



Szybkość stygnięcia Efekt Mpemby

Zofia Gołąb-Meyer

Efekt Mpemby (patrz Wikipedia) jest zjawiskiem zaobserwowanym po raz pierwszy przez afrykańskiego ucznia **Erasto B. Mpembę**. Zauważył on, że w pewnych określonych warunkach fizycznych ciepła woda zamarza szybciej niż zimna. Napisał:

„Nazywam się Erasto B. Mpemba i chciałbym opowiedzieć wam o moim odkryciu. W 1963 roku, kiedy byłem w trzeciej klasie szkoły średniej w Magambie w Tanzanii, często robiłem sobie lody. Chłopcy w szkole robili to następująco: gotowali mleko, słodzili je, mieszała, chłodzili do temperatury pokojowej i wstawiali do zamrażalnika lodówki.

Pewnego dnia zakupiłem mleko od miejscowej sprzedawczynie i zacząłem je gotować. Jednak inny chłopiec, który też kupił mleko, obawiał się, żeby mu nie zabrakło miejsca w lodówce, osłodził swoje mleko, zamieszał, szybko przelał do naczynka i wstawił do zamrażarki. Ja z obawy, by nie przypadło mi ostatnie naczynie do lodów, nie czekałem już na wystudzenie mleka i wstawiłem je gorące do zamrażarki. Po upływie półtorej godziny wróciliśmy z kolegą do lodówki i stwierdziliśmy, że moje mleko zamarzło, podczas gdy jego było gęstą cieczą niezamrożoną.

Spytałem mojego nauczyciela do fizyki, dlaczego tak się stało, a on mi odpowiedział, że to niemożliwe. Nazwał mój eksperyment «fizyką Mpemby».

Po jakimś czasie powtórzyłem eksperyment.

Wziąłem dwie zlewki po 50 cm³ każda, jedną napelniłem zimną wodą z kranu, a drugą gorącą wodą z bojlera i wstawiłem obie zlewki do zamrażalnika lodówki w pracowni. Po godzinie wróciłem, żeby zobaczyć, co się stało. Okazało się, że nie cała woda zamarzała, ale w zlewce, w której była uprzednio gorąca woda, było więcej lodu niż w tej, w której była zimna woda”.

Jak można było wyczytać w „Przekroju” (Irena Cieślińska, „Przekrój”, nr 08/2008) „efekt był znany już dużo wcześniej. Kartezjusz zanotował, iż doświadczenia wykazują, że «woda trzymana na ogniu przez czas długi zamarza rychlej niż inna». Jego doświadczenia potwierdzał też Francis Bacon, wzmiankując, że wodę nieco gorętszą łatwiej zamrozić niż całkiem zimną.”

Uważa się np., że na lodowisku lód tworzy się szybciej, gdy polewa się je ciepłą wodą.

Zastanówmy się, czy nauczyciel fizyki miał podstawy, by skwitować opowiadanie Mpemby określeniem „to niemożliwe”. Czym się kierował?

Przypomnijmy sobie artykuł o oszczędnym ogrzewaniu i o stygnięciu domu, gdy na zewnątrz panuje mróz. Autor artykułu Piotr Białas wyprowadza wzór ((10), *Foton* 104, s. 51), wyrażający temperaturę w domu $T(t)$ w chwili t , gdy na

zewnątrz utrzymuje się stała temperatura T_{out} ; na początku różnica temperatur między mieszkaniem a zewnątrz wynosi ΔT

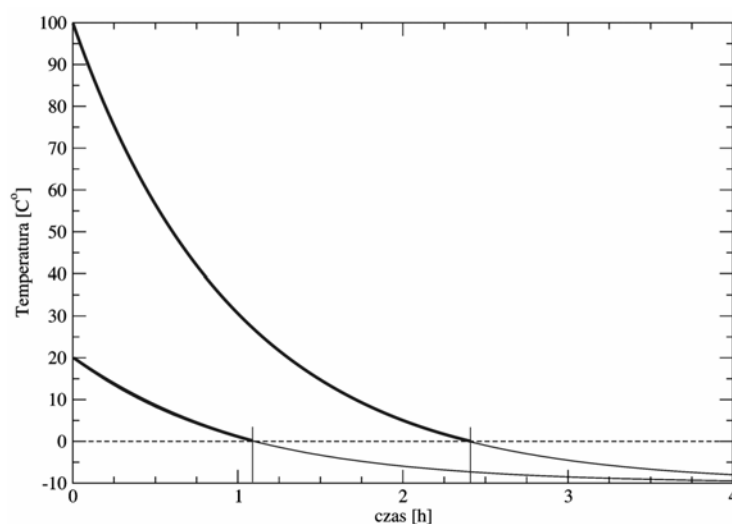
$$T(t) = \Delta T \cdot e^{-t/\tau_c} + T_{out} .$$

Wielkość τ_c jest czymś w rodzaju „stałej stygnięcia” i określa czas, po którym różnica temperatur wewnątrz i na zewnątrz domu zmniejszy się e razy.

$\tau_c = C/A$, gdzie C to pojemność cieplna domu, a A tzw. współczynnik przewodnictwa cieplnego.

Przypuśćmy, że nauczyciel wykorzystał ten sam model (wzór) do opisu stygnięcia wody w obu naczyniach. Założył, że temperatura w zamrażarce wynosi -10°C . Początkowe ΔT w każdym przypadku jest inne. Dla pierwszego kubka $\Delta T_c = 110^\circ\text{C}$, a dla drugiego $\Delta T_c = 30^\circ\text{C}$.

