Ćwiczenia nad tarciem w blokach i na równi pochyłej.

Wiadomo, że wyniki doświadczeń, mających wykazać prawa t. zw. mechaniki klasycznej u machin prostych, są niepewne w mniej lub więcej obszernych granicach z powodu nieuniknionego tarcia. Płynie stąd naturalny postulat, że należy umieć wyznaczyć owe tarcie, aby móc je wyrugować przy zestawianiu ilościowych wyników tych doświadczeń. Niezależnie od tego studjowanie tarcia ciekawe jest samo w sobie, a wreszcie w zastosowaniu do machin jest jeszcze użyteczne, gdyż pozwala wyznaczyć ich wydajność, t. j. stosunek zyskanej pracy użytecznej do pracy włożonej.

Opisane poniżej ćwiczenia mają zapoznać uczniów z tarciem, zachodzącym w typowych machinach prostych: bloku i równi pochyłej, zarówno w przypadku równowagi (tarcie statyczne) jak ruchu (tarcie kinetyczne).

A. ĆWICZENIA Z BLOKAMI.

Ćwiczenie I. Tarcie statyczne w bloku stałym.

Gdy przez blok stały przewiesimy sznurek, obciążony z obu stron równemi ciężarkami, to tarcie statyczne objawi się na obwodzie bloku tym, że obrót bloku będzie powstrzymany mimo że do jednego z ciężarków dodamy pewną dostatecznie małą nadwyżkę. Graniczna, największa wartość tej nadwyżki T, przy której zachodzi jeszcze równowaga, pozwala ocenić tarcie statyczne w bloku.

Rzeczywista wartość tarcia, działającego na powierzchni zetknięcia osi bloku z jej łożyskami, nie jest wprawdzie równa T; wobec tego, że T działa na obwodzie bloku, można tu mówić tylko o proporcjonalności. W praktyce jednak obchodzi nas właśnie siła T na obwodzie bloku.

Do ćwiczenia I potrzebny blok metalowy, chodzący gładko (bez zacinania się) w metalowych łożyskach (widełkach), które tak utwierdzamy, aby nadawały osi bloku położenie poziome; dalej sznurek jednostajnej grubości, bez sterczących włókien, zakończony z obu stron pętlicami; wreszcie garnitur ciężarków, opatrzonych z dwu stron haczykami do zawieszania. Ciężarki o masie mniejszej niż 1 gram można zrobić z drutu o średnicy około 1 mm., ważąc określoną długość jego, np. 1 metr, a następnie odcinając kawałki odpowiedniej długości. Kawałkom tym nadać można dogodną formę, skręcając je spiralnie i zaginając u obu końców w kształt haczyków.

Dokładność większa niż do 0,1 grama jest w tych ćwiczeniach trudna do osiągnięcia, a zresztą zbyteczna.

Ćwiczenie polega na wykonaniu szeregu pomiarów T przy zmiennym obciążeniu bloku np. przy obciążeniu 100 gr. (z obu stron po 50 gr.) dalej 200, 300 i t. d. Ciężarki, stanowiące nadwyżkę T, należy wieszać ostrożnie i lekko, aby przez szarpnięcie lub upuszczenie ciężarka nie burzyć przedwcześnie równowagi. Przy małych obciążeniach i związanych z niemi małych wartościach T, ciężaru sznurka nie można uważać za znikomo mały wobec T, to też tylko wtedy nie powoduje on błędów w ocenie tarcia, gdy części sznurka, zwisające po obu stronach bloku, są równej długości; należy więc przestrzegać tego przy ćwiczeniu.

Pomiar przy każdym obciążeniu poleca się wykonać kilkakrotnie, dając nadwyżkę naprzemian na oba końce sznurka i zmieniając orjentację bloku, która z powodu niedoskonałości symetrji, wpływać może na wartość tarcia; poczym wartość T oblicza się jako średnia ze wszystkich pomiarów.

Zestawiwszy tabelkę wartości obciążeń Q i odpowiednich T, winien uczeń przedstawić wynik pomiaru graficznie na papierze kratkowanym, przyczym wartości T, jako stosunkowo małe, dobrze jest wziąć w skali znacznie (np. 50 razy) większej niż wartości Q.

