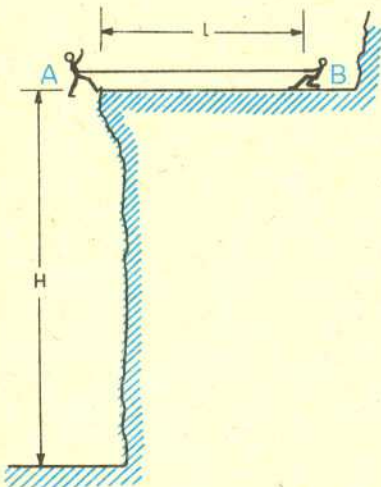
mała delta

Jak zoptymalizować rozpraszanie energii?

(Rozwiązanie zadania 108 z *Delty* 9/1990 z Klubu 44 F)

Pytanie wydaje się dziwne: przecież energię trzeba oszczędzać. Owszem, gdy jednak chcemy zatrzymać rozpedzony samochód, musimy jego energię kinetyczną jakoś rozproszyć – na tym właśnie polega hamowanie.

A teraz przenieśmy się na łono natury, najlepiej gdzieś w góry. Wyobraźmy sobie (rysunek) przepaść (głębokość przepaści $H = 14$ m), nad nią poziomy taras (szerokość tarasu $L = 7$ m) i oblodzoną krawędź przepaści. Na tarasie widzimy dwóch taterników – nazwijmy ich Alkiem (A) i Bolkim (B) – połączonych liną asekuracyjną; Alek (masa $m_A = 100$ kg) przywiązany jest do niej w sposób stały, Bolek (masa $m_B = 70$ kg) ma możliwość wypuszczania liny dowolnie regulując siłę jej naciągu.



W pewnej chwili, gdy Bolek znajduje się w najbardziej oddalonym punkcie tarasu, Alek zaczyna spadać w przepaść. Teraz od refleksu Bolka (i jego znajomości fizyki) zależy, jak się sprawa zakończy.

A wygląda poważnie: upadek – nie hamowany – z wysokości 14 m, to niechybna śmierć. Musimy więc przyjąć, że Bolkowi nie brakuje przytomności umysłu i szybkości działania. Cóż zatem robi?

I. Jeśli jest ostrożny, będzie linę wypuszczał z taką siłą F_1 , aby samemu nie spaść w poślizg, tzn.

$$F_1 < f_s m_B g$$

($f_s = 0,7$ – orientacyjna wartość współczynnika tarcia statycznego obuwia o podłoże, $g = 9,8$ m/s² – przyspieszenie ziemskie). W ten sposób podczas całego spadania (na odcinku o długości H) zostanie rozproszona energia o wartości równej

$$F_1 H < f_s m_B g H,$$

co dla naszych danych może dochodzić do 49% energii potencjalnej $E = m_A g H$, jaką miał Alek względem dna przepaści. W najlepszym razie (przy znaku równości) energia kinetyczna Alka w chwili jego upadku na dno będzie taka, jak przy spadku z wysokości $0,51H \approx 7$ m (prędkość $v_1 = 11,8$ m/s). Oznacza to, niestety, znaczne poturbowanie.

