

XXXI OLIMPIADA FIZYCZNA (1981/1982). Stopień wstępny, zad. doświadczalne – D1**Źródło:** Komitet Główny Olimpiady Fizycznej;Andrzej Kotlicki, Andrzej Nadolny: *Fizyka w Szkole* nr 2, 1982;Andrzej Nadolny, Krystyna Pniewska: *Olimpiada Fizyczne XXIX – XXXI*. WSiP, Warszawa 1986, str. 43, 157 – 160.**Nazwa zadania:** Wyznaczanie współczynnika statycznego tarcia potoczystego stali o szkło¹**Działy:** Mechanika, dynamika.**Słowa kluczowe:** tarcie statyczne, kinetyczne, potoczyste, poślizgowe, współczynnik, prędkość liniowa, kątowna, ruch postępowy, obrotowy, siła, moment siły, II zasada dynamiki Newtona, moment bezwładności, kulka, równia pochyła, toczenie, staczanie się**Zadanie (4, podpunkt A) doświadczalne – D1, stopień wstępny, XXXI OF**

Wyznacz dowolną metodą współczynnik statycznego tarcia potoczystego stali o szkło. Opisz wybraną metodę i uzasadnij swój wybór. Oszacuj niepewność pomiarową otrzymanego wyniku.

Rozwiązanie**Część teoretyczna**

Najprostszą nasuwającą się metodą wyznaczenia współczynnika statycznego tarcia tocznego jest umieszczenie kulki stalowej na płaskiej tafli szklanej i znalezienie kąta pochylenia tej tafli (równi pochyłej), przy którym kulka zaczyna się staczać.

Przy założeniu $\frac{k}{r} < f$ (k – współczynnik tarcia tocznego, f – współczynnik tarcia posuwistego) kula zaczyna się staczać po przekroczeniu kąta granicznego, określonego równaniem

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{gr}} = \frac{k}{r} \quad (1)$$

Ponieważ kąt α_{gr} jest kątem, przy którym zaczyna się staczanie kuli pierwotnie spoczywającej na równi, określony na podstawie powyższego równania współczynnik k jest współczynnikiem statycznego tarcia tocznego (o który nam właśnie chodzi).

W doświadczeniu należy jedynie odpowiednio powoli (kwazistatycznie) zwiększać kąt α nachylenia równi. Można na przykład tafelę szklaną umieścić na dwóch podporach, których wysokość można regulować śrubami (rys. 1). Po wypoziomowaniu za pomocą poziomicy umieszczamy na niej kulki stalowe (z łożysk tocznych) – najlepiej o różnych średnicach. Następnie za pomocą śrub regulacyjnych stopniowo pochylamy tafelę szkła tak, by zaobserwować początek staczania się poszczególnych kulek. Tangens kąta α_{gr} wyznaczamy na podstawie znajomości skoku śruby i jej obrotów oraz odległości l (rys. 1).

¹ Porównaj zadania o podobnej tematyce z olimpiad: XX OF, st. II – zad. T1: *Ruch kulki na równi bez poślizgu*; XXI OF, st. I – zad. T3: *Prędkość kulki staczającej się z równi pochyłej*; XXII OF, st. II – zad. D: *Wyznaczanie współczynnika tarcia kulki stalowej o szkło*; VI MOF, – zad. T1: *Ruch walców staczających się z równi*; XXIV OF, st. II – zad. D2 (dodatkowe): *Wyznaczanie współczynnika tarcia posuwistego rurki o równię*; XXVII OF, st. I – zad. T1: *Ruch kulki na równi z uwzględnieniem tarcia potoczystego i posuwistego*; XXVII OF, st. III – zad. T2: *Opis ruchu kulki z uwzględnieniem tarcia posuwistego i potoczystego*; XXX OF, st. I – zad. T4: *Analiza ruchu z równi kulki z tarciem tocznym*.

Aby uniknąć niedokładności poziomowania możemy pochylić taflę kolejno w obie strony i posługiwać się średnią wartością $\operatorname{tg} \alpha_{\text{gr}}$. Bardzo ważne, aby tafla była ze szkła dobrej jakości, bez skazy i możliwie grubego (uginanie się). Powierzchnia zarówno szkła, jak i kulek musi być starannie oczyszczona i odtłuszczona.