Jakkolwiek, ściśle biorąc, nadwyżka przyczynia się do obciążenia bloku, to jednak, ponieważ T jest małe wobec Q, popełniamy błąd nieznaczny, pomijając ją w wartości odmierzanych odcinków.

Szereg punktów djagramu, otrzymanych w ten sposób, trzyma się zupełnie wyraźnie kierunku pewnej prostej; małe zboczenia dają się wyjaśnić niedoskonałością symetrji bloku i nieuniknionemi błędami obserwacji. Prosta ta wszakże nie zmierza ku początkowi spółrzędnych, lecz przedłużona odcina na osi T dodatnią rzędną (AA' na rys. 1). Wskazuję to, że przy $Q=0$ tarcie jest większe od zera, co oczywiście pochodzi z ciężaru bloku wraz ze sznurkiem oraz z sił, budzących się przy odkształceniu sznurka. Związek między Q i T wyrazić więc można w postaci $T=\alpha Q+T_0$ gdzie $T_0=OA$ jest długością rzędnej dla $Q=0$.

Stałe T_0 i α (spółczynnik tarcia) można obliczyć, wstawiając w to równanie wartości Q i T, wzięte z dwu pomiarów i rozwiązując powstały w ten sposób układ dwu równań linjowych.

Ćwiczenie II. Tarcie kinetyczne w bloku.

Już przy poprzednim ćwiczeniu uczniowie dostrzegają, że ciężarek z nadwyżką, pociągnięty przypadkiem w dół, spada ruchem mniej lub więcej zmiennym. Możliwość ruchu przyspieszonego przy nadwyżce, która nie dosięgła jeszcze granicznej wartości T świadczy o tym, że tarcie w czasie ruchu jest mniejsze od statycznego.

Ćwiczenie II wymaga utwierdzenia bloku o ile można wysoko ponad stołem do ćwiczeń, tak jednak, aby go wygodnie ręką dosięgnąć można było. Sznurek winien być tak długi, aby wtedy, gdy jeden z ciężarków dotyka stołu, drugi, do którego dołączamy nadwyżkę, znajdował się tuż pod blokiem. W tych warunkach ruch spadającego ciężarka obserwować możemy na dostatecznie wielkiej przestrzeni.

Ćwiczenie polega na dobraniu takiej nadwyżki, przy której ruch, wywołany lekkim szarpnięciem ku dołowi, byłby możliwie dokładnie jednostajny. W tym wypadku nadwyżka równoważy tarcie, a zarazem może być uważana za jego miarę.

Ocena rodzaju ruchu odbywa się tu oczywiście tylko na oko, co wymaga pewnej wprawy w patrzeniu, dającej się osiągnąć przez częste powtarzanie doświadczenia; unikać jednak trzeba ruchu zbyt szybkiego.

Zaznaczyć należy, że gdybyśmy nawet rozporządzali blokiem, doskonale symetrycznym, to ruch ściśle jednostajny byłby z góry wykluczony z powodu ciężaru sznurka, który w ciągu ruchu coraz więcej przewiesza się na stronę nadwyżki. Przypuśćmy, że tarcie zostało dokładnie przez nadwyżkę zrównoważone; ruch ciężarka od góry do punktu N, dla którego części sznura po obu stronach bloku osiągają równą długość, odbywa się z przyśpieszeniem ujemnym; w punkcie N przyśpieszenie staje się $=0$ a od N na dół ma wciąż rosnącą wartość dodatnią. Jeżeli więc uda się zauważyć taką zmianę ruchu w pobliżu punktu N, znaczy to, że nadwyżka została trafnie dobrana. Wpływ ten asymetrji sznurka zanika wszakże przy większych obciążeniach bloka, zmiany ruchu będą bowiem tym mniejsze, im większa masa poruszana.

