

# Badamy ciała nieszttywne w ruchu obrotowym

## Część II: Ciecze o dużej lepkości i materiały sypkie

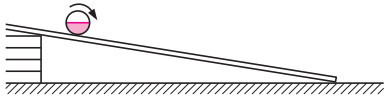
Stanisław BEDNAREK

W tym odcinku będziemy kontynuowali doświadczenia, pozwalające nam poznać zachowanie się ciał nieszttywnych w ruchu obrotowym. Skoncentrujemy się na cieczech o dużej lepkości i materiałach sypkich.

Do przeprowadzenia doświadczeń będzie nam potrzebne kilka okrągłych, przezroczystych, plastikowych pudełek o średnicy około 5 cm i wysokości 2 cm (np. po cukierkach) z nakładaną pokrywką, przezroczysta taśma klejąca, nożyczki, deska o długości ok. 1,5 m lub większej i szerokości ok. 10 cm, wiertarka elektryczna z regulacją szybkości obrotów, imadło, kółko z grubej sklejki lub plastiku o średnicy zbliżonej do średnicy pudełek, śruba i nakrętka z gwintem M6, przezroczysty silikon do uszczelnienia, wiertła oraz woda, sztuczny miód, keczup, mąka ziemniaczana, drobnoziarnisty, suchy, także wilgotny piasek.

Pudełka będziemy napełniać do połowy różnymi substancjami. Po napełnieniu nakładamy pokrywkę i uszczelniamy pudełka taśmą klejącą (gdy pudełek mamy mało i będzie trzeba wymienić ich zawartość) lub silikonem.

Pierwszą serię doświadczeń przeprowadzimy przy użyciu równi pochyłej. W tym celu na dużym stole albo innej, poziomej powierzchni, np. blacie kuchennym lub podłodze, kładziemy deskę. Pod jeden z końców deski podkładamy kilka grubszych książek albo płaskich pudełek, żeby była ona nachylona do poziomu pod kątem kilkunastu stopni.



Rys. 1. Równia pochyła do wprawiania pudełek w ruch i leżące na niej pudełko wypełnione cieczą. Przy niższym położonym końcu deski dobrze jest ułożyć gąbkę, która będzie zatrzymywała staczające się z równi pudełka, zapobiegając ich uszkodzeniu.

Na górnym końcu równi ustawiamy na początek pudełko z wodą i przytrzymujemy je palcami. Puszczamy pudełko swobodnie i obserwujemy, co się z nim dzieje oraz zachowanie się wody w jego wnętrzu.

Po ustawieniu (i przytrzymaniu) pudełka z wodą na górnej części równi pochyłej powierzchnia wody była płaska i pozioma, czyli prostopadła do działającej na nią siły ciężkości (rys. 2a). Kiedy puściliśmy pudełko i pozwoliliśmy mu staczać się po równi, powierzchnia wody nadal pozostała płaska i pozioma. Dzieje się tak, bo woda jest przykładem cieczy o małym współczynniku lepkości, słabo też zwilża ścianki pudełka, co powoduje, że oddziaływania różnych warstw wody oraz oddziaływanie wody ze ściankami toczącego się pudełka są słabe. Ścianki pudełka poruszające się ze stosunkowo małą prędkością nie są w stanie wprawić wody w ruch obrotowy i woda uczestniczy prawie wyłącznie w ruchu postępowym wzdłuż równi. Warto przypomnieć sobie doświadczenie z surowym jajkiem z I części artykułu.

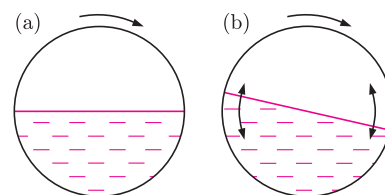
Na górnej części równi pochyłej ustawmy teraz pudełko zawierające sztuczny miód lub suchy piasek i obserwujemy, jak zachowuje się powierzchnia tych substancji. Stopniowo zwiększamy kąt nachylenia równi przez podłożenie pod jej koniec kolejnych książek lub pudełek. Dalej obserwujemy pudełko i jego zawartość. Okazuje się, że po umieszczeniu pudełka na równi powierzchnia znajdujących się w nim substancji jest płaska i ulega odchyleniu od pionu w kierunku niższej części równi (rys. 2b).

Pudełko przy tym również przechyliło się. Następnie pudełko i zawarta w nim substancja przechylają się w przeciwną

stronę. Wahania te powtarzają się kilkakrotnie i są spowodowane zmianą położenia środka masy pudełka z zawartością umieszczoną na równi pochyłej. Zwiększając kąt nachylenia równi, powodujemy, że pudełko w pewnym momencie zaczyna się staczać, a powierzchnia zawartej w nim substancji, pozostając płaska, wykonuje wahania wokół kierunku poziomego. Przyczyną tych wahań jest oddziaływanie substancji z poruszającymi się ściankami pudełka. Sztuczny miód, ma duży współczynnik lepkości, a piasek znaczny współczynnik tarcia. Dzięki temu oddziaływanie tych substancji z będącymi w ruchu ściankami jest na tyle silne, że potrafi przynajmniej czasowo zmienić położenie substancji.

