

Om mani padme hum...

Krzysztof REJMER

Jest klejnot w kwiecie lotosu... – głosi słynna buddyjska mantra. Kwiat lotosu to rodzący się ze Słońca Wszechświat, kosmiczna harmonia, Koło Życia, nirwana, związek przeciwnych płci i w ogóle wszelkich przeciwieństw. Jednak ta pradawna i niezwykle wieloznaczna symbolika kwiatu lotosu nie ogranicza się wyłącznie do kulturowego kręgu religii hinduistycznych i buddyjskich. Znana była w starożytnym Egipcie i w Fenicji, nieobca była także Grekom – wystarczy wspomnieć wysłane kwiatami lotosu łożo Zeusa i Hery na górze Ida, nimfę Lotis i przygody Odysa w krainie Lotofagów. Także we wczesnochrześcijańskiej ikonografii lotos był atrybutem Matki Boskiej, później jednak w tej roli zastąpiła go lilia. Jedno spośród tak licznych znaczeń lotosu wysuwa się jednak na pierwszy plan: był on symbolem czystości. I tu właśnie zaczyna się nasza opowieść, której przedmiotem są nie symboliczne, lecz fizyczne własności tej rośliny.

Lotos jest rośliną wodną, jednak w przeciwieństwie do innych, wyrasta niezanieczyszczony ponad lustro wody, tak jak Budda, który narodził się w Świecie i niesplamiony wyrósł ponad Świat. Ta jego własność, która przez trzy tysiąclecia fascynowała wielu mistyków i poetów, obecnie jest przedmiotem intensywnych badań fizykochemicznych, o dużym znaczeniu zarówno dla biologii, jak i dla nowoczesnej technologii. Zrozumienie zjawiska, o którym mówimy, jest konsekwencją prac wielu uczonych, wspomnę tutaj jedynie niemieckiego biologa Wilhelma Barthlotta z Uniwersytetu w Bonn, który przez ponad dwadzieścia lat, posługując się elektronowym mikroskopem skaningowym, przebadał strukturę powierzchni liści ponad dziesięciu tysięcy gatunków roślin.

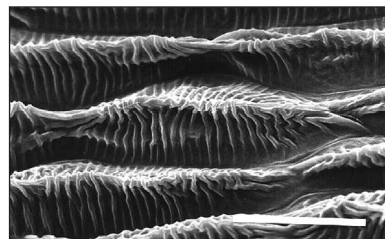
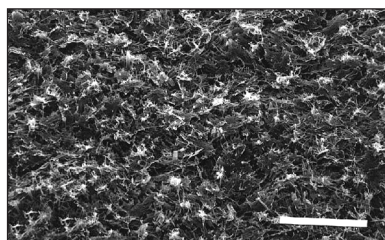
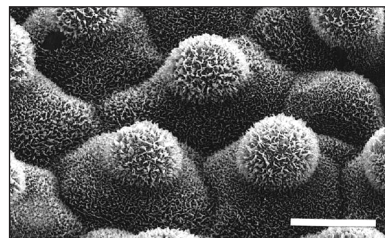
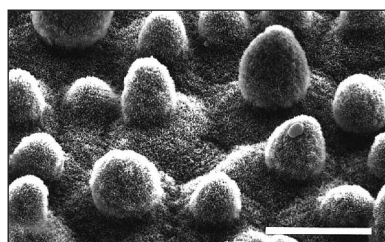
Liście niektórych gatunków nie tylko nie są zwilżane przez wodę, ale ponadto mają własność samooczyszczania się. Spływające po nich kropelki wody usuwają wszelkie brudy z powierzchni liścia, niezależnie od chemicznego składu i rozmiarów zanieczyszczeń. Zjawisko to jest szczególnie efektowne i efektywne w przypadku wspomnianego gatunku o łacińskiej nazwie *Nelumbo nucifera*; od niego też zostało nazwane *efektem lotosu*.

Powierzchnia liścia, na której osiadają zanieczyszczenia, jest dla rośliny zaporą przed ich potencjalnie szkodliwym wpływem. W terenach o dużym zanieczyszczeniu, gdy liście pokryte są pyłem, ich temperatura znacząco wzrasta. Pyłki o odpowiednim rozmiarze zatykają szparki oddechowe, co powoduje zaburzenie gospodarki wodno-gazowej rośliny. Szczególnie narażone na wpływ zanieczyszczeń są liście o szorstkich, nierównych powierzchniach. Skutecznym mechanizmem obronnym jest dla rośliny efekt lotosu. Służy on także oczyszczaniu powierzchni liścia z czynników chorobotwórczych, takich jak bakterie i różne zarodniki.