Drugą przyczyną zaburzenia jednostajności ruchu, występującą o wiele wybitniej niż pierwsza, jest asymetrją bloku i związana z nią zmienność tarcia przy różnej jego orjentacji. Przyczyna ta działa jednak okresowo, powtarzając się przy każdym obrocie. Rozporządzając więc wysokością spadku dość wielką w stosunku do obwodu bloku (np. 10 razy) i starając się nadać ciężarkom ruch niezbyt powolny, osiągamy tę korzyść, że oko, nie mogąc uchwycić szybkiej i okresowej zmienności ruchu, kompensuje ją niejako i dostrzega ruch średni jednostajny. Z użycia większych prędkości płynie jeszcze i ta korzyść, że zmiany prędkości, wywołane zmiennością tarcia, będą mniejsze. Oznaczając bowiem przez m masę układu ruchomego, przez v_1 jego prędkość przed, zaś v_2 po dokonaniu pewnej pracy przeciw tarciu L, mamy:

$$\frac{m}{2}(v_1^2 - v_2^2) = L,$$ skąd zmiana prędkości:

$$v_1 - v_2 = \frac{L}{m} : \frac{v_1 + v_2}{2}$$

t. j. odwrotnie proporcjonalna do prędkości średniej.

W razie gdy ocena zmienności ruchu „na oko" wydaje się trudna, można pomóc sobie w następujący sposób. Ustawia się tuż obok ciężarka z nadwyżką pionową listwę o długości, odpowiadającej drodze tego ciężarka, i oznacza na niej trzy kreski, jedną na poziomie punktu N, dwie zaś pozostałe powyżej (A), i poniżej (B) w równych od N odległościach, równych niemal połowie całej drogi, tak jednak aby kreska A znajdowała się o kilka cm. poniżej ciężarka. Puściwszy w ruch metronom tak, aby dawał po kilka uderzeń na sekundę, następnie zaś ciężarki na bloku i wymawiając „zero", gdy potrącony ciężarek przebiega obok kreski A, liczymy następne uderzenia pomiędzy położeniami A i N oraz między N i B. Gdy liczba uderzeń metronomu w odstępach tych okaże się równa, możemy uważać ruch za jednostajny z dostatecznym przybliżeniem. Fakt, że do zrównoważenia tarcia przy różnych prędkościach potrzeba tej samej nadwyżki, poucza, że tarcie kinetyczne nie zależy (przynajmniej w dość obszernych granicach) od prędkości ruchu.

Graficzne przedstawienie wyniku pomiarów odbywa się tak, jak przy ćwiczeniu pierwszym,—najlepiej na tym samym papierze; djagram tarcia kinetycznego przedstawi się jako prosta, której rzędne są odpowiednio niższe niż u poprzedniej (prosta BB' na rys. 1).

Obie proste mają punkt przecięcia C leżący na ujemnej stronie osi OQ. Wartości ujemne Q oznaczają ciężary, któreby trzeba odjąć od ciężaru bloku w celu stopniowego zmniejszania tarcia aż do zera.

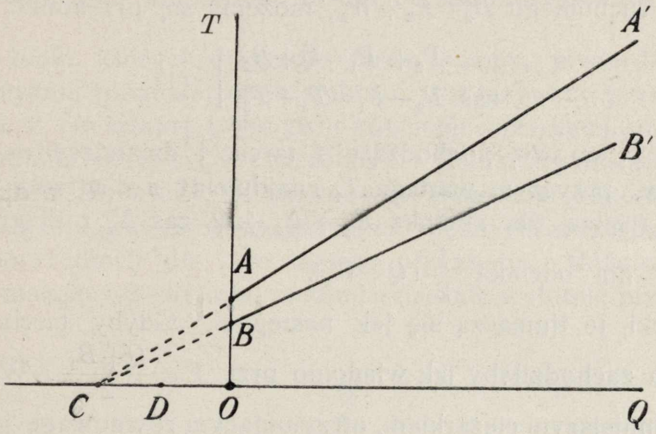

Fig. 1.

Odcinek ujemny OC okazuje się jednak większy niż OD, odpowiadający ciężarowi bloku bez widełek (który oznaczamy za pomocą wagi), zaczym rzędne obu prostych dla D są dodatnie. Pochodzi to stąd, że gdybyśmy mogli usunąć cały ciężar bloku (i sznura), pozostałyby jeszcze siły, działające przy odkształceniu sznura.

