

# Badamy ciała niesztwyne w ruchu obrotowym

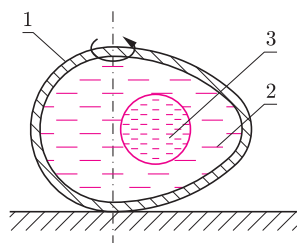
## Część I: Ciecze o małych lepkościach



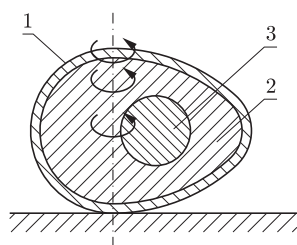
Stanisław BEDNAREK

W poprzednich odcinkach tego kącika zajmowaliśmy się badaniem ruchu obrotowego bryły sztywnej. Po przeprowadzonych doświadczeniach można postawić wynikające w naturalny sposób pytanie, jak będą zachowywać się w ruchu obrotowym ciała niesztwyne, np. ciecze lub proszki? W dzisiejszych doświadczeniach poświęcimy nieco uwagi niektórym aspektom ruchu obrotowego cieczy o małych lepkościach, a później zajmiemy się cieczami o dużych lepkościach i proszkami.

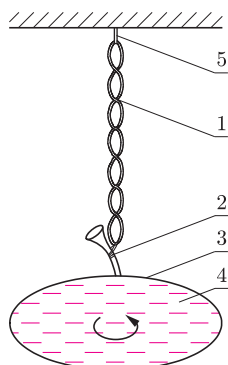
Do dzisiejszych doświadczeń potrzebne będą: dwa surowe jajka, balonik, woda, olej, denaturat, mąka, nitka, gumka aptekarska, szklana butelka z zakrętką, silikon do uszczelnień, trzy plastikowe butelki od napojów o pojemności 1,5 l, w tym jedna z zakrętką, kawałek rurki do nasunięcia na szyjki tych butelek, naturalny lub gumowy korek, pozwalający zamknąć plastikową butelkę, garnek oraz dostęp do gładkiej powierzchni stołu oraz kuchni gazowej lub lodówki z zamrażalnikiem.



Rys. 1. Ruch surowego jajka;  
1 – skorupka, 2 – białko, 3 – żółtko.



Rys. 2. Ruch ugotowanego jajka;  
oznaczenia takie same jak na rysunku 1.

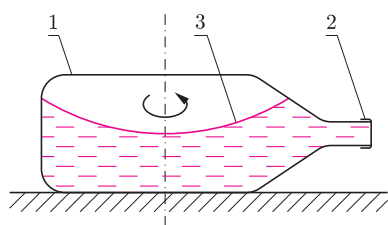


Rys. 3. Obracający się balonik;  
1 – gumka aptekarska, 2 – nitka,  
3 – balonik, 4 – woda, 5 – haczyk.

Do pierwszego doświadczenia wykorzystamy dwa jajka. Jedno surowe jajko kładziemy na gładkiej powierzchni stołu i próbujemy wprowadzić w ruch obrotowy przez pokręcenie palcami (rys. 1). Zauważamy, że jajko nie chce się łatwo obracać – zatrzymuje się zaraz po zakręceniu. Co jest przyczyną zaobserwowanego faktu? Jak wiadomo, wewnątrz surowego jajka znajduje się płynne białko, w którym pływa również płynne żółtko otoczone cienką błoną. Białko może oddziaływać ze skorupką jedynie za pośrednictwem sił lepkości cieczy, które nie są zbyt duże. Pokręcając jajko, chwytny za skorupkę i praktycznie tylko ją wprowadzamy w ruch obrotowy. Płynne wnętrze jajka pozostaje nieruchome i siły lepkości, czyli tarcia wewnętrznego, szybko wyhamowują lekką skorupkę, w której zgromadzona jest niewielka energia kinetyczna ruchu obrotowego. Do wyhamowania jajka przyczyniają się ponadto opór powietrza i tarcie o stół.

