

Bąbelki jak w zegarku

PIOTR GARSTECKI

Instytut Chemii Fizycznej
Polskiej Akademii Nauk, Warszawa
garst@ichf.edu.pl

Umiemy już manipulować płynami w mikroskali. Jednym z najciekawszych zastosowań technik mikroprzepływowych jest precyzyjne tworzenie bąbelków i kropelek; metody te z czasem posłużą do konstrukcji miniaturowych laboratoriów chemicznych

Naszą intuicję, dotyczącą przepływów, kształtują codzienne czynności: mycie rąk, pływanie, nalewanie herbaty do filiżanki. Czy te intuicyjne wyobrażenia dają się zastosować w każdej sytuacji? W ciągu ostatnich

kilkunastu lat naukowcy nauczyli się kontrolować przepływy w miniaturowych kanałkach. Sieci rurek o grubości kilkudziesięciu mikrometrów – czyli grubości ludzkiego włosa – drukuje się dziś w podobny sposób, jak elektroniczne układy scalone. Przepływy w mikroskali zdominowane są przez efekty lepkościowe, związane z „tarcie” wewnątrz płynu. Takich efektów rzadko doświadczamy na co dzień – może jedynie wykradając łyżeczkę miodu ze spiżarni.

Kiedy lepkość dominuje, dwie strugi cieczy płyną obok siebie laminarnie, mieszając się jedynie dzięki dyfuzji. W odróżnieniu od przepływów w dużej skali – np. w górskim potoku – w układach mikroprzepływowych nie ma turbulencji; tarcie wygasa wszelkie fluktuacje, a zarówno przepływ, jak i stężenie zawartych w płynie substan-



Piotr Garstecki jest chemikiem, zajmuje się mikroprzepływami i samoorganizacją w płynach złożonych



Krzysztof Kalinski

Z rozpadaniem się cieczy na krople spotykamy się często. Ale w układach mikroprzepływowych, w przeciwieństwie do sytuacji znanych z codziennego życia, możemy tworzyć bąble i kropelki w sposób niemalże idealnie powtarzalny

Mikroprzepływy

cji można dokładnie kontrolować i w czasie, i w przestrzeni. Właśnie możliwość precyzyjnej kontroli, połączona z małym zużyciem płynów, przyczyniła się do ogromnego zainteresowania mikroprzepływami jako techniką, która kiedyś odmieni analizy chemiczne w podobny sposób, jak elektronika odmieniła przetwarzanie informacji. Nie tak już odległym celem jest tworzenie laboratoriów chemicznych, mieszczących się na powierzchni dłoni.

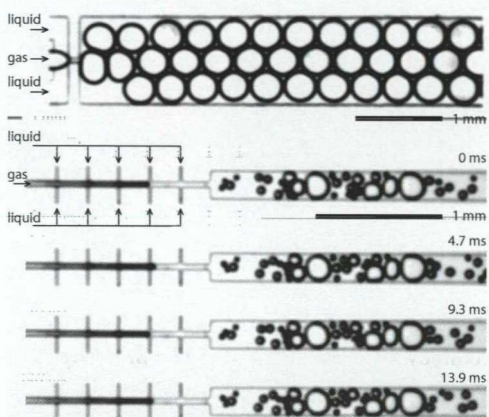
Przepływ laminarny, choć praktyczny, nie jest szczególnie interesujący. Jakościowo nowe zjawiska obserwuje się po wprowadzeniu do kanałów cieczy niemieszających się. Siły powierzchniowe, z natury nieliniowe, przyczyniają się do powstania fascynujących zjawisk. Układy mikroprzepływowe okazują się idealne do kontrolowanego tworzenia kropelek i bąbelków z dobranym rozmiarem i rozkładem rozmiarów.

Istnienie powierzchni rozdziału dwu niemieszających się cieczy (zwanej interfejsem) związane jest z kosztem energetycznym. Energia powierzchniowa zależy od kształtu powierzchni, ograniczającej objętość zajętą przez ciecz. Dla ustalonej objętości

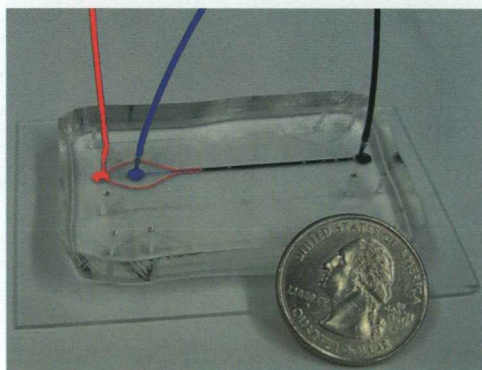
cieczy, kształtem, który minimalizuje pole powierzchni, a więc także energię powierzchniową, jest sfera. Dlatego krople, na które nie działają żadne zewnętrzne siły, przyjmują idealnie sferyczne kształty. Nie zawsze jednak możliwe jest osiągnięcie tego idealnego kształtu. Jeśli objętość niemieszającej się cieczy zostanie zdeformowana i wydłużona na kształt cylindra, to, zanim osiągnie idealny kształt kuli, pęknie na dwie – lub więcej – mniejsze kropelki. Niestabilność ta stanowi podstawę fizyki rozbijania dużych porcji niemieszających się cieczy na mniejsze kropel-