Ćwiczenie III. Tarcie w bloku ruchomym.

Do ćwiczenia tego potrzebne dwa bloki, których krążki dają się zdejmować z widełek, te zaś opatrzone są haczykami do zawieszania.

Oznaczamy najprzód z pomocą wagi ciężary krążka (K) i widełek (W) u każdego z bloków z osobna. Następnie wyznaczamy sposobem opisanym powyżej zależność tarcia od obciążenia w każdym z bloków i kreślimy odpowiednie djagramy dla obu rodzajów tarcia, lecz wliczamy do obciążeń ciężar krążka K, co w djagramie uwidoczni się przez przesunięcie początku spółrzędnych o odcinek, odpowiadający temu ciężarowi w stronę ujemną osi obciążeń.

Wreszcie z obu bloków tworzymy znany powszechnie układ bloku ruchomego ze stałym i, zawiesiwszy na haku u widełek ruchomego dowolny ciężar Q, wyznaczamy doświadczalnie ciężar najmniejszy P_1 i największy P_2, które, obciążając wolny koniec sznura, przełożonego przez blok stały, utrzymują równowagę (względnie ruch jednostajny, gdy chodzi o tarcie kinetyczne).

Oznaczywszy np. ciężar bloku stałego $B_1 = K_1 + W_1$ (krążek+widełki), zaś ruchomego $B_2 = K_2 + W_2$, możemy się przekonać, że:

$$\left.\begin{aligned} P_2 + P_1 &= Q + B_2 \\ \text{zaś } P_2 - P_1 &= T_1 + T_2 \end{aligned}\right\} \quad (1).$$

gdzie T_1 i T_2 są siły, pochodzące z tarcia i działające na obwodach obu bloków, przyczym wartość T_1 znajdujemy z djagramu bloku stałego jako rzędną dla odcinka $K_1 + B_2 + Q$, zaś T_2 z djagramu bloku ruchomego dla odcinka $\frac{1}{2}(Q + W_2)$.

Związki te tłumaczą się jak następuje. Gdyby tarcia nie było, równowaga zachodziłaby jak wiadomo przy $P = \frac{Q + B_2}{2}$. Wobec tarcia jednak najmniejszym ciężarkiem, utrzymującym równowagę jest ten, który łącznie z tarciem w obu blokach tworzy siłę $\frac{Q + B_2}{2}$; największym natomiast ten, który wyrównywa tę siłę, powiększoną o tarcie. Mamy więc:

$$P_1 + T_1 + T_2 = \frac{Q + B_2}{2}$$

$$P_2 = \frac{Q + B_2}{2} + T_1 + T_2\,;$$

stąd otrzymujemy związki poprzednie.

Związki te jednak są tylko przybliżone, gdyż nie uwzględniono tu okoliczności, że wartość T_1 nie jest w obu równaniach ściśle ta sama z powodu różnego obciążenia bloku stałego ciężarkami P_1 i P_2. Wzory, uwzględniające tę okoliczność, byłyby następujące

$$\left.\begin{aligned} P_2 &= \frac{\frac{1}{2}(1+\alpha_1)[Q(1+\alpha_2) + B_2 + \alpha_2 W_2] + \alpha_1 K_1}{1 - \alpha_1} \\ P_1 &= \frac{\frac{1}{2}(1-\alpha_1)[Q(1-\alpha_2) + B_2 - \alpha_2 W_2] - \alpha_1 K_1}{1 + \alpha_1} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

gdzie α_1 i α_2 są to spółczynniki tarcia obu bloków t. j. styczne kierunkowe ich djagramów. We wzorach tych pominięto zarówno ciężar sznurka, jak siłę do odkształcenia jego potrzebną; siły te wszakże przy dość cienkim sznurku można pominąć. Używając do obliczenia P_1 i P_2 równań (1) zamiast (2) popełniamy błąd nieznaczny (rzędu α^2), to też gdy chodzi np. o demonstrowanie prawa równowagi na bloku ruchomym, wystarczy oprzeć się na związkach (1).