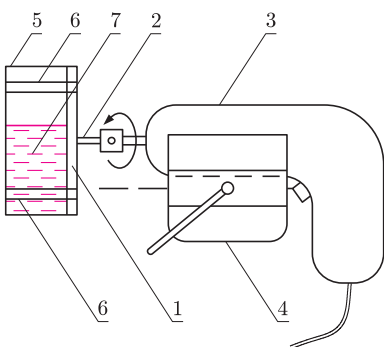
Na górnej części równi pochyłej możemy jeszcze umieszczać i puszczać kolejno pudełka wypełnione do połowy keczupem, zawiesiną mąki ziemniaczanej w wodzie oraz mokrym piaskiem, obserwując przy tym ruch pudełek oraz zachowanie się zawartych w nich substancji. W przypadku pudełka wypełnionego keczupem zauważamy, że w początkowym etapie ruchu próbował on obracać się wraz z pudełkiem i jego powierzchnia zakrzywiała się w kierunku ścianek pudełka. W następnym etapie, mimo że pudełko toczyło się szybciej, zaobserwowany efekt ulegał zmniejszeniu i powierzchnia keczupu stawała się bardziej płaska. Co jest przyczyną tego zaskakującego efektu?

Dotychczas lepkość badanych przez nas cieczy, takich jak woda czy sztuczny miód nie zależała od szybkości ich ruchu. Lepkość niektórych z tych cieczy, np. sztucznego miodu czy gliceryny, może być bardzo duża, ale jest stała przy różnych prędkościach. Dopiero wzrost temperatury cieczy powoduje zmniejszenie lepkości, a ich ochłodzenie efekt odwrotny. Takie ciecze nazywane są cieczami newtonowskimi.



Rys. 2. Zachowanie się powierzchni a) cieczy o małej lepkości umieszczonej w pudełku, toczącym się powoli; b) cieczy o dużej lepkości lub materiału sypkiego umieszczonego w pudełku, rozpoczynającym ruch lub toczącym się powoli.

Istnieje jednak duża grupa cieczy, których lepkość zależy od szybkości ruchu. Są one nazywane cieczami nienewtonowskimi. Ciecze te dzielą się na dwie grupy. Dla pierwszej z nich lepkość maleje wraz ze wzrostem szybkości i ciecze te nazywane są tiksotropowymi. W drugiej grupie ciecze sytuacja jest odwrotna i wzrost szybkości ruchu prowadzi do zwiększenia lepkości. Ciecze należące do drugiej grupy nazywane są reopeksyjnymi. Ciecze tiksotropowe i reopeksyjne mają zwykle złożoną strukturę i nie są jednorodne w skali molekularnej. Mogą to być m.in. zawiesiny cząstek jednego lub kilku ciał stałych o różnych kształtach w cieczach. Efekt tiksotropowy i reopeksyjny są spowodowane oddziaływaniem tych cząstek ze sobą oraz z cząsteczkami cieczy, w której zostały zawieszane. Ketchup jest łatwo dostępnym przykładem cieczy tiksotropowej. Na początku ruchu pudełka, gdy jego szybkość była mała, ketchup miał większą lepkość i był wprawiany w ruch przez poruszające się ścianki naczynia. Wraz z nabieraniem szybkości przez naczynie lepkość ketchupu malała i coraz trudniej było go poruszać. W przypadku zawiesiny mąki ziemniaczanej w wodzie zauważamy,



Rys. 3. Układ do badania substancji w ruchu obrotowym;  
1 – tarcza, 2 – śruba z nakrętką,  
3 – wiertarka, 4 – imadło, 5 – przezroczyste pudełko, 6 – przezroczysta taśma klejąca, 7 – badana substancja.

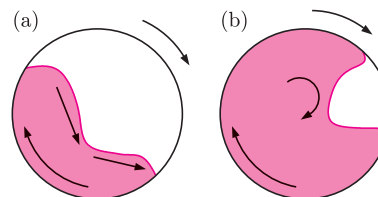
Po zmontowaniu układu powoli zwiększymy prędkość obrotów wiertarki i obserwujemy zachowanie się substancji zawartej w pudełku. Kiedy szybkość ta osiągnie odpowiednią, ale niezbyt dużą wartość, możemy zauważyć, że powierzchnia znajdującego się w pudełku suchego piasku wzniosła się po stronie przeciwnej do kierunku obrotu. Przy ustalonej prędkości obrotu kąt odchylenia od poziomu tej powierzchni jest stały. Widzimy również poruszające się w dół, wzdłuż powierzchni i tuż pod nią, uporządkowane warstwy piasku. Ponadto piasek unoszony jest w górę tuż przy ścianie naczynia. Tworzy się w ten sposób swoisty obieg piasku. Jest on transportowany ku górze dzięki siłom tarcia o ścianki naczynia i zsuwa się w dół, gdy kąt nachylenia powierzchni piasku przekroczy pewną wartość graniczną, odpowiadającą maksymalnemu współczynnikowi tarcia. Jeżeli jeszcze bardziej zwiększymy szybkość obrotów wiertarki, to powierzchnia piasku ulegnie załamaniu, ale opisany obieg będzie nadal zachowany (rys. 4a). Sugeruje to tworzenie się metastabilnego stanu pewnej ilości piasku w górnej części naczynia. Podobne efekty zaobserwujemy po wymianie pudełka z piaskiem na pudełko ze sztucznym miodem. Jeżeli do tarczy przymocujemy pudełko z mokrym piaskiem, to przy dostatecznie dużej szybkości obrotów będzie on rozrzucony prawie po całej objętości pudełka, tworząc wiry (rys. 4b).