Krzywe stygnięcia dla kubków włożonych do zamrażalnika o temperaturze $T_{out} = -10^\circ\text{C}$ przedstawia poniższy wykres.



Krzywe stygnięcia wody w kubkach

Jeden kubek ma początkowo 100°C , drugi 20°C . Założyliśmy, że $\tau_c = 1$ godz. Czas osiągnięcia temperatury zamarzania 0°C można wyliczyć:

$$t_0 = \tau_c \ln(\Delta T/T_{out})$$

a więc rośnie logarymicznie z początkową temperaturą kubka.

Widzimy, że chłodny kubek szybciej osiąga temperaturę 0°C , a więc nauczyciel miał prawo sądzić, że chłodniejsza woda w kubku wystygnie szybciej.

Oczywiście przedstawione krzywe mają sens jedynie do osiągnięcia przez wodę temperatury 0°C . Jak wiemy, następnie temperatura wody w kubkach

pozostanie stała do czasu zamrożenia całości wody. Gdy woda zamieni się w lód, można będzie stosować podobny wzór do opisu chłodzenia kostki lodu.

Skoro jednak doświadczenie nie potwierdza naszego przypuszczenia opartego na – wydawałoby się – rozsądnym modelu (i tu nauczyciel popełnił błąd nie ufając wynikowi doświadczenia ucznia!), to znaczy, że przyjęty model jest błędny. Nie bierze pod uwagę jakichś ważnych czynników.

Być może stała stygnięcia τ_c nie jest w obu przypadkach taka sama. Do tej pory nie ma jednoznacznego wytłumaczenia zjawiska Mpemby.

- Wpływ na różnicę czasu zamrażania może mieć **zjawisko parowania wody** z naczynka. Parowanie zmienia pojemność cieplną wody C . Intensywniej paruje ciepła woda. Jest jej mniej, a zatem pojemność cieplna wody początkowo gorącej jest mniejsza, proces stygnięcia szybszy. Gdyby jednak zjawisko polegało tylko na ubytku ciepłej wody, efekt Mpemby nie powinien się zdarzyć, gdyby zapobiec parowaniu, na przykład przykrywając oba pojemniki szczelną pokrywką. A tak nie jest.
- **Osadzanie się szronu** na powierzchni naczynia z wodą ma efekt izolujący, zmienia współczynnik A . Zauważano, że dno ciepłego naczynia po wystawieniu na mróz pokrywa się cienką warstewką szronu (zmiana stałej A). Zaobserwowano jednak, że efekt Mpemby zachodzi także wtedy, gdy pojemniki z cieczami ustawia się na izolujących styropianowych podkładkach.
- Można rozważać **rolę konwekcji** w przepływie ciepła z naczynek do zamrażalnika. Oczywiście prądy konwekcyjne są znacznie silniejsze w przypadku gorącej cieczy. Wtedy należy się spodziewać wpływu kształtu naczynek na zjawisko.
- Rozważano wpływ wcześniejszego zagotowania cieczy na **rozpuszczone w wodzie gazy**. Zauważono, że nieodgazowana woda zamraża wolniej niż odgazowana w procesie gotowania. Doświadczenia nie potwierdziły tej hipotezy w stu procentach.
- Wiadomo, że **sole mineralne rozpuszczone w wodzie**, m.in. węglany wapnia i magnezu (twarda woda), obniżają jej temperaturę zamrażania, a w procesie podgrzewania ich część zostaje wytrącona. Wpływ tej hipotezy na efekt Mpemby też nie został udokumentowany.
- Rozważa się też możliwość **zjawiska przechłodzenia wody**. Woda nie składa się z pojedynczych cząsteczek, lecz z ich zlepków, agregatów; jest możliwe, że w wodzie ogrzanej agregaty te rozpadają się, a przy ochłodzeniu gorącej wody agregaty te tworzą się dopiero po pewnym czasie – zwiększałoby to ruchliwość cząsteczek takiej wody i w efekcie przyspieszałoby wymianę ciepła z otoczeniem.

Efekt Mpemby można bardzo łatwo potwierdzić eksperymentalnie w domowych warunkach. Do zamrażalnika należy włożyć dwa pojemniki (jeden z ciepłą, drugi z zimną wodą), woda będzie się ochładzać. Kiedy temperatura spadnie do 0°C, woda zacznie zmieniać swój stan skupienia z ciekłego w stały.

Należy zbadać, dla której wody ten proces zajdzie szybciej i odkryć, jakie będą tego powody. Aby to zrobić, trzeba dla obu pojemników z wodą zapewnić te same warunki stygnięcia, czyli

- temperaturę w zamrażalniku,
- ilość wody w pojemnikach,
- rozmiar, kształt i materiał pojemników,
- otoczenie gazowe wewnątrz komory zamrażalnika, czyli najlepiej ten sam zamrażalnik.

Redakcja zachęca do przysyłania wyników doświadczeń. Opublikujemy najlepsze prace.

Informujemy Czytelników, iż w Internecie na temat efektu Mpemby jest bardzo obfita literatura. Zachęcamy do samodzielnych badań i późniejszej konfrontacji z wynikami innych.

Karta-całostka wydana z okazji Roku Astronomii (patrz artykuł „Astronomia w filatelistyce”, s. 58).

