

Ciecz nienewtonowska

Mariusz MRÓZEK*

* Wydział Fizyki, Astronomii
i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet
Jagielloński

Wyobraźmy sobie basen wypełniony cieczą, która z pozoru jest zwyczajną, mleczną substancją. Dla powolnego dotyku jest ona łagodna i ustępliwa jak woda. Wobec gwałtownej siły stawia jednak opór twardy jak skała. Uderzenie pięścią spotyka się z barierą nie do pokonania. To nie iluzja, lecz pokaz własności cieczy nienewtonowskich. Są to niezwykle materiały, które rewolucjonizują naukę i jednocześnie odgrywają kluczową rolę w wielu obszarach naszego życia.

Podstawy zrozumienia mechanizmu przepływu cieczy zawdzięczamy geniuszowi Isaaca Newtona. W XVII wieku sformułował on prawo opisujące lepkość – wewnętrzne tarcie płynu. Zgodnie z jego modelem dla cieczy takich jak woda, olej czy powietrze lepkość jest wartością stałą w danej temperaturze. Oznacza to, że opór, jaki stawia płyn, jest wprost proporcjonalny do siły, z jaką próbujemy go przemieszczać.

To eleganckie i intuicyjne prawo przez wieki stanowiło podstawę hydrodynamiki. Jednak wraz z rewolucją przemysłową inżynierowie i chemicy zaczęli pracować z substancjami, które uparcie odmawiały podporządkowania się regułom Newtona. Farby, zawiesiny ceramiczne, polimery czy produkty spożywcze zachowywały się w sposób niezgodny z dotychczasowym opisem przyrody.

Problem ten wymagał nowego podejścia. W 1920 roku profesor Eugene C. Bingham z Lafayette College, badając zachowanie farb, ukuł termin „reologia” (z greckiego *rheos* – płynąć i *logos* – nauka), aby opisać nową dziedzinę nauki poświęconą deformacji i przepływowi materii. Reologia stała się językiem, za pomocą którego mogliśmy wreszcie opisać i zrozumieć w pełni świat płynów.

Pomyślmy o mieszaniu gęstego miodu. Siłą, którą musisz włożyć w ruch łyżką, aby pokonać opór miodu, to naprężenie ścinające (τ). Z kolei prędkość poruszania łyżki, która przekłada się na prędkość płynięcia miodu, to szybkość ścinania (γ). Mówiąc prościej, naprężenie to przyczyna (siła), a szybkość ścinania to skutek (w jakim stopniu intensywność mieszania przekłada się na ruch miodu?).

Podstawowa różnica między cieczą newtonowską a nienewtonowską leży w relacji między naprężeniem ścinającym a szybkością ścinania. Dla cieczy newtonowskiej związek ten jest prosty i liniowy:

$$\tau = \eta \cdot \gamma,$$

gdzie η to stały współczynnik lepkości.

W przypadku cieczy nienewtonowskich lepkość nie jest stała, lecz zależy od szybkości ścinania. Ich zachowanie często opisuje się za pomocą modelu potęgowego Ostwalda de Waele’a:

$$\tau = K \cdot \gamma^n,$$

gdzie K to wskaźnik konsystencji, który mówi o ogólnej lepkości płynu, a n to wskaźnik płynięcia, kluczowy parametr decydujący o rodzaju cieczy:

- $n < 1$: ciecz rozrzedzana ścinaniem (pseudoplastyczna) – jej lepkość maleje wraz ze wzrostem szybkości ścinania;
- $n > 1$: ciecz zagęszczana ścinaniem (dylatantyczna) – jej lepkość rośnie, gdy zwiększa się szybkość ścinania;
- $n = 1$: model sprowadza się do cieczy newtonowskiej $K = \eta$.

Zrozumienie i umiejętność kontrolowania niezwykłych właściwości płynów nienewtonowskich zrewolucjonizowały niezliczone dziedziny, od codziennych produktów po zaawansowane technologie. Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów są „płynne pancerze”, takie jak materiał D3O. Wykonane z niego ochraniacze są elastyczne i wygodne w normalnych warunkach, lecz w momencie uderzenia natychmiast twardnieją, rozpraszając energię i chroniąc ciało.

W medycynie i biologii płyny te są wszechobecne. Nasza krew jest rozrzedzana ścinaniem, co ułatwia jej przepływ przez wąskie naczynia, a maź stawowa

O reologii pisali wcześniej Jacek Żebrowski w Δ_{78}^{11} i Stanisław Bednarek w Δ_{14}^1 .

Odstępstwa od reguł Newtona wynikają bezpośrednio z mikroskopowej struktury cieczy, w której dominują oddziaływania między makrocząsteczkami lub drobinami zawiesiny. W cieczach rozrzedzanych ścinaniem początkowa wysoka lepkość jest efektem chaotycznego splątania długich łańcuchów polimerowych. Pod wpływem naprężenia łańcuchy te rozplątują się i porządkują wzdłuż linii przepływu, co drastycznie redukuje tarcie wewnętrzne.