że w początkowym etapie ruchu pudełka pozostawała ona prawie w spoczynku i jej powierzchnia była pozioma. Następnie niespodziewanie szybko została wprawiona w ruch, a jej powierzchnia ulegała zakrzywieniu. Zaobserwowany fakt można wyjaśnić opisanym wcześniej zjawiskiem reopeksji. Dokładniejsze badania wykazały, że pyłki mąki ziemniaczanej w zawieszynie wodnej, gdy nie jest ona poddana działaniom zewnętrznym, otoczone są bardzo cienką warstwą przylegających do nich cząsteczek wody. Tarcie między tak otoczonymi pyłkami jest małe i stąd niewielka lepkość. Kiedy jednak poddać zawiesinę silnemu, zewnętrznemu oddziaływaniu, np. szybko wprawić w ruch lub w nią uderzyć, wówczas warstewki te ulegają zniszczeniu, dochodzi do znacznego tarcia między bezpośrednio stykającymi się pyłkami mąki i lepkość zawiesiny wzrasta. Z kolei w pudełku zawierającym mokry piasek następuje stosunkowo silne oddziaływanie ze sobą jego ziarenek zwilżonych przez cząsteczki wody. Pojawiają się w wyniku tego siły przylegania między ziarnami i ściankami pudełka. Dzięki temu piasek w toczącym się pudełku łatwo jest wprawiany w ruch.

W przeprowadzonych dotychczas doświadczeniach nie mieliśmy możliwości precyzyjnej kontroli szybkości obrotów pudełka. Szybkość ta wzrastała wprost proporcjonalnie do czasu ruchu pudełka, ponieważ ruch ten był w przybliżeniu jednostajnie przyspieszony, a szybkość końcowa była stosunkowo niewielka. Możliwość zadawania ustalonej szybkości daje układ, przedstawiony na rysunku 3, w którym zastosowano wiertarkę elektryczną z regulacją szybkości obrotów.

Do zbudowania tego układu na początek wykonamy tarczę przeznaczoną do mocowania pudełek. W środku krążka ze sklejki lub plastiku wywiercimy przelotowy otwór, umożliwiając przłożenie śruby i poszerzymy go do połowy długości, tworząc zagłębienie, w którym schowa się łeb śruby, tak żeby nie wystawał ponad powierzchnię krążka. Przez krążek przekładamy śrubę i przykręcamy ją po przeciwnej stronie krążka nakrętką. Śrubę zaciskamy w uchwycie wiertarki, którą z kolei mocujemy w imadle, tak żeby jej wrzeciono mogło obracać się w pozycji poziomej. Regulator obrotów wiertarki ustawiamy na zero i przyłączamy wiertarkę do sieci elektrycznej. Do tarczy przykładamy wybrane pudełko, zawierające suchy piasek i mocujemy do niej za pomocą dwóch kawałków przezroczystej taśmy klejącej. Taśma powinna obejmować tarczę i pudełko w kierunku osiowym z przodu i tyłu. Takie rozwiązanie pozwoli nam na pewne zamocowanie pudełek i łatwą ich wymianę.

Z kolei po zamocowaniu i wprawieniu w szybki ruch obrotowy pudełka z cieczą reopeksyjną utworzy ona w przybliżeniu pierścień, przylegający do jego ścianek.



Rys. 4. Kształt powierzchni cieczy o dużej lepkości lub suchego materiału sypkiego umieszczonych w pudełku, obracającym się a) ze średnią szybkością; b) z dużą szybkością.

Wykorzystując układ z wiertarką o regulowanej szybkości obrotów i przygotowane wcześniej pudełka z różnymi substancjami, możemy przeprowadzić wiele interesujących obserwacji i samodzielnych badań zachowania się tych substancji w ruchu obrotowym. Dla przykładu, warto zbadać efektywne zachowanie się opiłków stalowych lub żelaznych podczas ich obrotu z różnymi szybkościami i przy zbliżaniu do pudełka magnesu. Bardziej skomplikowane badania tego rodzaju mają duże znaczenie dla optymalizacji konstrukcji wielu urządzeń przemysłowych, np. mieszalników czy homogenizatorów. Jednym z przykładów tych urządzeń jest powszechnie znana, pocziwa betoniarka.