Fizyk w deszczu na rowerze, czyli jak jechać, żeby nie zmoknąć?

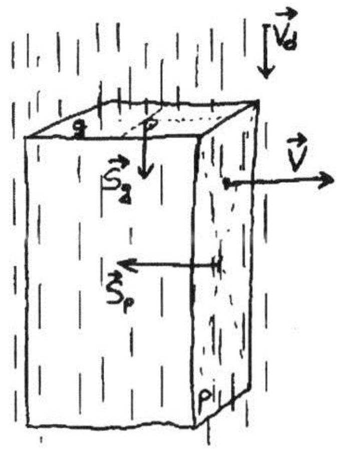
Wojciech Lewoczko
Student fizyki UJ

O czym myśli przeciętny człowiek, zaskoczony ulewą podczas przejażdżki rowerowej? Wyłączając nielicznych, którzy lubią deszcz, większość marzy, by jak najszybciej dostać się do domu. Okazuje się, że niechęć do deszczu, skutkująca chęcią natychmiastowej ucieczki, ma poparcie w prawach fizyki – można łatwo udowodnić, że im szybciej się poruszamy tym mniej zmokniemy. Wniosek nie jest bynajmniej oczywisty, jeżeli wziąć pod uwagę, że wraz z szybkością zwiększa się strumień, czyli masa wody na jednostkę czasu, przenikająca jednostkę moknącej powierzchni.

Jak łatwo się domyślić, inspiracją do teoretycznych rozważań była wspomniana we wstępie, jak najbardziej rzeczywista i „mokra” ulewa. Nie starałem się jednak zmuszać mokrej głowy do myślenia – raczej posłuchałem głosu natury i wytężyłem nogi do bardziej ożywionej pracy, żeby jak najszybciej znaleźć się pod dachem i „na sucho” odpowiedzieć sobie na pytanie, jak zależy przemoczenie od prędkości moknącego obiektu.

Rys. 1

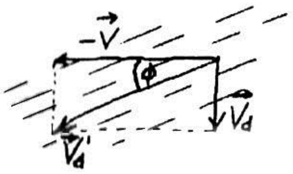
A więc do dzieła! Ciepła herbata, ołówek w garść i, jak to zwykle w fizyce bywa, zacznijmy od stworzenia prostego modelu symulującego rzeczywistość. Rysunek! Dobry rysunek to połowa sukcesu w rozwiązywaniu problemów fizycznych. Poproszę cię, Agnieszko, o coś stosownego (rys. 1). O, dziękuję. Bardzo wyrazisty (brrr...), ale chyba zbyt skomplikowany jak na potrzeby fizyki. Poproszę o coś prostszego.



Rys. 2. Moknący obiekt dla uproszczenia jest przedstawiony jako graniastosłup. Deszcz pada w kierunku prostopadłym do ziemi ($\vec{v}_d$), moknący obiekt porusza się w kierunku prostopadłym do jednej ze ścian bocznych ($\vec{v}$). Na deszcz narażone są dwie ściany – górna i przednia, które oznaczymy jako g i p. Wektory $\vec{S}_g$ i $\vec{S}_p$ są skierowane prostopadle do ścian g i p, zwrócone do wnętrza prostopadłościanu i mają wartość równą powierzchni tych ścian

Znacznie lepiej i prościej. Niech bryła z rys. 2 symbolizuje moknącego rowerzystę, którego będziemy dalej nazywać moknącym obiektem. Przyjmijmy następujące uproszczenia:

– moknący obiekt jest w stanie wchłonąć w siebie dowolną ilość wody, tzn. każda kropla deszczu wchodząca w kontakt z którąkolwiek ze ścian zostaje przez nią wchłonięta (czyli wykluczamy odbicie kropel od ścian). Założenie to jest dostatecznie dobrze spełnione przy „założeniu" wełnianego odzienia. W rzeczywistości istnieje, oczywiście, pewna skończona maksymalna ilość cieczy możliwa do wchłonięcia przez ubrania, przy której model się załamuje, tj. od pewnego momentu nie można już być bardziej mokrym i wszystko, nie wyłączając problemów fizycznych, po nas „spływa";
– obiekt moknący porusza się ze stałą prędkością $\vec{v}$ w kierunku prostopadłym do jednaj ze ścian bocznych, dzięki czemu tylko dwie ściany (przednia p i górna g) mają kontakt z kroplami deszczu;
– mimo opadów, pogoda jest bezwietrzna, tj. deszcz nie zacina i pada na ziemię pionowo ze stałą prędkością kropel $\vec{v}_d$. Dodatkowo gęstość przestrzenna rozmieszczenia kropel ρ jest stała na całym obszarze opadów.



$$v_d' \sin\phi = v_d$$

$$v_d' \cos\phi = v$$

Rys. 3. W układzie odniesienia, związanym z poruszającym się z prędkością $\vec{v}$ moknącym obiektem, deszcz nie pada pionowo, lecz ukośnie

Pamiętajmy, że z punktu widzenia obiektu moknącego, deszcz nie pada pionowo – w układzie odniesienia związanym z obiektem moknącym, poruszającym się z prędkością $\vec{v}$ względem ziemi, krople deszczu mają prędkość v_d' (rys. 3), daną przez transformacje Galileusza:

$$v_d' = \vec{v}_d - \vec{v} \tag{1}$$

Zdefiniujmy namakanie $N = m/t$ jako ilość (masę) wody wchłanianą na jednostkę czasu przez ściany moknącego obiektu (mierzone w kg/s). Zauważmy, że tak zdefiniowane namakanie możemy zapisać jako iloczyn gęstości deszczu ρ, szybkość kropel v_d', powierzchni ściany S i cosinusa kąta ϕ między wektorem prędkości a kierunkiem prostopadłym do moknącej ściany. Wyrażone przez iloczyn skalarny namakanie N przyjmie postać:

$$\begin{aligned} N &= \rho(\vec{v}_d' \cdot \vec{S}_g + \vec{v}_d' \cdot \vec{S}_p) = \\ &= \rho\left(\vec{v}_d' S_g \ \sin\phi + \vec{v}_d' \cdot S_p \cos\phi\right) \end{aligned} \tag{2}$$

