

## Gruba soczewka

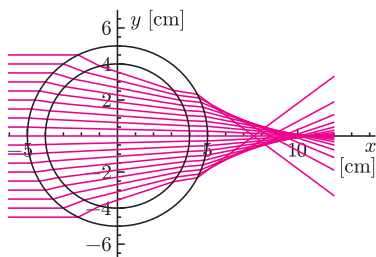
Filip CZERMIŃSKI, Marlena MAĆKOWIAK, Antoni NUSZKIEWICZ, Kacper RACIBORSKI, Paweł SUCHOMSKI, Paweł SZCZYPKOWSKI, Jan BIHAŁOWICZ, Piotr PODLASKI

Złośliwy chochlik w numerze 10/2015 przekreślił nazwisko pana Antoniego Nuszkiewicza. Przepraszamy. Redakcja



**Rozwiązanie zadania M 1476.** Zauważmy, że suma liczb napisanych na tablicy zmienia się w ciągu ruchu o  $2a + 2b - 2c$ , czyli o liczbę parzystą. Stąd parzystość sumy liczb napisanych na tablicy nie zmienia się, więc nie możemy uzyskać trójki 20, 21, 24.

Ten niezmiennik nie rozstrzyga odpowiedzi na drugie pytanie, ale nietrudno sprawdzić, że wartość  $a^2 + b^2 + c^2 - 2(ab + bc + ca)$  nie zmienia się przy zamianie  $c$  na  $2a + 2b - c$ . Ponieważ dla trójki 11, 12, 13 ta wartość wynosi  $-428$ , a dla trójki 20, 21, 23 wynosi ona  $-1356$ , to również tej trójki nie możemy uzyskać na tablicy.



Rys. 1. Symulacja pokazująca bieg promieni przez wypełnioną wodą szklaną butelkę.



Fot. 1

Butelka wypełniona cieczą może działać jak soczewka. Niektórzy sądzą, że taka butelka może być niebezpieczna, jeśli zostanie pozostawiona na stole w słoneczny dzień. Czy można użyć takiej „soczewki” do wywołania samozapłonu różnych substancji? W listopadzie 2012 roku w tygodniku *Newsweek Polska* pojawiła się interesująca wiadomość – w sklepie monopolowym w Burnsville w amerykańskim stanie Minnesota wybuchł pożar. Informacja ta nie dotarłaby z pewnością aż za ocean, gdyby nie fakt, że ogień został wzniecony przez wysokoprocentowy alkohol. Oczywiście pośrednio – tekturowa konstrukcja, na której ustawione były butelki z wódką, została podpalona przez promienie słoneczne wpadające prosto przez okna sklepu, a następnie skupione przez butelki wypełnione przezroczystym trunkiem. Cała sytuacja została udokumentowana przez kamery sklepowe. Owa informacja prasowa wywołała wśród polskich internautów, zaznajomionych z treścią artykułu, falę wątpliwości wyrażoną w komentarzach. *Czy to możliwe?* – pytali. A przecież łatwo to sprawdzić w warunkach domowych, trzeba tylko przypomnieć sobie to i owo ze szkolnych lekcji fizyki.

W naszym zagadnieniu butelka spełnia rolę grubej soczewki, która skupia w określonym obszarze oświetlając ją promienie światła słonecznego. Owe promienie nie skupiają się w jednym punkcie (jak miałyby to miejsce w przypadku idealnej, cienkiej soczewki) m.in. z powodu aberracji sferycznej, czyli faktu, iż soczewka, której rozmiary liniowe są porównywalne z ogniskową, nie może być przybliżana przez paraboliczne powierzchnie załamujące (innymi słowy, nie można stosować przyosiowego przybliżenia do opisu biegu promieni). Znając prawo załamania na granicy ośrodków,

$$\frac{\sin \theta_{\text{zał}}}{\sin \theta_{\text{pad}}} = \frac{n_1}{n_2},$$

łącznie kąt padania  $\theta_{\text{pad}}$  i kąt załamania  $\theta_{\text{zał}}$  ze współczynnikami załamania ośrodków,  $n_1$  i  $n_2$ , nietrudno przygotować symulację biegu promieni światła przez wypełnioną wodą szklaną butelkę o danej grubości ścianek (rys. 1).

