

Autorzy stanowią drużynę biorącą udział w Turnieju Młodych Fizyków, a tekst artykułu to skrócone rozwiązanie jednego z turniejowych problemów. Kolejny artykuł oraz więcej informacji o Turniejach przedstawimy w następnym numerze.

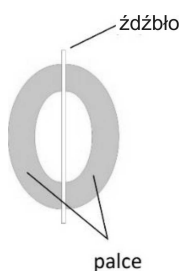
Gdy trawa śpiewa

Filip CZERMIŃSKI, Marlena MAĆKOWIAK, Antoni NASZKIEWICZ, Kacper RACIBORSKI, Paweł SUCHOMSKI, Paweł SZCZYTKOWSKI

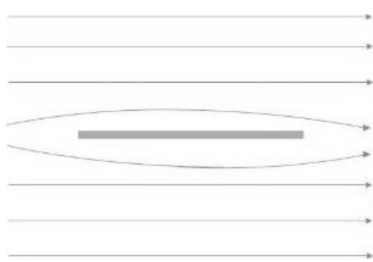
Zapewne każdy z Czytelników, będąc dzieckiem, uczył się grać na źdźble trawy, a zabawa ta niejednokrotnie urozmaicała spacerów na świeżym powietrzu. Dlaczego jednak źdźbło wydaje tak donośne dźwięki, gdy na nie dmuchnąć, oraz od czego zależą parametry tego dźwięku? Spróbujemy odpowiedzieć na to pytanie, wykonując kilka prostych doświadczeń.



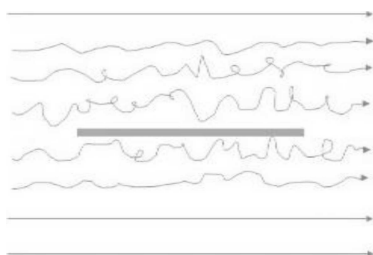
Fot. 1. Ustawienie dłoni do gry na trawie.



Rys. 1. Schematyczny rysunek źdźbła trawy i okalających je palców podczas gry na trawie.



Rys. 2. Schemat przepływu laminarnego.



Rys. 3. Schemat przepływu turbulentnego.

Aby wydobyć dźwięk ze źdźbła trawy, paska papieru lub folii należy umieścić je między kciukami (fot. 1) tak, żeby „instrument” był napięty (rys. 1), a następnie, zbliżywszy do niego usta (ale nie dotykając), dmuchnąć w kierunku źdźbła.

Złożone w wyżej opisany sposób palce naciągają trawę z pewną siłą. Dla cienkich pasków oraz źdźbeł naciąg jest jednorodny na całej szerokości paska. Nasze usta, dmuchając w instrument, wysyłają strumień powietrza w kierunku źdźbła. W tej sytuacji powietrze może opływać źdźbło na jeden z dwóch sposobów: przesuwając się w przepływie *laminarnym* lub *turbulentnym*. W przepływie laminarnym płyn (czyli w naszym przypadku powietrze) przepływa w równoległych warstwach, bez zakłóceń między warstwami. Nie powoduje to ruchu trawy, pozostaje ona w spoczynku i nie uzyskujemy żadnego dźwięku. W przepływie turbulentnym (inaczej: nieustalonym) prędkość płynu przepływającego przez dane miejsce zmienia swoją wartość i kierunek – tworzą się też wiry i inne nieregularności. W tym przypadku zachodzi również transfer energii. Prędkość przepływu, przy której ruch laminarny przechodzi w turbulentny, można dla określonego płynu i warunków przepływu oszacować. Wykorzystuje się w tym celu fakt, że liczba Reynoldsa dana wzorem

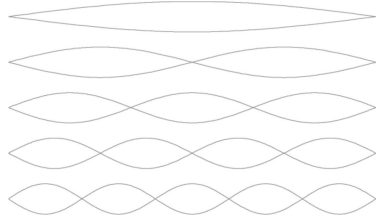
$$Re = \frac{v\rho\ell}{\eta},$$

gdzie v jest prędkością przepływu, ρ i η – odpowiednio gęstością i lepkością płynu, ℓ określa zaś charakterystyczny rozmiar opływającego ciała, jest dla przepływu laminarnego znacznie mniejsza od jedności. Dla powietrza opływającego źdźbło odpowiada to prędkości rzędu milimetrów na sekundę. Prędkości, z jakimi mamy do czynienia w przypadku gry na trawie, są niewątpliwie znacznie większe od tej prędkości granicznej, mamy zatem do czynienia z przepływem turbulentnym (rys. 3).