Ćwiczenie IV. Zależność tarcia od ukształtowania sznura.

Dwa bloki, których djagramy tarcia znamy, utwierdzamy w jednej płaszczyźnie pionowej obok siebie i, przełożywszy przez oba sznur, jak na rys. 2, obciążamy z obu stron równemi ciężarkami, poczym wykonywamy pomiar tarcia jak w ćwiczeniu I i II oraz wyznaczamy jego djagram. Okazuje się wtedy, że rzędna tego djagramu, odpowiadająca danemu obciążeniu, jest mniejsza niż suma rzędnych, zaczerpniętych z djagramów poprzednich dla tego samego obciążenia. Różnica zanika dla obciążeń, malejących do zera; natomiast rośnie wybitnie przy większych

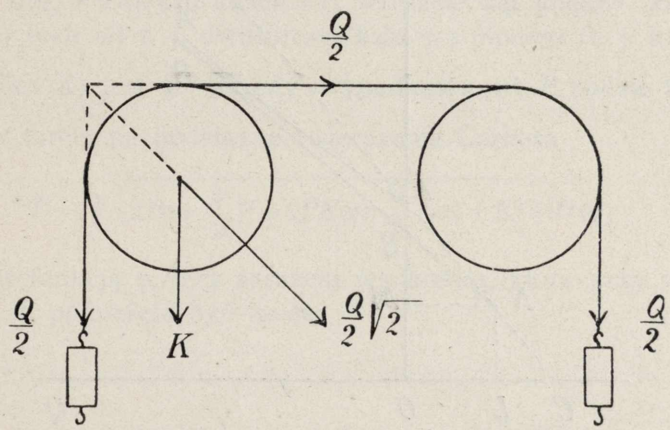

Fig. 2.

obciążeniach, lecz tak, że djagram okazuje się linją nieznacznie zakrzywioną.

Przyczyną tego jest odmienne ukształtowanie sznura, niż w ćwiczeniu I i II. Gdy tam bowiem obciążone jego części biegły równolegle do siebie, tutaj tworzą przy każdym z bloków kąt prosty. Gdy więc tam wypadkowa ciężarów działających na blok była równa ich sumie, tutaj wedle zasady równoległoboku sił musi być mniejsza. Dla wyjaśnienia tego djagramu wystarczy, gdy ograniczymy rozważanie do jednego z bloków.

Oznaczmy przez Q sumę obciążeń na obu końcach sznura; wówczas ciężarek z jednej strony wynosi $\frac{Q}{2}$ i tyleż wynosi ciągnienie wywarte na sznur zarówno na jego końcach, jak pomiędzy blokami. Siły, działające na oś bloku są: 1) stały ciężar krążka bloku K w kierunku pionowym, 2) wypadkowa dwu sił równych $\frac{Q}{2}$, tworzących kąt prosty, która wynosi $\frac{Q}{2}\sqrt{2}$ i tworzy z pionem kąt 45^0. Ostatecznie działa więc na oś bloku wypadkowa dwu sił K i $\frac{Q}{2}\sqrt{2}$, tworzących kąt 45^0. Ponieważ wypadkowy 2 wektorów, nachylonych do siebie pod kątem, różnym od 0 i 180^0, z których jeden jest stały a drugi zmienny (obciążenie Q), nie jest linjową funkcją zmiennego, tedy i tarcie, proporcjonalne do omawianej

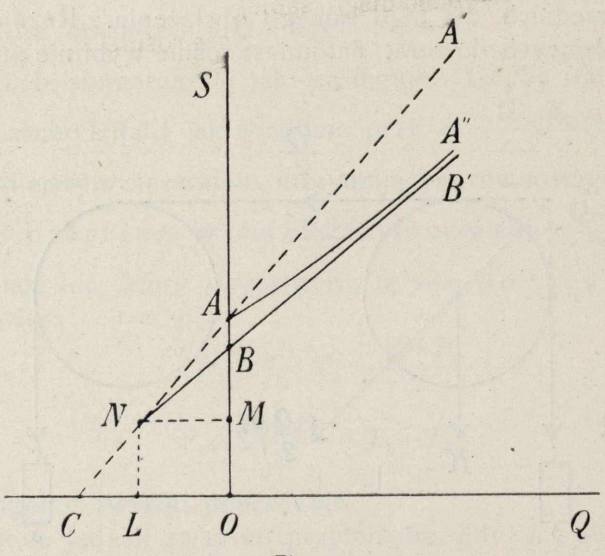

Fig. 3.