Dzięki skupieniu światła za pomocą grubej soczewki uzyskujemy duże natężenie oświetlenia w pewnym obszarze znajdującym się za butelką. Jeżeli umieścimy tam powierzchnię zdolną do absorbowania promieniowania, to padające na nią światło będzie się częściowo od niej odbijać, a pozostała jego część zostanie przez tę powierzchnię zaabsorbowana i przekształcona w energię cieplną. W wyniku takiego ogrzewania po pewnym czasie powierzchnia może osiągnąć temperaturę samozapłonu.

Skoro wiemy już co nieco o teorii rozważanego zjawiska, możemy przystąpić do opisu naszych doświadczeń. Zbadaliśmy dzięki nim wpływ parametrów rozważanego układu fizycznego – rozmiaru, grubości ścian butelki oraz zawartości butelki – na możliwość ogrzania i podpalenia powierzchni przez skupiane za pomocą tego układu światło.

Aby sprawdzić, czy możliwe jest podpalenie powierzchni za pomocą mocnego światła słonecznego (odpowiadającego strumieniowi mocy około  $0,5 \text{ kW/m}^2$ ) oraz butelki wypełnionej cieczą, przeprowadziliśmy doświadczenie przedstawione na fotografii 1. Na papierze gazetowym zamalowaliśmy czarnym markerem prostokąt, co zwiększyło ilość energii pochłanianej przez papier, i skierowaliśmy na niego światło skupione przez karafkę z wodą. Już po chwili pojawił się dym, a po kilku sekundach gazeta zapłonęła.

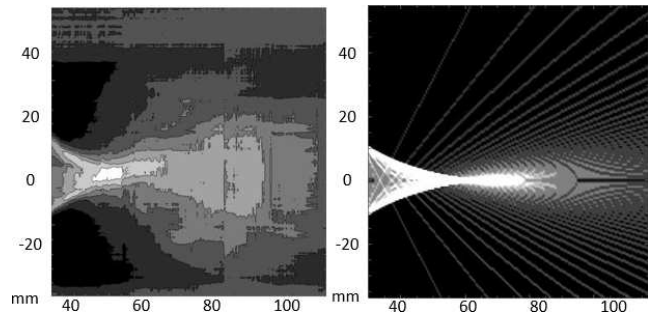
Pozostało zbadać, jakie parametry skupiającej światło butelki są kluczowe dla opisywanego zjawiska. Układ doświadczalny składał się z własnoręcznie przez nas

wykonanego zwierciadła parabolicznego i żarówki halogenowej. Wychodzące ze zwierciadła niemal równoległe promienie oświetlały butelkę, której obraz znajdował się na ekranie wykonanym z papieru milimetrowego. Skupianie załamanych przez butelkę promieni badaliśmy, wykonując zdjęcia nieoświetlanej strony ekranu, na którym widzieliśmy obraz naczynia. Ekran znajdujący się za butelką przesuwaliliśmy w zakresie kilkudziesięciu milimetrów z dokładnością rzędu 0,5 mm.

Wykonane zdjęcia złożyliśmy w film, a następnie stworzyliśmy jego „przekrój podłużny” na danej wysokości, przez wszystkie klatki filmu, widoczny na rysunku 2.

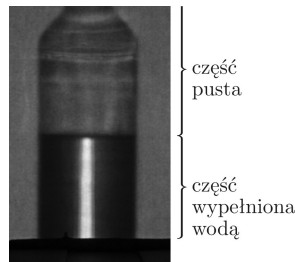


Fot. 2. Układ doświadczalny do badania wpływu własności butelki i wypełniającej ją cieczy na skupianie promieni świetlnych.

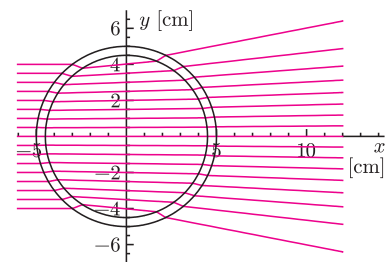


Rys. 2. Mapy natężenia światła za butelką. Porównanie wyników eksperymentu (lewy panel) i naszej symulacji (prawy panel).