Drugie jajko włóżmy do garnka z wodą i ugotujmy na twardo, czyli przez około 10 min. Po wyjęciu i ostudzeniu jajka spróbujmy wprowadzić je w ruch obrotowy tak samo, jak jajko surowe (rys. 2). Okazuje się, że ugotowane jajko obraca się bez większego trudu przez kilkadziesiąt sekund. W tym przypadku w ruch obrotowy wprowadziliśmy masę całego jajka. Nie jest ono wyhamowywane od wewnątrz i ma wielokrotnie większą energię kinetyczną, pozwalającą znacznie dłużej wykonywać ruch. Ugotowane i surowe jajko o takiej samej wielkości mogą nam posłużyć do efektownej sztuczki, zadziwiającej kolegów lub znajomych. Wprowadzamy je jednocześnie w taki sam sposób w ruch obrotowy. Dwa identycznie wyglądające jajka zachowują się zupełnie inaczej. Zamiast gotować jajko, możemy włożyć je na kilka godzin do zamrażalnika lodówki, co spowoduje skrzepnięcie jego płynnej zawartości. Efekt będzie taki sam.

Żeby przeprowadzić drugie doświadczenie, do balonika nalewamy wody, aby przyjął on kształt zbliżony do kuli o średnicy około 6 cm. Kształt ten zależy od ilości wlanej wody i sprężystości balonika. Wlot balonika szczelnie zawiązujemy nitką i przywiązujemy do niego gumkę aptekarską (rys. 3). Chwytny za przeciwległy koniec gumki, pozwalając balonikowi swobodnie zwisać. Gumkę możemy zawiesić na jakimś haczyku lub trzymać. Drugą ręką obejmujemy balonik i kilkadziesiąt razy skręcamy gumkę, gromadząc w niej przez to energię potencjalną sprężystości. Pozwalamy balonikowi ze skręconą gumką nadal zwisać nieruchomo, podtrzymując go lekko od dołu palcami. Widzimy, że balonik ma kształt prawie kulisty. Następnie przestajemy podtrzymywać balonik. Gumka zaczyna się rozkręcać, a jej energia potencjalna sprężystości zamienia się na energię kinetyczną ruchu obrotowego całego układu. Zwróćmy uwagę, co dzieje się z balonikiem.



Rys. 4. Woda w obracającej się butelce;  
1 – butelka szklana, 2 – zakrętka,  
3 – powierzchnia wody.



(a)



(b)

Fot. 1. Przyrządy do badania kształtu powierzchni wody w ruchu obrotowym, zamkniętej w naczyniu: (a) cylindrycznym, (b) kulistym. Oba przyrządy znajdują się w Ogrodzie Doświadczeń im. Stanisława Lema w Krakowie.

Wraz ze wzrostem szybkości obrotów balonik zmienia swój kształt z kulistego na coraz bardziej zbliżony do dysku. Przyczyną tego efektu są siły odśrodkowe, działające na zawartą w baloniku wodę oraz jego powłokę. Siły te zwrócone są na zewnątrz wzdłuż promieni, a ich wartości rosną proporcjonalnie do kwadratu prędkości. Pod działaniem tych sił balonik jest rozciągany i ulega spłaszczeniu. Wiemy zapewne, że również Ziemia i niektóre ciała niebieskie mają lekko spłaszczony kształt. Jest to spowodowane tym, że są one nieszttywne i wykonują ruch obrotowy, dla przykładu, wewnątrz Ziemi znajdują się stopione skały, a jej skorupa może się odkształcać.

