

Żarówka modelem efektu cieplarnianego?

Paweł TURKOWSKI*

* Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Oświetlona przez Słońce czarna, doskonale przewodząca ciepło kula lub żarzące się wolframowe włókno żarówki zamknięte w pozbawionej powietrza szklanej bańce mogą być wykorzystane w celach dydaktycznych jako najprostsze modele opisujące temperaturę Ziemi.

Modele w fizyce

Modele stanowią niezastąpioną pomoc w nauczaniu przedmiotów ścisłych. Modelowanie to także metoda badań stosowana między innymi w fizyce, polegająca na zastąpieniu badanego przedmiotu przez inny podobny do niego „przedmiot”, który jest prostszy i łatwiej dostępny w badaniu. Nazywając model „przedmiotem”, ujeliśmy to słowo w cudzysłów, ponieważ realizacja modelu może przybierać różne, niekoniecznie materialne, formy.

Wyróżnimy tu trzy sposoby zastąpienia skomplikowanego obiektu przedmiotem do niego podobnym. Pierwszym z nich jest użycie miniatURY lub powiększenia badanego obiektu. Dla przykładu, oświetlony z jednej strony globus może służyć za pomoc dydaktyczną wyjaśniającą istnienie pór roku jako następstwo ruchu obiegowego Ziemi wokół Słońca i nachylenia ziemskiej osi do płaszczyzny orbity wokółsłonecznej. Model nazwiemy mechaniczno-geometrycznym, gdy badany obiekt wyobrażamy sobie jako układ punktów, kul, ośrodków lub wyobrażenie to przedstawiamy w formie rysunku. Modele tego typu pozwalają w prosty sposób wywnioskować szereg zjawisk jakościowo. Jeśli posługujemy się układem równań, opisującym właściwości badanego obiektu, to taki model nazwiemy matematycznym. Układy równań występujących w modelach matematycznych są niekiedy skomplikowane i rozwiązanie ich jest możliwe jedynie metodami numerycznymi. Dobrym przykładem skuteczności takich metod są krótkoterminowe, dwu- lub trzydniowe, numeryczne prognozy pogody.

Budowanie modelu matematycznego tak, by spełniał swoją funkcję, a zarazem był stosunkowo prosty, jest rezultatem pewnego kompromisu. Czasem trzeba posłużyć się modelem bardzo uproszczonym, by dojść do zrozumienia wyników pomiarów i w pewien sposób je uporządkować.

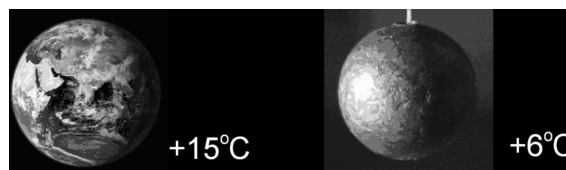
Najprostszy matematyczny model temperatury globalnej Ziemi

Przypomnijmy dwa fakty doświadczalne. Średnia z pomiarów temperatury powietrza i powierzchni oceanów, wykonywanych w wielu punktach Ziemi leżących we wszystkich strefach klimatycznych na półkuli dziennej i nocnej, wynosi około $+15^{\circ}\text{C}$. Ponadto w XX wieku ta średnia temperatura wzrosła o około $\frac{3}{4}$ stopnia. Średnią temperaturę Ziemi w powyższym sensie nazwiemy temperaturą globalną, a obserwowany od początku XX wieku systematyczny jej wzrost to globalne ocieplenie. Pojawiają się w związku z tym przynajmniej dwa pytania: dlaczego temperatura

globalna ma taką, a nie inną wartość oraz jak ta temperatura będzie się zmieniać w ciągu kolejnych stu lat? Odpowiedzi można szukać, analizując odpowiednie modele. Zastanówmy się nad pierwszym, prostszym pytaniem dotyczącym wyjaśnienia aktualnej wartości średniej temperatury Ziemi.

Rozpatrywany tu model był przedmiotem jednego z zadań etapu wojewódzkiego XXV Olimpiady Fizycznej.

Opiszemy matematyczny model temperatury globalnej, oparty na następujących założeniach: Ziemia otrzymuje energię jedynie od Słońca, Ziemia jest ciałem doskonale czarnym (absorbując całkowicie padające nań promieniowanie), doskonale przewodzi ciepło (ma równomierną temperaturę), oddaje energię w postaci promieniowania (w zakresie podczerwieni). Krótko mówiąc, w modelu tym zakładamy, że Ziemia zachowuje się jak oświetlona przez Słońce czarna kula, wykonana z doskonale przewodzącego ciepło materiału (rys. 1).