Składniki sumy w równaniu (2) są przyczynkami do namakania, pochodzącymi od poszczególnych ścian. Korzystając ze związków trygonometrycznych podanych przy rys. 3, możemy zapisać namakanie jako:

$$N = \rho v_d S_g + \rho v S_p \tag{3}$$

Pierwszy człon w wyrażeniu (3) jest wielkością stałą, zadaną przez warunki meteorologiczne i powierzchnie górnej ściany obiektu moknącego. Drugi człon jest proporcjonalny do szybkości v obiektu moknącego. Zauważmy, że z wyrażenia (3) wynika, po pierwsze, co jest spostrzeżeniem banalnie oczywistym, że gdy szybkość równa jest zero ($v = 0$), namaka tylko górna ściana g; po drugie, namakanie rośnie wraz z szybkością v. Czyżby zatem szybka ucieczka przed deszczem nie popłacała?

Ależ nie! Załóżmy, że obiekt moknący dzieli od domu dystans *l*. Poruszając się ze stałą szybkością *v*, przebędzie go w czasie *t:*

$$t = \frac{l}{v} \tag{4}$$

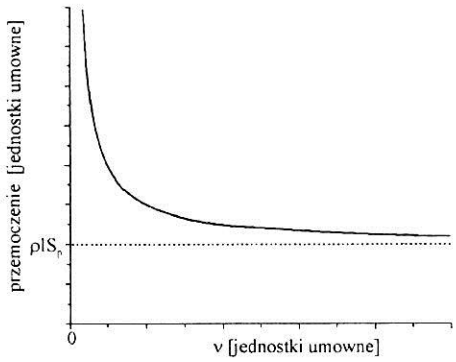
Przemoczeniem $\wp$ będziemy nazywać całkowitą ilość wody wchłoniętą przez obiekt moknący w czasie jego ruchu:

$$\wp = N t \tag{5}$$

Korzystając z (3) i (5) otrzymujemy:

$$\wp = \rho l S_g \frac{v_d}{v} + \rho l S_p \tag{6}$$

Zależność (6) przemoczenia $\wp$ od prędkości *v* przedstawia wykres na rys. 4. Jak widać, przemoczenie jest tym mniejsze, im większa prędkość, co tłumaczy intuicyjną, naturalną chęć jak naj szybszej ucieczki przed deszczem.



Rys. 4. Przemoczenie jest nieskończone, gdy obiekt moknący spoczywa. Minimalne prze1,Ir moczenie dla nieskończonej prędkości jest ilością wody deszczowej zawartej w graniastosłupie o wymiarach ściany przedniej *p* i długości *l* jaką ma do przebycia obiekt

Interesujące są przypadki dla dwóch granicznych szybkości: $v = 0$ i $v \to \infty$. W pierwszym, rzecz jasna, obiekt moknący spoczywa, a więc nigdy nie ucieknie przed deszczem, namakanie będzie trwało wiecznie (przynajmniej do rozpogodzenia, a przemoczenie będzie nieskończone. W drugim przypadku, przy nieskończonych szybkościach (lub co najmniej dużo większych od szybkości deszczu, na tyle, aby można było zaniedbać pierwszy człon w równaniu (6)) przemoczenie asymptotyczne zmierza do pewnej minimalnej wielkości $\rho l S_p$. Zauważmy, że $l S_p$

jest objętością graniastosłupa wyznaczonego przez powierzchnie S_p na drodze l. $\rho l S_p$ jest ilością (masą) wody zawartej w tym graniastosłupie. Jest to minimalna ilość wody, którą obiekt wchłonie w czasie ruchu. Przypadek nieskończonej szybkości v jest równoznaczny zerowej szybkości kropel deszczu. To tak jakby krople tworzyły zawieszoną w przestrzeni mgłę, a obiekt moknący „wycinał" w niej tunel o kształcie swojego przekroju poprzecznego.

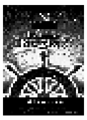
Aha! Nie ma więc ucieczki przed deszczem! Jakkolwiek szybko byśmy się nie poruszali, nigdy nie unikniemy pewnego minimalnego przemoczenia, którego wielkość zależy od rodzaju deszczu, odległości od domu i od naszej budowy fizycznej (szczupli mokną mniej!).

Hmmm… czas chyba sprawić sobie parasol.

Na koniec pragnę gorąco podziękować Agnieszce Winciorek za rysunek.

W następnym numerze *Fotonu*, a już teraz w Internecie, znajdą Państwo notatkę „Jak zadanie z deszczem ułatwia zrozumienie prawa Gaussa".

Z.G-M



FIZYKA W INTERNECIE

Więcej o Letniej Szkole dla Nauczycieli Fizyki Szkół Średnich w CERN-ie można znaleźć w Internecie pod adresem: http://teachers.web.ccrn,ch/teachers/.

Więcej o Dniach Otwartych Instytutu Fizyki UJ pod adresem: http://www.mat-fiz.uj.edu.pl/kronika.html.

Przypominamy, że *Physics Teacher* ma stronę internetową. Można tam znaleźć między innymi użyteczną stronę Web Sights http://www.aapt.org/tpt/.