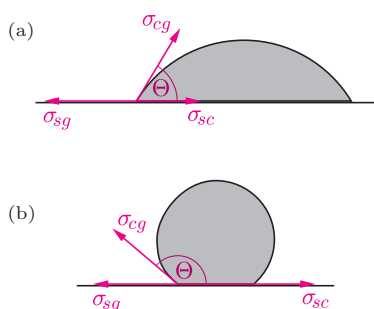
Spróbujmy zrozumieć ten mechanizm. Rozważmy kropelkę cieczy na płaskim podłożu pokazaną na rysunku 1. Z makroskopowego punktu widzenia jest to wycinek kuli, o kącie kontaktu Θ , którego wartość określa równanie Younga, opisujące warunek mechanicznej równowagi kropli:

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sc} + \sigma_{cg} \cos \Theta,$$

gdzie σ_{sg} , σ_{sc} i σ_{cg} , oznaczają napięcia powierzchniowe związane z trzema powierzchniami rozdziału faz pomiędzy gazem (*g*), cieczą (*c*) i ciałem stałym (*s*). Mówimy, że powierzchnia ciała stałego jest całkowicie zwilżana, gdy kąt kontaktu ma zerową wartość (ciecz tworzy wówczas płaską warstwę), i że jest zwilżana częściowo, gdy kąt kontaktu jest większy od zera. Im większa jego



Obrazy powierzchni liści niezwilżanych przez wodę uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Biały pasek ma długość 20 μm . Pierwsza fotografia przedstawia liść gatunku *Nelumbo nucifera*.



Rys. 1. Kropka cieczy na płaskim podłożu. Mały kąt kontaktu (a) odpowiada silnemu zwilżaniu; duży kąt kontaktu (b) odpowiada słabemu zwilżaniu.

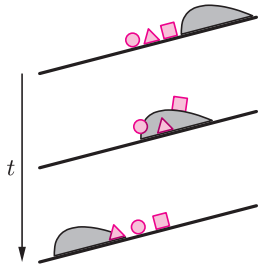


Rozwiązanie zadania M 1003.

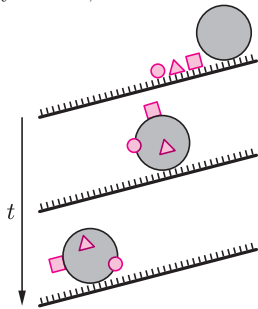
Bakterie w próbówce dzielimy – w zależności od „rodzica” – na 20 podtypów 1, 2, ..., 20, tak że bakterie podtypów 1, 2, ..., 9 są bakteriami typu A. Niech p_i będzie prawdopodobieństwem tego, że losowo wybrana w 60. sekundzie bakteria jest podtypu i , gdzie $i = 1, \dots, 20$. Ponieważ procedura podziału dla każdego podtypu jest jednakowa, więc $p_1 = p_2 = \dots = p_{20}$.

Poza tym $\sum_{i=1}^{20} p_i = 1$, więc $p_i = \frac{1}{20}$,

a szukane prawdopodobieństwo wynosi $p_1 + p_2 + \dots + p_9 = \frac{9}{20}$.



Rys. 2. Kropla cieczy płynąca po gładkim liściu jedynie przemieszcza zanieczyszczenia,



podczas gdy kropla płynąca po podłożu nierównym usuwa je.

wartość, tym gorzej jest zwilżana powierzchnia. Gdy jest on równy 180° , mówimy nie o zwilżaniu, lecz o suszeniu; krople tworzą wtedy pełne kule, które nie przylegają do powierzchni. Wartość kąta kontaktu zależy nie tylko od własności powierzchni i cieczy, ale także od temperatury. Im wyższa jest temperatura, tym kąt jest mniejszy. Przykładem substancji, która zwilżana jest tylko w nieznacznym stopniu, jest teflon. Odpowiada to małej (w porównaniu z σ_{sc}) wartości napięcia powierzchniowego σ_{sg} . Powierzchnie zbudowane z substancji o niewielkiej ilości grup polarnych cechują się słabym zwilżaniem, nazywamy je hydrofobowymi. W szczególności dotyczy to wosków (węglowodory) pokrywających liście niektórych gatunków roślin. Powierzchnie liści nie są płaskie, mają one strukturę geometryczną, która także wpływa na kształt znajdujących się na niej kropelek wody. Jest ona związana z warstwą wosku, tworzącą na powierzchni liścia regularną mikrorzeźbę o wysokości 1–5 μm . W przypadku wspomnianego gatunku *Nelumbo nucifera* kąt kontaktu ma w warunkach normalnych wartość około 160° , a zatem krople wody na jego powierzchni są prawie kuliste.