Rys. 1

Pierwszym krokiem w konstrukcji naszego modelu jest sformułowanie równania bilansu energetycznego, opisującego stan stacjonarny. Dla kuli z naszego modelu w odpowiednio długim czasie t spełnione jest równanie

$$E = Q,$$

gdzie E to energia promieniowania dostarczona kuli przez Słońce w czasie t , natomiast Q to energia wypromieniowana przez kulę w tym czasie. Energia dostarczona kuli przez Słońce w czasie t jest równa iloczynowi: S_1 – pola powierzchni przekroju kuli kołem wielkim, stałej słonecznej L (czyli energii, jaką poza atmosferą ziemską promieniowanie słoneczne przenosi w ciągu jednej sekundy przez jednostkę powierzchni ustawionej prostopadle do kierunku padania promieni słonecznych, w średniej odległości Ziemia–Słońce) oraz czasu t :

$$E = S_1 L t.$$

Energia wypromieniowana przez kulę w czasie t :

$$Q = S_2 \sigma T^4 t,$$

gdzie S_2 – pole powierzchni kuli, σ – uniwersalna stała Stefana–Boltzmann, T – temperatura kuli w skali bezwzględnej. Występujący tu iloczyn σT^4 to ilość wypromieniowanej energii przez 1 m^2 powierzchni ciała

doskonale czarnego w ciągu jednej sekundy (prawo Stefana–Boltzmana). Równanie bilansu energetycznego przyjmuje zatem postać

$$S_1 L t = S_2 \sigma T^4 t.$$

Po prostych przekształceniach i podstawieniu wartości stałej słonecznej L oraz stałej Stefana–Boltzmana σ otrzymujemy

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1366 \text{ W/m}^2}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4}} = 279 \text{ K} = 6^\circ \text{C}.$$

Nasz wynik odbiega o 9 stopni od zmierzonej wartości temperatury globalnej Ziemi. Czy jest to duża, czy mała różnica? Dla wyrobienia sobie zdania na ten temat porównajmy globalną temperaturę zmierzoną na powierzchni planety Wenus ($+464^\circ\text{C}$) z temperaturą obliczoną na bazie naszego modelu ($T = +54^\circ\text{C}$ dla $L = 2,6 \text{ kW/m}^2$). Z kolei dla powierzchni Marsa średnia zmierzona temperatura -63°C jest niższa od temperatury obliczonej modelowo ($T = -47^\circ\text{C}$ dla średniej wartości stałej słonecznej, dla Marsa równej $0,59 \text{ kW/m}^2$).

Można powiedzieć, że jak na model, który uprościliśmy do granic możliwości, dla przypadku kuli ziemskiej otrzymaliśmy zaskakująco dobry wynik. Pominięte w modelu liczne i skomplikowane efekty szczęśliwie skompensowały się nawzajem. Natomiast nasz model zastosowany do innych planet skalistych pracuje gorzej. Szczególnie w przypadku Wenus otoczonej gęstą atmosferą, złożoną prawie wyłącznie z CO_2 , właściwie zupełnie zawodzi.

Nasz skrajnie prosty model pozwala jednak rozstrzygnąć pewną wątpliwość: czy ilość produkowanej aktualnie przez ludzkość energii jest w stanie zmodyfikować w istotny sposób wartość obliczonej przez nas temperatury globalnej? Przyjmijmy, że ilość energii uzyskanej przez spalanie węgla, paliw płynnych i gazowych oraz działalność elektrowni jądrowych na całym świecie nie przekracza $5,7 \cdot 10^{20} \text{ J}$ rocznie. Stanowi to około 0,0001 część energii uzyskanej przez Ziemię w naszym modelu ze strony Słońca. Jak łatwo sprawdzić, prowadzi to do podwyższenia wyniku obliczonej temperatury globalnej Ziemi zaledwie o około 0,007 K. Zatem to nie ciepło wydzielane podczas spalania paliw jest odpowiedzialne za rozbieżność pomiędzy wynikiem pomiarów temperatury globalnej a temperaturą przewidywaną przez model. Bardziej realistyczny model temperatury globalnej musi uwzględnić przynajmniej jeszcze jeden element układanki – atmosferę planety.