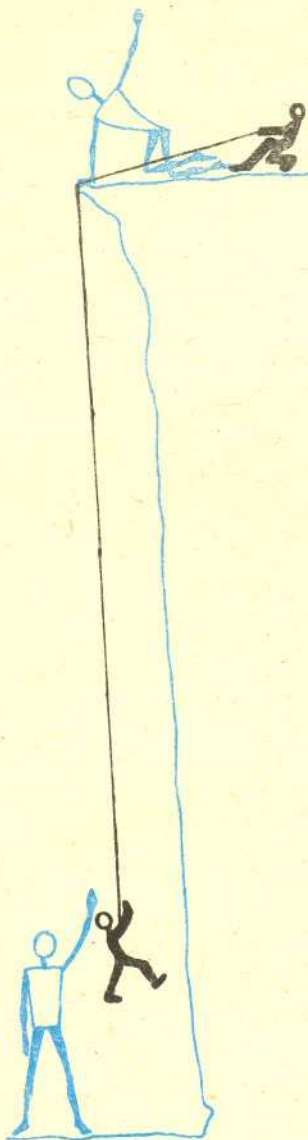
II. Jeśli Bolek jest nerwowy (albo nie ma „wycucia”) i przytrzyma linę z siłą większą od $f_s m_B g$, doprowadzi do zablokowania liny i zacznie się ślizgać w stronę przepaści. Będzie przy tym hamował swego towarzysza zaledwie siłą

$$F_2 = f_k m_B g < f_s m_B g$$

($f_k = 0,5$ – orientacyjna wartość współczynnika tarcia kinetycznego obuwia o podłoże). Bierna praca tej siły na drodze L stanowi w naszym przypadku zaledwie około 18% energii E . W rezultacie upadek Alka na dno nastąpiłby z taką prędkością, jak przy spadku z wysokości $0,72H = 11,5$ m ($v_2 = 15,0$ m/s), co jest trudne do przeżycia. O ile na dodatek Bolek w porę nie puści liny, to nastąpi podwójna tragedia.

III. Jeśli Bolek dobrze orientuje się w prawach mechaniki, może poza tarcie wykorzystać zasadę zachowania pędu. Tak więc najpierw będzie postępował jak w punkcie I, a na krótko przed osiągnięciem przez Alka dna przytrzyma linę

108. Dwaj taternicy znajdują się na poziomym, płaskim tarasie nad przepaścią o wysokości $H = 14$ m. W pewnej chwili taternik A spada w przepaść. Jego kolega B, stojący w odległości $l = 7$ m od krawędzi, trzyma linę asekuracyjną, do której przywiązany jest spadający. Jak powinien on postępować, aby zminimalizować prędkość upadku towarzysza na dno przepaści i samemu nie spaść? Może on trzymać się liny kurczowo bądź też dowolnie regulować siłę jej wypuszczania. Przyjmując, że tarcie liny o próg skalny jest zaniedbywalne, natomiast współczynniki tarcia taternika B o podłoże wynoszą: 0,5 dla tarcia kinetycznego i 0,7 dla tarcia statycznego. Masy taterników A i B wynoszą odpowiednio $m_A = 100$ kg, $m_B = 70$ kg. Wytrzymałość liny, którą można uznać za nierozciągliwą, jest równa 2000 N. Obliczyć przybliżoną prędkość upadku taternika A w najbardziej korzystnym przypadku.



mocniej i przejmie część jego pędu (którą potem może wytracić ślizgając się po podłożu w stronę przepaści).

Proces przytrzymywania liny przypomina zderzenie niesprężyste dwóch ciał A i B. W wyidealizowanym więc przypadku natychmiastowego szarpnięcia (lina nierozciągliwa i nieograniczone siły działające w zaniedbywalnym czasie) obliczamy prędkość końcową obu taterników jako

$$v = \frac{m_A}{m_A + m_B} v_1 \approx 6,9 \text{ m/s},$$

co odpowiada spadkowi z wysokości 2,5 m. Sprawdzamy jeszcze, że energia kinetyczna, jaką uzyskał Bolek $m_B v^2 / 2 = 1690 \text{ J}$, nie przewyższa wartości pracy biernej sił tarcia $F_2 L = 2400 \text{ J}$, bo to jest warunkiem jego zatrzymania się przed krawędzią przepaści.