wypadkowej nie może być funkcją linjową obciążeń. Odkształcenie sznurka nie ma wpływu na kształt djagramu, zwiększa tylko nieco o stały przyrost wszystkie rzędne. Oznaczając siły te przez D, mamy dla $Q=0$ rzędną $T_0=\alpha_1 K+D$. Tę można wyznaczyć doświadczalnie z dostatecznym przybliżeniem, biorąc o ile można małe Q. Znając zaś K i α, możemy obliczyć D. W miarę jak Q rośnie, kierunek wypadkowej zbliża się coraz więcej do kierunku dwusiecznej kąta prostego, a wartość jej do $\frac{(Q+K)\sqrt{2}}{2}$, zaczym rzędne djagramu stają się coraz bliższe wartości:

$$T=\alpha(K+Q)\frac{\sqrt{2}}{2}+D=\frac{\alpha\sqrt{2}}{2}.Q+\left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{2}K+D\right)$$

czyli djagram zbliża się asymptotycznie do prostej, wyrażonej tym równaniem.

Wyjaśnia to rys. 3. Tutaj CAA' jest djagramem bloku dla obciążeń, jak w ćwiczeniu I i II, AA'' — djagramem, otrzymanym obecnie. Wykreślić go możemy w przybliżeniu odcinając $OL=K$, $OM=D$; odcinki te wyznaczają punkt N. Kreślimy dalej $MA=\alpha K$. i $MB=\alpha K.\frac{\sqrt{2}}{2}$ (t. j. bok kwadratu, którego przekątnia$=MA$); wreszcie prostą NBB', która jest asymptotą djagramu AA''. Rzędna tegoż w punkcie O — jest $OA=OM+MA=D+\alpha K$, rzędna zaś asymptoty $OB=OM+MB=D+\frac{\alpha K\sqrt{2}}{2}$, wreszcie styczna kierunkowa tej ostatniej jest $\frac{MB}{NM}=\frac{\alpha K.\sqrt{2}}{2}$ jak powyżej.

Chcąc uzyskać wzór ściślejszy i ogólniejszy na tarcie w bloku, załóżmy, że części sznura, obejmujące blok, tworzą dowolny kąt φ i działają na nie siły, z których każda$=P$, wreszcie kąt między kierunkiem wypadkowej tych sił t. j. dwusieczną kąta φ a pionem (t. j. kierunkiem ciężaru krążka K) jest ψ. Wtedy wypadkowa sił P będzie $2P.\cos\frac{\varphi}{2}$, zaś wzór na tarcie na podstawie twierdzenia Carnota

$$T=\alpha\sqrt{(2P\cos\frac{\varphi}{2})^2+4PK\cos\frac{\varphi}{2}\cos\psi+K^2}+D(\varphi)$$

gdzie D jest funkcją φ, lecz zarazem wielkością, która przy większych wartościach P pominięta być może.

B. ĆWICZENIA Z RÓWNIĄ POCHYŁĄ.

Ćwiczenia te służą do znalezienia z pomocą kilku metod spółczynników tarcia w wózku, staczającym się po równi pochyłej. Równię stanowią tu szyny metalowe, dające się ustawić w dowolnym nachyleniu do podstawy z pomocą pionowych sztabek, które dolnemi końcami opierają się o podstawę i opatrzone są przesuwalnemi nasadami, służącemi do podparcia szyn z jednej strony w dowolnej wysokości. Podstawę należy ustawić poziomo z pomocą libeli, zaś sztabki podpierające pionowo z pomocą pionu. Na sztabkach winna znajdować się podziałka milimetrowa, służąca do oznaczenia wysokości równi.