Rys. 1

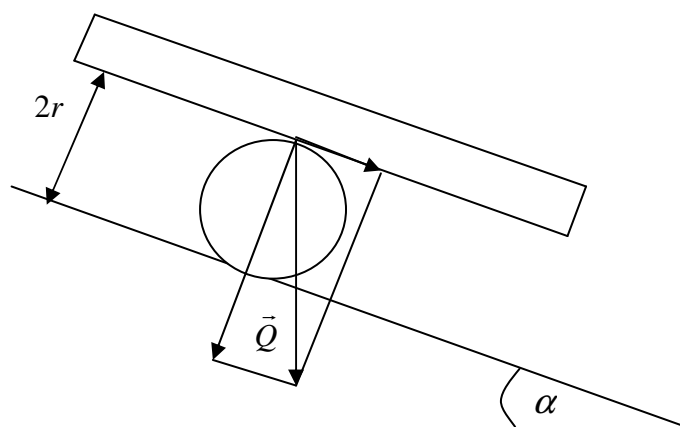
Zgodnie ze wzorem (1) powinno się zaobserwować zależność kąta α_{gr} od promienia kulek. W przykładowym doświadczeniu, w którym stosowano kulki łożyskowe o średnicy od 3 mm do 14 mm, nie udało się takiej prawidłowości wyraźnie zaobserwować wobec dużego przypadkowego rozrzutu wyników, spowodowanego przede wszystkim nierównościami tafli szkła (kulki po umieszczeniu na tafli często staczały się do lokalnego dołka). Wartość poszukiwanego współczynnika tarcia tocznego dało się oszacować jedynie co do rzędu wielkości: $k = (10^{-3} \pm 10^{-2})$ cm.

Uczynione założenie $k/r < f$ zostało w każdym razie zweryfikowane, albowiem ruch kulek od chwili ruszenia był wyraźnie toczny.

Mankament powyższej – najprostszej metody można częściowo wyeliminować, stosując trzy kule o jednakowej średnicy umieszczone na równi pochyłej w pewnych (dużych w stosunku do r) odległościach od siebie i kładąc na nich płaską płytę z tego samego, co równia, materiału (taflę szklaną). W tym przypadku każda kula styka się z dwiema równoległymi płaszczyznami, a działający na nią moment tarcia tocznego M jest momentem powstałym na styku kuli z jedną płaszczyzną. Jeżeli przyjąć, że ciężar kuli jest zaniedbywalny w porównaniu z siłą naciśku (dokładnie – z częścią ciężaru płyty obciążającą daną kulę), możemy napisać

$$M' = 2M \leq 2kQ \cos \alpha \quad (2)$$

gdzie Q jest siłą oddziaływania płyty na kulę (patrz rys. 2).



Rys. 2

Z drugiej strony moment siły, z jakim płyta działa na kulę, jest równy co do wartości

$$M'' = 2rQ \sin \alpha \quad (3)$$

i przeciwnie zwrócony, aniżeli M' .

W warunkach równowagi (spoczynku) zachodzi

$$M' = M'' \quad (4)$$

z czego, po uwzględnieniu wzorów (2) i (3) wynika, że

$$\frac{k}{r} \geq \operatorname{tg} \alpha \quad (5)$$

na kąt graniczny α_{gr} otrzymujemy więc i w tym wariancie doświadczenia wzór (1).

Wyższość tej metody w stosunku do poprzedniej polega na tym, że występuje w niej jednocześnie sześć punktów styku kuli z płaszczyzną, zatem obserwowany efekt jest wynikiem łącznego – uśrednionego działania tych sześciu obszarów oddziaływania kuli z płaską powierzchnią. Przy tym, jeśli nawet kuli na dolnej płycie zajmują miejsca w lokalnych dołkach, to ich punkty styku z górną płytą wypadają bardziej przypadkowo. W ten sposób eliminuje się w dużym stopniu wpływ nierówności płyty na wynik pomiaru. Drugim czynnikiem, którego rola w drugiej metodzie zostaje znacznie zredukowana, jest wpływ zanieczyszczenia oddziałujących z sobą powierzchni. Jeśli powierzchnie te nie są dokładnie oczyszczone, może występować zjawisko lepienia się kulek do tafli., które utrudnia start swobodnej, lekkiej kulki na tafli przy jej pochyleniu. Gdy na kulkę ze strony górnej tafli działa siła znacznie przewyższająca jej ciężar, efekty tego lepienia się odgrywają znacznie mniejszą rolę.

Część doświadczalna

Doświadczenie potwierdziło powyższe rozważania. W drugiej metodzie uzyskiwano wyniki znacznie bardziej powtarzalne: rozrzut wyników dla danego kompletu kulek nie przewyższał czynnika 2. wyznaczone tą metodą wartości współczynnika tarcia tocznego dla różnych kompletów kulek zawierają się w granicach $(0,1 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ cm. Znacznie niższe od uzyskanych poprzednią metodą wartości mogą świadczyć, że zjawisko „lepienia się” kulek do podłoża odgrywało w pierwszej metodzie istotną rolę.