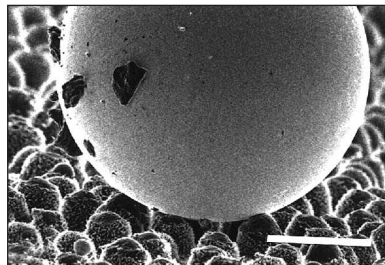
Brud, który osiadł na woskowanych liściach, tworzą substancje lepiej zwilżane przez wodę niż sama powierzchnia liścia. W dodatku rozmiary zanieczyszczeń są na ogół znacznie większe niż nierówności tej powierzchni; tak więc przylegają one do liścia tylko w niewielu punktach, nie zaś całą powierzchnią. Dzięki tej małej (w porównaniu z wodą) powierzchni styku i słabszej adhezji (przyleganiu) pomiędzy zanieczyszczeniem i liściem, zanieczyszczenia są „ciągnięte” przez krople. Efektywność samooczyszczenia jest wyższa w przypadku deszczu niż mgły. Wiąże się to z większą energią kinetyczną kropelek deszczu. Sprężyste deformacje pozwalają im wnikać głębiej w zagłębienia powierzchni i skuteczniej usuwać z nich zanieczyszczenia.

Taka poruszająca się po liściu kulista (lub prawie kulista) kropelka zabiera ze sobą znajdujące się na jej drodze zanieczyszczenia. Jeśli kropelka rozlewa się, tworząc z powierzchnią mały kąt kontaktu, zanieczyszczenia zostają przemieszczone w inne miejsca, ale nie usunięte. Trzeba też zdawać sobie sprawę z tego, że płynąca po powierzchni liścia kropla nie spełnia równania Younga, które opisuje sytuację statyczną. Jednak dla zjawiska samooczyszczania się liścia największe znaczenie ma nie dynamika ruchu kropli, lecz zwilżalność powierzchni, będąca pojęciem równowagowym.

Efekt lotosu ma ogromne znaczenie nie tylko dla roślin, ale także dla owadów, szczególnie tych, które mają dużą powierzchnię skrzydeł i nie są w stanie czyścić ich łapkami, tak jak to czyni mucha. Nierównomierne obciążenie skrzydeł może nawet spowodować utratę zdolności lotu.

Opisany mechanizm jest dość zaskakujący. W potocznym języku gładki znaczy czysty, a nierówny – brudny. Codzienne doświadczenie uczy, że znacznie łatwiej utrzymać w czystości gładkie marmurowe posadzki niż nawierzchnie chropowate. Podobnie jak z podłogą jest z kuchennymi blatami, wannami, lodówkami i innymi sprzętami gospodarstwa domowego. Okazuje się jednak, że pewne powierzchnie – czystsze od innych, wcale nie są gładkie, lecz mają bogatą strukturę geometryczną.

Efekt lotosu zainteresował się przemysł. W 1998 roku cztery niemieckie firmy zaczęły wdrażać technologie oparte na tym zjawisku, od tej pory ich liczba znacznie wzrosła. Już w 1999 roku na rynku pojawiła się farba o nazwie *Lotusan*, przeznaczona do malowania zewnętrznych ścian budynku. Jednym z motywów, którymi kierują się laboratoria, jest próba znalezienia skutecznego sposobu walki z pokrywającym mury graffiti. Jak się wydaje, obecnie najbardziej zainteresowanymi samooczyszczającymi się powierzchniami jest przemysł samochodowy, jednak potencjalnych zastosowań jest wiele, spośród nich zastosowania medyczne wydają się należeć do najważniejszych. Jeszcze w 1999 roku londyński *The Economist* w artykule poświęconym gospodarce niemieckiej odnotował zastosowanie efektu lotosu jako przykład nowej technologii o dużej przyszłości.



Kropla na powierzchni liścia i efekt lotosu. Czarne obiekty na powierzchni kropli to zebrane przez nią zanieczyszczenia. Biały pasek ma długość 50 μm .