Ćwiczenie I. „Kąt graniczny".

Ćwiczenie polega na znalezieniu największego kąta ε równi z poziomem, przy którym wózek utrzymuje się jeszcze w równowadze na szynach. Spółczynnik tarcia statycznego β wyniesie jak wiadomo $tg\varepsilon$, lub gdy zmierzymy wysokość w i odpowiednią podstawę p równi $\beta = \frac{w}{p}$.

Podobnie znajdujemy spółczynnik tarcia kinetycznego, szukając nachylenia, przy którym wózek, potrącony lekko, stacza się po szynach w dół ruchem jednostajnym. Przy ocenie jednostajności ruchu można użyć, jak w ćwiczeniu II z blokiem, podziału drogi na 2 równe części i metronomu. Zmieniając obciążenie wózka, badamy, czy wpływa ona na wartość obu spółczynników.

Ćwiczenie II. Tarcie w wózku na szynach poziomych.

Wózek o znanym ciężarze Q porusza się tu na szynach, ustawionych poziomo. Sznurek, przyczepiony do wózka, przekłada się przez blok tak, aby biegł do szyn równolegle. Obciążając stopniowo coraz więcej wolny koniec sznurka, znajdujemy graniczny ciężar P, przy którym wózek utrzymuje się jeszcze w równowadze na szynach. Wyznaczamy tarcie w bloku T_b z djagramu, otrzymanego w ćwiczeniu IV (sznur na bloku tworzy tu kąt prosty) dla obciążenia P, przyczym można przyjąć, że rzędna djagramu dla jednego bloku przy obciążeniu jednostronnym P, równa jest rzędnej djagramu dla 2 bloków przy obciążeniu jednostronnym $\frac{P}{2}$, czyli obustronnym P. Wtedy tarcie w wózku T_w wyniesie: $P - T_b$ zaś spółczynnik $\beta = \frac{P - T_b}{Q}$.

Tarcie kinetyczne wyznaczamy podobnie jak poprzednio przez dobór takiego ciężarka, przy którym zachodzi ruch jednostajny wózka.

Ćwiczenie III. Tarcie przy dowolnym nachyleniu szyn.

Szyny ustawiamy pod kątem dowolnym do poziomu, a wózek, oparty na nich, równoważymy ciężarkiem z pomocą bloku i sznurka, który biec musi równolegle do równi. Ciężar, równoważący wózek, waha się w pewnych granicach z powodu tarcia w wózku T_w i bloku T_b.

Gdy P_1 i P_2 są skrajnemi wartościami tego ciężaru, w wysokością a d odpowiednią dlugością równi pochyłej, mamy:

$$P_1 = \frac{Qw}{d} - T_w - T_b \ldots\ldots 1)$$

$$P_2 = \frac{Qw}{d} + T_w + T_b' \ldots\ldots 2)$$

T_b i T_b' są różne z powodu różnicy między obciążeniami bloku P_1 i P_2 w obu razach. Zmierzywszy kąt φ między równią pochyłą a pionem, obliczamy T_b i T_b' z pomocą wzoru:

$$T_b = \alpha \sqrt{(2P\cos\frac{\varphi}{2})^2 + 4PK\cos\frac{\varphi}{2}\cos\psi + K^2}$$

który ze względu na zachodzący tu związek $\psi = \frac{\varphi}{2}$ przybiera prostszą postać

$$T_b = \alpha \sqrt{4P(P+K)\cos^2\frac{\varphi}{2} + K^2}\,,$$

zaczym przez odjęcie równania 1) od 2) otrzymujemy

$$T_w = \tfrac{1}{2}[P_2 - P_1 - (T_b' - T_b)]\,,$$

zaś β otrzymujemy jako stosunek tej siły do składowej ciężkości, prostopadłej do płaszczyzny: $Q\frac{p}{d}$, mianowicie

$$\beta = \frac{[P_2 - P_1 - (T_b' - T_b)].d}{2Q.p.}$$

Pomiar tarcia kinetycznego polega tu znów, jak poprzednio, na wyznaczeniu skrajnych wartości P, przy których wózek biegnie ruchem jednostajnym do góry, względnie ku dołowi. Pomiary obu rodzajów tarcia wykonywa się przy zmiennym nachyleniu równi jakoteż zmiennym obciążeniu wózka, poczym wartości β oblicza się jako średnie z tych pomiarów.