Włókno żarówki otoczone lustrzaną powierzchnią jako model Ziemi z atmosferą

Traktując Ziemię jako doskonale czarną kulę, nie musieliśmy zaprzętać sobie głowy ani tym, z czego jest zbudowana, ani jakie mechanizmy transportu energii, oprócz promieniowania, odpowiadają za jej temperaturę. Taki model jest bardzo przejrzysty. Na temperaturę kuli nie wpływa nawet jej rozmiar. Wystarczy znajomość wartości stałej słonecznej oraz

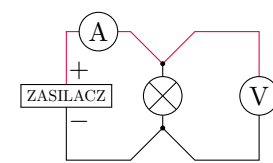
znajomość prawa Stefana–Boltzmana. Jeżeli chcemy uwzględnić wpływ atmosfery na temperaturę globalną, to musimy brać pod uwagę zarówno jej specyficzny skład, jak i różne mechanizmy transportu energii. W celach dydaktycznych można użyć prostego modelu mechaniczno-geometrycznego.

Takie matematyczne modele budowane dla celów dydaktycznych opisano w wielu źródłach i warto je prześledzić. Pomijając katastroficzne przypadki atmosfery zapyłonej, np. w wyniku wojny nuklearnej, modele tego typu przewidują temperaturę Ziemi wyższą niż w przypadku Ziemi pozbawionej atmosfery i zbliżoną do temperatury obserwowanej. Jak zrozumieć, skąd bierze się ten wzrost temperatury? Autorzy, nie ukrywając, że problem w szczególności jest bardzo złożony, dają nam niekiedy propozycje uproszczonych odpowiedzi na takie pytanie: powierzchnia Ziemi otrzymuje energię nie tylko bezpośrednio od Słońca, ale także dodatkową porcję od atmosfery, która wcześniej różnymi sposobami przechwyciła energię słoneczną.

Wyobraźmy sobie atmosferę jako rodzaj filtru o sferycznym kształcie, który dobrze przepuszcza światło słoneczne docierające z zewnątrz, ale promieniowanie podczerwone Ziemi silnie pochłania, by następnie wypromieniować uzyskaną energię w przestrzeń kosmiczną, częściowo zwracając ją ku Ziemi. Otrzymamy w ten sposób jakościowe wyjaśnienie efektu wzrostu temperatury powierzchni Ziemi otulonej atmosferą. Do doświadczalnego przebadania wpływu ograniczenia emisji energii na temperaturę promieniującego ciała proponujemy posłużyć się żarówką z włóknem wolframowym oraz kawałkiem folii aluminiowej. Na pierwszy rzut oka żarząca się żarówka nie przypomina zupełnie kuli ziemskiej. A jednak temperatura wolframowego włókna jest taka, a nie inna, właśnie dzięki bilansowaniu się energii dostarczonej z zasilacza z energią przez nie wypromieniowaną, podobnie jak w rozpatrywanym powyżej modelu kuli oświetlonej przez Słońce. Nasz model ma tę zaletę, że w prosty sposób umożliwi badanie wpływu obecności atmosfery, którą symulować będziemy, używając osłon z folii aluminiowej.

Za pomocą żarówek ilustrować można prawa rządzące przepływem prądu elektrycznego w obwodach prądu stałego – zarówno w formie zadań, jak i pokazów. Żarówka jest też zasadniczym elementem szkolnego pirometru optycznego. W naszym modelu Ziemi otoczonej atmosferą połączymy te dwa zastosowania, budując odpowiedni obwód elektryczny z żarówką i kontrolując temperaturę jej włókna, podobnie jak w pirometrze. Elementy układu pomiarowego to: żarówka próżniowa z włóknem wolframowym niskonapięciowa (np. 13,5 V/0,18 A), oprawka żarówki z przyłutowanymi do jej zacisków dwoma parami przewodów, zasilacz stabilizowany prądu stałego o regulowanym od zera napięciu, woltomierz i miliamperomierz cyfrowy, folia aluminiowa oraz termometr pokojowy.

Centralną część układu pomiarowego (rys. 2) stanowi żarówka z włóknem wolframowym, oznaczona na schemacie symbolem \otimes . Do zacisków oprawki żarówki dołączono



Rys. 2

dwie pary przewodów. Jedna para przewodów wraz z woltomierzem tworzy obwód pomiaru napięcia. Natomiast po lewej stronie schematu widzimy obwód zasilania żarówki, który tworzą zasilacz i szeregowo dołączony miliamperomierz.