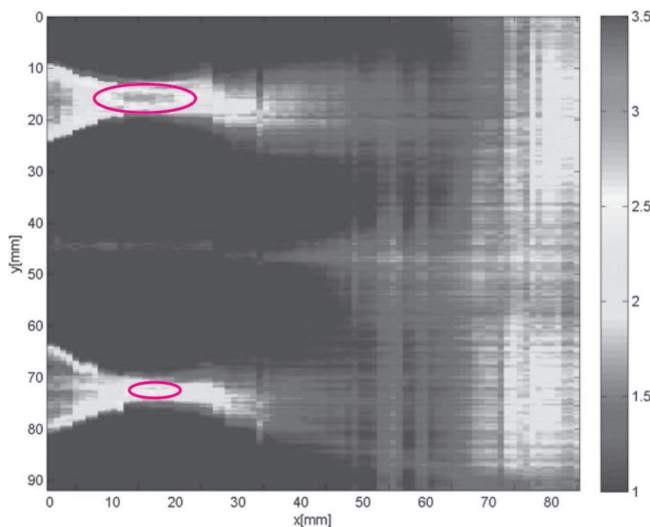
W symulacji uwzględniliśmy równania Fresnela i prawo Lamberta–Beera, pozwalające obliczyć spadek natężenia wiązki występujący przy przechodzeniu przez butelkę oraz ciecz. Uzyskana przez nas zgodność wyników doświadczenia i symulacji jest wprost zdumiewająca.



Fot. 3. Obraz na ekranie za butelką wypełnioną do połowy cieczą.



Rys. 3. Symulacja biegu promieni światła dla pustej butelki.

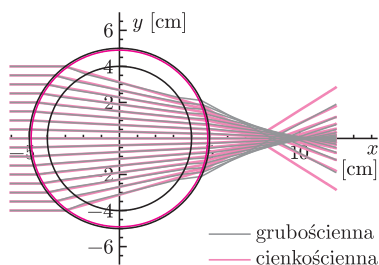


Rys. 4. Mapa natężenia oświetlenia za butelką cienko- i grubościenną. Kolorowymi elipsami zaznaczono obszary, w których względna jasność osiąga wartości większe niż 2,5.

Eksperyment wykonaliśmy z butelkami o różnych parametrach. Aby zobaczyć, jak różni się zachowanie światła przy przejściu przez butelkę pustą i wypełnioną cieczą, wykonaliśmy doświadczenie polegające na oświetleniu butelki wypełnionej wodą do połowy wysokości.

Nasza butelka skupiała światło jedynie na obszarze znajdującym się za jej częścią wypełnioną wodą. Co więcej, jej górna część rozpraszała padające na nią światło. Jest to zgodne z wykonaną przez nas symulacją, w której przyjęliśmy, że wartości współczynnika załamania dla obszarów wewnątrz i poza butelką są jednakowe.

Aby zbadać wpływ grubości ścianki butelki na opisywane przez nas zjawisko, wykorzystaliśmy dwie butelki o tym samym kształcie i rozmiarach – jedną plastikową, a drugą szklaną. Ponieważ współczynniki załamania dla szkła i bezbarwnego plastiku są praktycznie jednakowe, mogliśmy porównać owe „grube soczewki” i zaobserwowane różnice (lub ich brak) przypisać jedynie zmianie grubości ścianek.



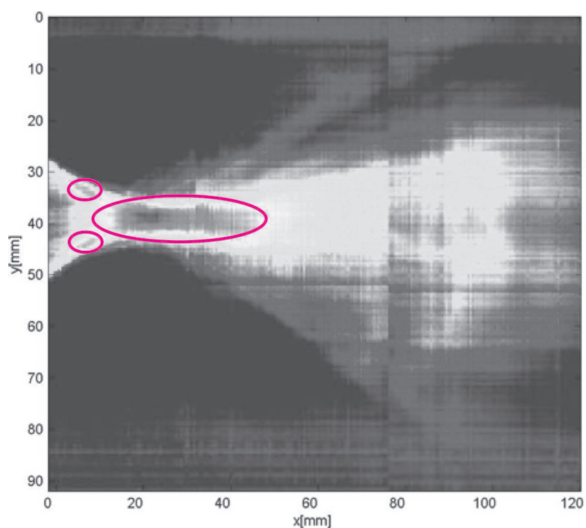
Rys. 5. Symulacja biegu promieni przez butelkę cienko- i grubościenną.

Podobnie jak poprzednio, wyznaczyliśmy przestrzenny rozkład natężenia promieniowania przedstawiony na rysunku 4. Odczytaliśmy z niego, że maksymalne natężenie jest większe w przypadku butelki cienkościennej. W wytłumaczeniu tego zjawiska pomocna okazała się nasza podstawowa symulacja i porównanie biegu promieni przechodzących przez butelkę cienko- i grubościenną przedstawione na rysunku 5.