W rzeczywistości siły szarpnięcia nie mogą przekroczyć pewnej wartości, którą – ze względu na bezpieczeństwo obu taterników – możemy określić np. na $Q = 2000 \text{ N}$ (wytrzymałość lin bywa znacznie większa). Obliczenia dla takiego przypadku są dość żmudne. Przy założeniu nierozciągliwej liny wynika z nich (dla podanego zespołu danych) następująca procedura optymalna:

- 1) od początku spadania Alka Bolek wypuszcza linę z siłą zbliżoną do $f_s m_B g = 343 \text{ N}$, tzn. na granicy własnego poślizgu (patrz punkt 1);
- 2) z chwilą, gdy Alek znajdzie się na wysokości 1,1 m nad dnem przepaści, Bolek zwiększa nagle siłę hamowania liny do wartości $Q = 2000 \text{ N}$, przez pewien czas (0,3 s) występuje poślizg liny, a jej zablokowanie następuje w momencie, gdy Alek osiąga dno, Bolek uzyskuje w tym czasie prędkość równą co do wartości prędkości upadku Alka;
- 3) Bolek wyhamowuje tę prędkość ślizgając się po podłożu i zatrzymuje się 0,2 m przed krawędzią przepaści (!).

W ten sposób daje się przez tarcie rozproszyć około 80% energii spadającego taternika, dzięki czemu jego prędkość upadku odpowiada spadkowi z wysokości niespełna 3 m – jest więc bezpieczna.

Interesujące jest jeszcze porównanie, jakie części energii rozproszonej przypadają na poszczególne procesy:

- tarcie liny wypuszczanej przez Bolka w fazie 1 – 49%,
- tarcie liny w fazie 2 – szarpnięcia – 30%,
- tarcie Bolka o podłoże podczas poślizgu w fazach 2 i 3 – 21%.

Małą Deltę przygotował Andrzej NADOLNY

Uwagi taternika

Sytuacja opisana w zadaniu w praktyce w górach nie powinna się w ogóle wydarzyć. Jeśli taternik B pokonał trudny (14 m) uskok skalny, to powinien on po drodze założyć tzw. przelotowe punkty asekuracyjne (haki, kostki czy petelki), a po dojściu w łatwy teren (półka) założyć stanowisko asekuracyjne. Dopiero wtedy może on ściągać partnera będąc z góry przygotowany na jego ewentualny upadek. Tak powinno to wyglądać zgodnie ze sztuką wspinania i asekuracji, co w oczywisty sposób zmienia warunki wyjściowe zadania. Tarcie liny na przelotach, jej rozciągliwość (z założenia wszystkie liny alpinistyczne są elastyczne), tarcie liny o skałę i inne jeszcze czynniki bardzo znacznie zmniejszają wartość siły działającej na asekurującego (np. jeżeli kąt przegięcia liny na karabinku jest bliski 180° , może to zredukować działanie tej siły nawet o połowę!).

Przyjmijmy jednak, że nasi taternicy są niedoświadczeni i wspinają się w takim terenie z tzw. lotną asekuracją (bez przelotów, obydwaj

jednocześnie). Możliwe są wtedy następujące sytuacje:

1. Z chwilą upadku A zaskoczony i nieprzygotowany taternik B zostaje automatycznie wyrwany ze stanowiska. Jest mało prawdopodobne, aby zachował nawet pozycję pionową. Zaczną zsuwać się w przepaść razem. W tym wypadku jedynym ratunkiem dla nich będzie tarcie liny o krawędź skały i tarcie taternika B o podłoże. Oczywiście, zakładając, że półka nie jest gładka ani oblodzona, gdyby tak było – obydwaj spadną.

2. Jeżeli taternik B utrzyma się na nogach i będzie mógł kontrolować sytuację, wtedy impet upadku zostanie przeniesiony na jego ciało (poprzez przyrząd asekuracyjny), zostanie on też złagodzony przez rozciągnięcie liny oraz tarcie liny o krawędź.

Przy prawidłowym przytomnym zachowaniu taternika B mogą wyjść z opresji cało, czyli jak w pkt. III.

Wojciech LEWANDOWSKI