W trzecim doświadczeniu wykorzystamy butelkę szklaną, do której nalewamy wody, żeby wypełnić nią około 0,7 objętości. Butelkę szczelnie zamykamy zakrętką i kładziemy na gładkiej powierzchni stołu, rysunek 4. Jaki kształt ma powierzchnia wody w butelce? Następnie leżącą butelkę chwytamy palcami w połowie jej długości i wprawiamy w ruch obrotowy wokół osi pionowej. Butelka obraca się przez kilkadziesiąt sekund. Jaki kształt przyjmuje powierzchnia wody podczas obrotu? Widzimy, że jest ona wtedy wklęsła. Dokładniej, przyjmuje kształt paraboloidy obrotowej, której oś symetrii pokrywa się z osią obrotu.

Dzieje się tak dlatego, że na cząsteczki wody, obracającej się wraz z butelką, działają dwie siły – siła ciężkości skierowana pionowo w dół i wspomniane wcześniej siły odśrodkowe. Wypadkowa tych sił skierowana jest ukośnie na zewnątrz, a powierzchnia wody w stanie równowagi ustawia się prostopadle do tej wypadkowej. Rozważania ilościowe, uwzględniające wprost proporcjonalną zależność wartości siły odśrodkowej od promienia obrotu i kwadratu liczby obrotów na sekundę, wykazują, że kształt powierzchni swobodnej jest właśnie paraboloidą. Do przeprowadzenia tego doświadczenia konieczna jest butelka szklana. Butelka plastikowa jest za lekka, odkształca się w miejscu styku ze stołem oraz wykazuje zbyt duże tarcie. Przez to jej ruch jest szybko hamowany i siła odśrodkowa jest zbyt mała, byśmy zdążyli zauważyć zmiany kształtu powierzchni wody.

Warto dodać, że wypolerowana, wklęsła strona paraboloidy obrotowej stanowi idealne zwierciadło skupiające, pozbawione aberracji sferycznej. Oznacza to, iż wszystkie promienie świetlne równoległe do jego osi podłużnej spotykają się w jednym punkcie, zwanym ogniskiem. Były próby wytworzenia takich zwierciadeł z obracającej się rtęci, zamkniętej w cylindrycznym naczyniu wprawionym w ruch obrotowy. Powierzchnia czystej rtęci jest błyszcząca i bardzo dobrze odbija światło. Ponieważ krzywizna powierzchni wzrasta wraz ze zwiększeniem liczby obrotów na sekundę, to położenie ogniska rtęciowego zwierciadła można było płynnie regulować. Zwierciadła takie o średnicy dochodzącej nawet do kilku metrów próbowano zastosować w dużych teleskopach.

W następnym doświadczeniu przymocowujemy do korka plastikowej butelki gumkę aptekarską, tak by butelka, zwisając, mogła się swobodnie obracać. Do butelki nalewamy wody, wypełniając ją około 0,4 objętości, i zamykamy butelkę zakrętką z gumką. Sprawdzamy, jaki kształt ma górna powierzchnia wody w nieruchomej butelce. Wprawiamy butelkę w ruch obrotowy tak samo, jak balonik w poprzednim doświadczeniu. Zauważamy, że powierzchnia wody, podobnie jak w przypadku butelki obracającej się na stole, przyjmuje kształt paraboloidy obrotowej, której gałęzie wznoszą się ku górze ze zwiększającą się szybkością obrotu. Zależność kształtu powierzchni od szybkości obrotu możemy zbadać dokładniej, nagrywając krótki film cyfrowy z przebiegiem eksperymentu, np. za pomocą telefonu komórkowego lub aparatu fotograficznego. Interesujące eksperymenty, ukazujące kształt powierzchni cieczy zamkniętej w różnych naczyniach i wprawionej ręcznie w ruch obrotowy, można również przeprowadzić w Ogrodzie Doświadczeń im. Stanisława Lema w Krakowie (fot. 1) i w Eksperymentarium w łódzkiej Manufakturze. Warto więc odwiedzić te miejsca podczas szkolnej wycieczki.

Opisy innych ciekawych eksperymentów dotyczących ruchu obrotowego ciał nieszttywnych można znaleźć na stronie internetowej *Delty*.