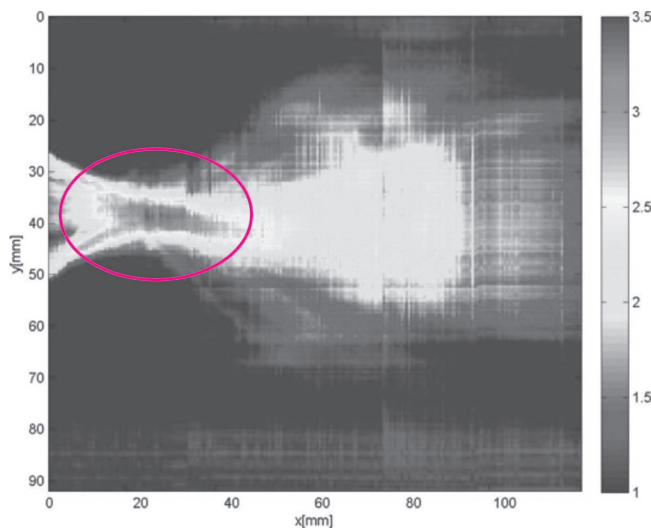
Promienie, które przeszły przez butelkę cienkościenną, przecinają się bliżej butelki niż te, które zostały skupione przez butelkę grubościenną, więc zdolność skupiająca tej pierwszej jest większa. Wniosek z tego taki, że aby skutecznie podpalić powierzchnię, należy używać butelek o jak najcieńszych ściankach.

Następnym parametrem butelek, którego wpływ na zjawisko udało nam się zmierzyć, była średnica butelki. W doświadczeniu wykorzystaliśmy dwie butelki o różnych średnicach, ale o tym samym kształcie oraz stosunku grubości ścianek do średnicy. Wyniki przedstawione są na rysunkach 6 i 7. Widzimy, że maksymalne natężenie oświetlenia w obu przypadkach jest jednakowe.

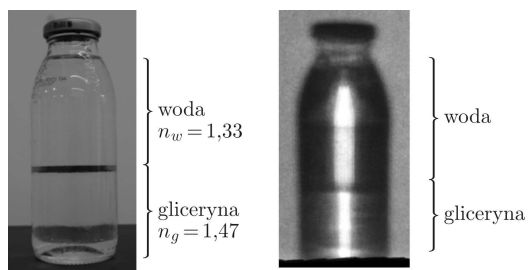
Kolejnym czynnikiem wpływającym na skupianie światła przez butelkę jest rodzaj wypełniającej ją cieczy. Aby zbadać tę zależność, utworzyliśmy warstwy dwóch przezroczystych, bezbarwnych cieczy o różnych współczynnikach załamania – wody oraz gliceryny.



Rys. 6. Mapa oświetlenia za butelką o mniejszej średnicy ( $R_1 = 54,85$  mm). Kolorowymi elipsami zaznaczono obszary, w których względna jasność osiąga wartości większe niż 2,5.



Rys. 7. Mapa oświetlenia za butelką o większej średnicy ( $R_2 = 60,80$  mm). Kolorowymi elipsami zaznaczono obszary, w których względna jasność osiąga wartości większe niż 2,5.



Fot. 4. Butelka z gliceryną i wodą oraz jej obraz na ekranie.

Na zdjęciu ekranu za butelką (fot. 4) widzimy, że gliceryna skupia światło efektywniej niż woda. Jest to spowodowane większym absolutnym współczynnikiem załamania światła.

Opisane tu doświadczenia stanowią tylko część naszych badań zjawiska skupiania światła przed butelką wypełnioną cieczą. W dalszych eksperymentach zbadaliśmy także wpływ barwy ścianek butelki na maksymalne natężenie skupianego światła oraz wykonaliśmy również doświadczenia z cieczami o różnych jasnościach i mętnościach. Zachęcamy Czytelników do wymyślenia jeszcze innych sposobów lepszego zrozumienia opisywanego zjawiska.

Jakie wnioski płyną z naszych doświadczeń? Przekonaliśmy się, że historia z Burnsville bynajmniej nie nosi znamion kaczki dziennikarskiej. Po drugie, stwierdziliśmy, że wbrew powszechnemu przekonaniu leżąca gdzieś w lesie czy na łące pusta butelka bez denka pożaru spowodować nie może (co, rzecz jasna, nie może być usprawiedliwieniem dla śmiecenia; trzeba też pamiętać, że niektóre butelki mają zakrzywione denka, które doskonale się sprawdzą w roli soczewek skupiających!). A po trzecie, i chyba najważniejsze: mieliśmy wiele radości z wykonywania eksperymentów.