Nawiasem dodam, że pomiar P_1 i P_2 zużytkować można do demonstrowania prawa równowagi na równi pochyłej, tymbardziej że różnicę $T_b' - T_b$, której obliczenie zajęłoby zbyt wiele czasu na lekcji, można wybornie pominąć, popełniając błąd nieznaczny. Istotnie, dodając równania 1) i 2) do siebie i przyjmując $T_b' - T_b = O$ otrzymujemy:

$$\frac{Qw}{d} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

t. j. że wartość siły, równoległej po płaszczyzny, jaka byłaby potrzebna do utrzymania równowagi ciała spoczywającego bez tarcia, obliczona z pomiaru Q, w i d, równa jest średniej arytmetycznej obu skrajnych wartości tej siły, znalezionych doświadczalnie.

Ćwiczenie IV. Wpływ tarcia na ruch wózka.

Tarcie kinetyczne wykryć możemy wreszcie przez wyznaczenie wpływu, jaki ono wywiera na ruch przyśpieszony wózka, staczającego się swobodnie po szynach dowolnie nachylonych. Znając mianowicie czas t, w którym wózek przebiega określoną drogę d przy określonej wysokości w, stosujemy rozumowanie następujące. Gdyby nie było tarcia, wózek przebiegłby w tym samym czasie i przy tym samym nachyleniu drogę dłuższą $d_0 = \frac{1}{2} g . \frac{w}{d} t^2$ (gdzie g jest przyspieszenie siły ciężkości), co obliczamy znając w, d i t. Strata na drodze $d_0 - d$, wywołana tarciem, jest w takim stosunku do d_0, w jakim tarcie T, hamujące ruch wózka, do składowej siły ciężkości, powodującej ruch na równi, t. j. do $Q \frac{w}{d}$.

Będzie więc:

$$T_w : Q \frac{w}{d} = (d_0 - d) : d_0 ,$$

skąd

$$T_w = \frac{Q \cdot w(d_0 - d)}{d_0 . d} ,$$

zaś spółczynnik

$$\beta = \frac{T_w}{Q \frac{p}{d}} = \frac{w(d_0 - d)}{d_0 . p} ,$$

gdzie p, jak poprzednio, jest podstawą równi. Pomiaru czasu dokonywamy tu z pomocą metronomu, tak nastawionego, aby wybijał po kilka uderzeń na sekundę. Oczywiście unikać musimy znaczniejszych nachyleń równi, gdyż czas spadku byłby za krótki i nie dałby się dokładniej wyznaczyć. Na dolnym końcu szyn ustawiamy zaporę, na której wózek się zatrzymuje. Metronom należy tak uregulować, aby uderzenie jego zeszło się z odgłosem uderzenia wózka o zaporę. Gdy zestawiamy wyniki pomiaru β, otrzymane w tym ćwiczeniu, z wartościami, otrzymanemi poprzednio, okazuje się tu β wogóle za wielkie, lecz przytym zależne od ciężaru wózka Q w ten sposób, że przy wzrastającym Q, β malejąc zbliża się do granicy, zgodnej z wartością, znaną z poprzednich ćwiczeń. Różnica ta tłumaczy się błędem, który popełniamy w obliczeniu, pomijając okoliczność, że koła wózka prócz ruchu postępowego wraz z wózkiem odbywają ruch obrotowy. Ruch ten pochłania pewną część energji staczającego się wózka, wskutek czego prędkość ruchu postępowego jest mniejsza, a więc czas t, a zarazem różnica $d_0 - d$ większa. Wpływ błędu tego zanika wszakże, w miarę jak masa wózka wraz z obciążeniem staje się dostatecznie wielka w stosunku do masy kółek. Djagram β zbliża się asymptotycznie do wartości, znalezionych w ćwiczeniach poprzednich.

Józef Miczyński.

Nowy Sącz.