Z kolei w cieczach zagęszczanych ścinaniem (np. zawiesinach skrobi) powolny ruch pozwala na smarowanie hydrodynamiczne ziaren przez rozpuszczalnik. Gwałtowne odkształcenie wypycha jednak ciecz smarującą pomiędzy drobin, prowadząc do ich tarcowego kontaktu i zjawiska zablokowania strukturalnego (*jamming*). Cząstki tworzą wtedy sztywne hydroklastry, co makroskopowo objawia się radykalnym wzrostem lepkości i ztwardzeniem materiału.

zapewnia niskie tarcie przy szybkich ruchach i amortyzację w spoczynku. Wiedza ta jest kluczowa w projektowaniu protez, systemów dostarczania leków i diagnostyce. Przemysł i budownictwo również czerpią z tych właściwości. Szlasy wiertnicze muszą być płynne podczas pompowania, ale gęstnieć w spoczynku, by wynosić urobek. Podobnie nowoczesne samopoziomujące mieszanki betonowe ułatwiające pracę dzięki temu, że stają się rzadsze podczas wylewania. W technologii żywności i kosmetyce reologia decyduje o wrażeniach sensorycznych – od kremowości czekolady i gęstości jogurtu po konsystencję balsamu, który łatwo się aplikuje, ale nie spływa ze skóry.

Szczytem innowacji są płyny magnetoreologiczne (MR) stosowane w motoryzacji. Ich lepkość można zmieniać w ciągu milisekund za pomocą pola magnetycznego, co pozwala na tworzenie inteligentnych systemów amortyzacji w samochodach, które adaptują się w czasie rzeczywistym do warunków na drodze, zapewniając komfort i bezpieczeństwo. Podamy teraz prosty przepis na własną ciecz nienewtonowską.



Przykład cieczy nienewtonowskiej wykonanej domowym sposobem – mieszanina skrobi kukurydzianej i wody umieszczona na membranie głośnika. Ciecz pod wpływem drgań przyjmuje dynamiczne, nieregularne kształty. Materiał udostępniony na licencji CC BY 3.0; autor: Daniel Christensen

Składniki:

- skrobia ziemniaczana (lub mąka ziemniaczana) – to kluczowy składnik;
- woda – najlepiej chłodna lub w temperaturze pokojowej.

Najważniejszą zasadą jest stopniowe dodawanie wody do skrobi. Proporcje są orientacyjne, a ostateczną konsystencję najlepiej wyczuć samemu. Zalecany stosunek to około 2 części skrobi ziemniaczanej na 1 część wody (np. 1 szklanka wody na 2 szklanki skrobi). Początkowo mieszanie może być trudne, a najlepiej robić to dłońmi, aby dobrze poczuć zmieniającą się konsystencję. Mieszaj powoli, aż wszystkie grudki skrobi połączą się z wodą. Idealna ciecz nienewtonowska powinna stawiać opór przy próbie szybkiego mieszania lub uderzenia w jej powierzchnię, zachowując się jak ciało stałe. Gdy zanurzysz w niej palce powoli, powinny one swobodnie „wplynać” do środka, jak w gęstej cieczy. Jeśli spróbujesz nabrać ją w dłoń i szybko uformować kulkę, powinno się to udać. Gdy jednak przestaniesz ją toczyć, rozplynie się między palcami. Jeśli ciecz jest zbyt rzadka i nie twardnieje pod naciskiem, dodaj więcej skrobi (po jednej łyżce). Jeśli jest zbyt gęsta, grudkowata i kruszy się, dolej odrobinę wody.

Na koniec warto zebrać najważniejsze wnioski. Ciecze nienewtonowskie, niegdyś naukowa anomalia, dziś są fundamentem nowoczesnej inżynierii materiałowej. Od prostej mieszanki skrobi i wody po zaawansowane płyny w zawieszeniach samochodowych, ich zdolność do dynamicznej zmiany właściwości w odpowiedzi na siłę otwiera nieskończone możliwości. Pokazują nam, że świat fizyki jest znacznie bardziej złożony i fascynujący niż proste, liniowe modele, a to, co wydaje się „łamaniem zasad”, w rzeczywistości jest jedynie odkrywaniem głębszych, bardziej subtelnych praw rządzących materią.

Delta poleca: Kolorowe trójkąty



Czyż może być coś miłszego matematycznemu oku niż trójkąt? Pewnie, że może – **k o l o r o w y t r ó j k ą t**! Miłośnikom tych figur geometrycznych, jak również wszystkim, którzy lubią gry towarzyskie pomagające utrzymać formę szarych komórek, serdecznie polecamy grę *Kolorowe trójkąty*, wydaną przez wydawnictwo *Egmont*. Została ona opracowana przez Joannę Bednarczuk – nauczycielkę matematyki i współautorkę książki *Matematyczne Gwiazdki*, którą zachwalaliśmy już na naszych łamach. W grze należy układać obok siebie trójkątne kafelki (na obrazku obok ograniczone szarymi liniami) w taki sposób, by trójkąty o tym samym kolorze sąsiadowały bokami. Punkty otrzymujemy za rozszerzanie jednokolorowych obszarów (większy obszar to więcej punktów) i tworzenie dużych trójkątów. Przyjemność płynącą z dopełnienia za pomocą własnego kafelka jednokolorowego sześciokąta foremnego można porównać do satysfakcji z usunięcia za jednym razem kilku rzędów w kultowej grze *Tetris*. Nauka zasad zajmuje kilka minut, a radosne układanie kolorowych kształtów może trwać godzinami. Jest to rozrywka, którą najmłodsi mogą dzielić z najstarszymi – u obu trenująca z pewnością geometryczną wyobraźnię. Zachęcamy do układania!