Wstępne pomiary polegają na zasilaniu żarówki napięciami stałymi o dwu różnych wartościach, obliczeniu oporów włókna wolframowego oraz oszacowaniu uzyskanej temperatury przez żarzące się włókno. Następnie błyszczącą folią aluminiową otulamy bańkę świecącej się żarówki i obserwujemy niewielki wzrost oporu włókna, świadczący o kilkustopniowym wzroście jego temperatury. Oświetlenie włókna czerwonym wskaźnikiem laserowym daje podobny efekt. Uzyskany wynik interpretujemy jako wzrost temperatury równowagowej włókna zasilanego stałym napięciem, po ograniczeniu radiacyjnych strat energii. Przez analogię wyjaśniamy, że w przypadku Ziemi podobną do folii rolę pełni atmosfera ziemiska, ponieważ

jej przepuszczalność dla fal elektromagnetycznych promieniowanych przez Ziemię w zakresie średniej podczerwieni jest niewielka. W pełnej wersji artykułu dostępnej na stronie deltami.edu.pl przedstawiamy bardziej szczegółowo przebieg pomiarów i przykładowe wyniki.

Na koniec uwaga terminologiczna. Wpływ atmosfery ziemskiej na temperaturę globalną poprzez ograniczenie strat radiacyjnych nazywa się efektem cieplarnianym. Nazwa ta jest nieco myląca, ponieważ przyczyny podwyższania się temperatury w szklarni („cieplarni”) różnią się od czynników wywołujących efekt cieplarniany w atmosferze. W tym pierwszym przypadku mamy do czynienia głównie z ograniczeniem ucieczki powietrza o wyższej temperaturze na drodze konwekcji, w drugim natomiast z ograniczeniem wypromieniowania energii z powierzchni Ziemi wprost w przestrzeń kosmiczną. Nasz model z żarówką osłoniętą folią aluminiową jest bliższy atmosferycznemu efektowi cieplarnianemu.



Przygotował Dominik BUREK



Zadania

M 1681. Wierzchołki trójkąta równoramiennego oraz środek opisanego na nim okręgu leżą na czterech różnych bokach kwadratu. Wyznacz kąty tego trójkąta. Rozwiązanie na str. 15

M 1682. Wyznacz wszystkie funkcje $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ takie, że dla dowolnych liczb rzeczywistych x, y zachodzi równość

$$f(xy) = f(x)y^2 + f(y).$$

Rozwiązanie na str. 9

M 1683. Dla liczb wymiernych x, y, z wiemy, że $x^2 + y^2 + z$, $x^2 + y + z^2$ oraz $x + y^2 + z^2$ są całkowite. Udowodnij, że $2x$ jest liczbą całkowitą.

Rozwiązanie na str. 16

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1029. Większość meteorytów ulega całkowitemu spaleni w atmosferze. Część z nich zderza się jednak z powierzchnią Ziemi, powodując powstanie krateru. Oszacuj, jak średnica D powstającego krateru zależy od energii E uderzającego ciała, jeśli dominującym procesem podczas tworzenia krateru jest kruszenie i deformacja podłoża. Załóż, że kruszenie i trwałe odkształcenia podłoża następują, gdy poddane jest ono ciśnieniu przekraczającemu wartość Y . Rozwiązanie na str. 18

F 1030. Spadając bez spadochronu w atmosferze ziemskiej, człowiek osiąga graniczną prędkość $v_z \approx 200$ km/h. Oszacuj, ile wynosiłaby graniczna prędkość v_w przy podobnym skoku na Wenus. Przy powierzchni Wenus gęstość jej atmosfery wynosi $\rho_w = 67$ kg/m³, przyspieszenie grawitacyjne $g_w = 8,87$ m/s². Na Ziemi odpowiednie wartości wynoszą $\rho_z = 1,2$ kg/m³ i $g = 9,81$ m/s².

Wskazówka. Siła oporu działająca na ciało poruszające się z prędkością v w gazie o gęstości ρ wynosi $F_{op} = \frac{1}{2}c\rho v^2 S$, gdzie S jest polem powierzchni ciała prostopadłej do prędkości, a c współczynnikiem zależnym od kształtu ciała. Rozwiązanie na str. 19

