

## Regularność zgrubień sopli

Niestety, materiału do własnych obserwacji chyba już w tym sezonie nie będzie. No, chyba że ktoś wybiera się jeszcze w wysokie góry. Chodzi o sople. Często udekorowane są one regularnymi, opasującymi je zgrubieniami. W odróżnieniu od płatków śniegu, z których (podobno) żadne dwa nie są takie same, wzorki na soplach są bardzo podobne. Okazuje się, że długość fali grubości sopla wynosi zawsze około 8 mm, niezależnie od temperatury powietrza, średnicy sopla czy szybkości ściekania wody. Do niedawna obserwacja ta nie miała wyjaśnienia. Nie jest to wcale takie dziwne. Zjawisko tworzenia się sopli jest tylko na pierwszy rzut oka proste i zrozumiałe. W rzeczywistości mamy tu do czynienia z bardzo skomplikowanym fenomenem. Sopol rośnie wtedy, gdy ścieka po nim cienka warstewka wody. Aby opisać to zjawisko, należy rozpatrzyć krystalizację, związane z nią ciepło topnienia i krzepnięcia (ciepło utajone), laminarny przepływ między dwiema powierzchniami: ciecz–lód i ciecz–powietrze, parowanie cieczy oraz transport ciepła.

Przy omawianiu rośnięcia kryształów podobna modulacja powierzchni jest zazwyczaj wyjaśniana za pomocą teorii Mullinsa–Sekerka’i, która opiera się na niestabilności Laplace’a i efekcie Gibbsa–Thomsona, które kolejno omówimy.

Z dobrym przybliżeniem lód sopla ma stałą temperaturę. Rozkład temperatury powietrza spełnia wtedy równanie Laplace’a, inaczej mówiąc, temperatura zależy tylko od odległości od osi sopla. Jeżeli przyjmiemy dodatkowo, że zewnętrzna temperatura jest niższa od temperatury sopla (co odpowiada tworzeniu się sopla, a nie jego topnieniu), to wtedy różnica temperatury na granicy sopol–powietrze będzie większa tam, gdzie powierzchnia sopla jest wypukła, a mniejsza tam, gdzie jest wklęsła. Powoduje to, że lód będzie się szybciej odkładał w miejscach wypukłych, gdyż tam odbiór ciepła utajonego będzie szybszy. To oznacza, że krótkofalowe nieregularności średnicy sopla będą rosły szybciej niż długofalowe. To właśnie nazywane jest niestabilnością Laplace’a.

Powierzchnia stałego obiektu ma pewną gęstość energii własnej. Jeżeli cząsteczka przyłącza się do powierzchni w miejscu jej wypukłości, to pole powierzchni rośnie, a więc i całkowita energia powierzchniowa rośnie. I odwrotnie, przyłączenie cząsteczki w miejscu wklęsłym powoduje zmniejszenie się pola, a z nim całkowitej energii powierzchniowej. W takim razie temperatura topnienia będzie mniejsza w punktach wypukłych niż wklęsłych. To jest właśnie efekt Gibbsa–Thomsona, który sprawia, że fluktuacje grubości mają tendencję do znikania. Działa on w przeciwną stronę niż niestabilność Laplace’a.

Niestety, proste zastosowanie łączącej oba efekty teorii Mullinsa–Sekerka’i nie jest możliwe. Po pierwsze, warstwa wody spływająca po sopolu jest za cienka, aby powodować niestabilność Laplace’a, a po drugie,

obserwowana krzywizna fluktuacji jest za mała, aby działał efekt Gibbsa–Thomsona.

Autorzy pracy [1] odnaleźli jednak dwa mechanizmy spełniające podobnie konkurencyjną rolę jak w teorii Mullinsa–Sekerka’i. Chodzi o dyfuzję ciepła na granicy lód–woda oraz woda–powietrze. Z rozwiniętej przez nich teorii wynika, że efekty związane z dyfuzją ciepła na granicy woda–powietrze powodują skracanie się długości fali powstających zgrubień, a związane z granicą woda–lód odwrotnie – wydłużanie się tej długości fali. Ustala się równowaga pomiędzy tymi konkurencyjnymi mechanizmami, powodująca powstawanie zgrubień o długości fali rzędu 8 mm niezależnie od temperatury otoczenia, średnicy sopla i szybkości spływania wody. Od czynników tych zależy jednak amplituda powstających zgrubień i szybkość ich narastania. Od tej ostatniej zależy również przewidywana szybkość przemieszczania się zgrubień po sopolu. Miało to być zweryfikowane doświadczalnie, aby ostatecznie potwierdzić prawdziwość teorii. A, że praca ukazała się przed zimą, to może na wiosnę ostateczne wyniki ujrzą światło dzienne?

## Maksymalna liczba kaczek

Na pewno z wiosną puszcza lody, co umożliwi puszczenie kaczek. Ta uwielbiana przez dzieci zabawa doczekała się niedawno naukowego opracowania [2]. W końcu nie tylko dzieci cieszy obserwowanie odbijających się od powierzchni wody kamieni. Jest to dyscyplina, w której rozgrywane są nawet mistrzostwa świata. Chodzi o wykonanie rzutu o tytułowej „maksymalnej liczbie kaczek”. Rekord świata wynosi obecnie 38 odbić [3].

Każdy intuicyjnie wie, jak wykonać dobry rzut, bo chyba każdy kiedyś to próbował robić. Najlepsze kamienie są raczej płaskie i okrągłe. Należy rzucić mocno, płasko, nadając kamieniowi jak największą rotację.

Czy intuicja ta znajduje potwierdzenie przy naukowym podejściu do problemu? Uproszczony model zjawiska rozważany w publikacji [2] raczej to potwierdza. Maksymalna liczba odbić zależy od spowalniania ruchu postępowego i od destabilizacji ruchu wirowego na skutek kolejnych odbić. Okazuje się, że chociaż efekt spowalniania ruchu postępowego można zniwelować przez zwiększenie prędkości początkowej, to narastająca destabilizacja ruchu wirowego i tak ograniczy maksymalną liczbę kaczek. Z przedstawionej teorii wynika, że aby pobić rekord świata, należy rzucić kamień z początkową prędkością co najmniej 12 m/s i z rotacją ponad 14 obrotów na sekundę. Przy czym zwiększanie tylko jednego z parametrów nie pomoże. Powodzenia!

Piotr ZALEWSKI

[1] *Surface instability of icicles*, N. Ogawa, Y. Furukawa, Phys. Rev. E **66**(2002)041202,

[2] <http://www.stoneskipping.com>

[3] *The physics of stone skipping*, L. Bocquet, Am. J. Phys. **71**(2003)150