Układy mikroprzepływowe umożliwiają pełną kontrolę nad rozmiarami tworzonych w nich bąbli i kropelek

Górny schemat to pojedynczy mikroprzepływowy układ skupiający, tworzący bąble o jednakowym rozmiarze. Na zdjęciach w dolnej części ryciny pokazane jest urządzenie, składające się z pięciu dysz połączonych seryjnie. Układ tworzy sekwencje bąbli o różnych rozmiarach (tu: 29 bąbli). Zaskakujące jest, że tak złożona dynamika okresowa jest stabilna: układ produkuje powtrajające się pakiety bąbli przez długie godziny. Kolejne zdjęcia obrazują system w 4,7, 9,3 i 13,9 milisekund po rejestracji pierwszego obrazu



Piotr Garatecki



Piotr Garatecki

Układ mikroprzepływowy

dyszy. Ponieważ w warunkach typowych dla mikroprzepływów napięcia powierzchniowe dominują nad napięciami ścinającymi, powstająca kropla wypełnia niemal całkowicie przekrój dyszy i ogranicza przepływ cieczy ciągłej do cienkich warstw pomiędzy interfejsem a ścianami kanału. W ograniczonej geometrii dyszy interfejs jest stabilny, podobnie jak stabilna jest mydlana błona rozpięta między dwiema okrągłymi ramkami: katenoida. Przepływy w cienkich warstwach związane są ze zwiększonymi oporami hydrodynamicznymi, co – w połączeniu z ustaloną prędkością wpływu cieczy ciągłej do dyszy – prowadzi do wzrostu ciśnienia. Nierównowaga ciśnień prowadzi do ściskania szyjki kanału. Zrówno ściskanie interfejsu, jak i przepływ przez dyszę przebiegają zdecydowanie wolniej od dochodzenia interfejsu do równowagi i zmian ciśnienia w obu płynach. Dzięki tej separacji skal czasowych, pękanie strumienia cieczy przypomina procesy quasi-stacjonarne, znane z termodynamiki: podczas pękania układ przechodzi przez serię równowagowych kształtów interfejsu. W skali czasu potrzebnego na pęknięcie szyjki każdy kolejny proces pękania jest praktycznie nierozróżnialny od poprzedniego, a układ produkuje serię identycznych bąbli (lub kropli). Układy mikroprzepływowe pozwalają na precyzyjną kontrolę zarówno rozmiaru kropli, jak i objętości, jaką te krople zajmują.

Zegar mikroprzepływowy

Na bazie procesu kontrolowanego pękania strumieni niemieszających się cieczy, skonstruowaliśmy zegar mikroprzepływowy, który potrafi „tykać” z niemal dowolnym okresem. Składa się on z połączonych szeregowo dysz skupiających, zasilanych ze wspólnego źródła cieczy. Jeśli pojedynczy układ skupiający można nazwać oscylatorem, to urządzenie wielodyszowe stanowi układ sprzężonych oscylatorów. Strumień gazu penetrujący kolejne dysze wpływa na poziom ciśnienia w kanałach dostarczających ciecz. Z kolei ciśnienie w dyszach ma wpływ na prędkość wpływu cieczy do dysz i, co za tym idzie, na prędkość pękania strumienia gazu na bąbelki. Tak więc proces pękania w jednej dyszy ma wpływ na ewolucję interfejsu we wszystkich innych. Taki sprzężony układ dysz produkuje długie sekwencje bąbli o różnym roz-

Piotr Kossobudzki



Kiedy napięcia powierzchniowe w układzie mikroprzepływowym dominują nad napięciami ścinającymi, interfejs opiera się na ścianach kanałów, co zapewnia mu stabilność podobną do stabilności katenoidy rozpiętej pomiędzy dwiema okrągłymi ramkami

miarze. Sekwencje te powtrzymają się niemal idealnie. Pomimo złożoności obserwowanych cykli granicznych, małe odchylenia od powtarzalnego zachowania nie wzmacniają się, jak zazwyczaj bywa to w układach dynamicznych, lecz zanikają. Stabilność tak złożonych oscylacji nie była dotąd obserwowana w układach mechanicznych. Wierzymy, że podstawą tej stabilności jest separacja skal czasowych pomiędzy (wolną) ewolucją interfejsu, oraz (szybką) wymianą informacji pomiędzy dyszami i szybkimi procesami relaksacji. Taka separacja może pomóc przy projektowaniu układów o stabilnej, złożonej dynamice nieliniowej.

Kontrolowane tworzenie kropli znalazło już zastosowanie. Minikropelki mogą służyć jako chemiczne próbki. Układy mikroprzepływowe pozwalają na tworzenie dziesiątek tysięcy takich pikolitrowych próbek na sekundę. Być może już w niedalekiej przyszłości każdą będzie można osobno przygotować i analizować. Czekamy na nadejście chemii w kropli wody, niezawodnej jak szwajcarski zegarek. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

- Garstecki P., Gitlin I., Diluzio W., Kumacheva E., Stone H.A., Whitesides G.M. (2004). Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 26–49.
- Garstecki P., Fuerstman M., Whitesides G.M. (2005). Oscillations with uniquely long periods in a microfluidic bubble generator, *Nature Physics*, 1, 168–171.