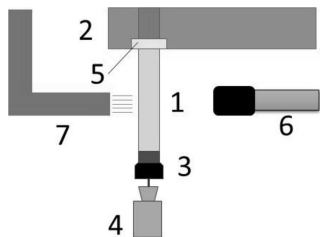
W wyniku turbulentnego przepływu powietrza pojawiają się zmienne w czasie różnice ciśnień po obu stronach źdźbła, co daje nam pewną niezerową, zmienną w czasie, siłę działającą na trawę i pobudzającą ją do drgań. Ponieważ położenia końców źdźbła są ustalone, a naciąg źdźbła możemy przyjąć za stały wzdłuż jego długości, możemy modelować je jako zamocowaną na końcach szeroką strunę. Struna taka może drgać z pewnymi określonymi częstotliwościami własnymi danymi wzorem

$$(*) \quad f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

gdzie L jest długością struny, μ – gęstością liniową struny, F siłą naciągu, n jest zaś dowolną liczbą naturalną. Z wielu częstotliwości pobudzających strunę do drgań wzmacniane są – dzięki zjawisku rezonansu – tylko częstotliwości własne struny. Drgania o pozostałych częstotliwościach są wzmacniane bardzo słabo, dlatego słyszymy najgłośniejszy dźwięki odpowiadające drganiom własnym struny (rys. 4). Należy zauważyć, że dla uzyskania najgłośniejszego dźwięku należy dmuchać w miejsce strzałki (miejsce odpowiadające maksymalnej amplitudzie drgań) modu podstawowego (o najmniejszej częstotliwości), czyli w połowie długości struny.

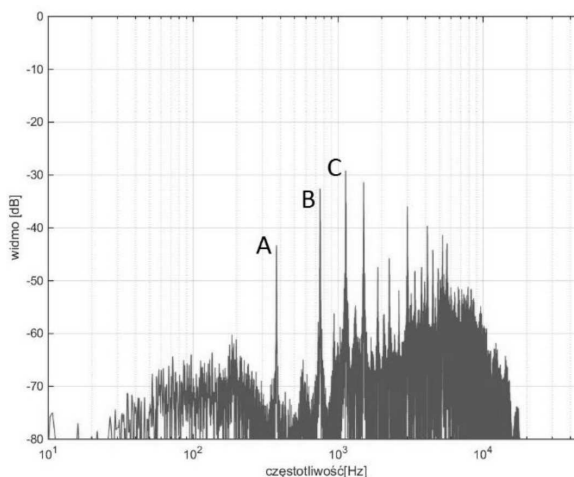


Rys. 4. Kształt drgającej struny dla pierwszej, drugiej, trzeciej, czwartej i piątej składowej harmonicznej.



Rys. 5. Schemat układu doświadczalnego; 1 – pasek folii mylarowej imitującej źdźbło trawy, 2 – stół, 3 – mocny zacisk, 4 – jeden z kilku odważników, 5 – taśma klejąca, 6 – mikrofon, 7 – podłączony do kompresora elastyczny przewód zakończony dyszą.

Rys. 6. Wykres widma dźwięku wydawanego przez badany pasek. Literami A, B i C zaznaczono częstotliwości odpowiadające pierwszej, drugiej i trzeciej składowej harmonicznej: $f_A = 375$ Hz, $f_B = 750$ Hz i $f_C = 1125$ Hz.



Przedstawiane dotąd rozważania podpowiadają, jakie parametry mogą mieć wpływ na dźwięk drgającego źdźbła trawy. Przeprowadziliśmy zatem serię doświadczeń, w których zbadaliśmy, jak dźwięk ten zależy od siły naciągu źdźbła, prędkości powietrza, którym dmuchamy na źdźbło, i długości źdźbła. Zbudowaliśmy układ doświadczalny odpowiadający badanemu instrumentowi; jest on przedstawiony na rysunku 5. Dźwięki wydawane przez opływany sprężonym powietrzem pasek folii mylarowej rejestrowaliśmy za pomocą mikrofonu podłączonego do komputera ze specjalnie przygotowanym przez nas programem. Przy zadanej wcześniej częstotliwości próbkowania karty dźwiękowej program rejestrował wybraną długość przebiegu czasowego sygnału rejestrowanego przez mikrofon. Następnie za pomocą szybkiej transformaty Fouriera obliczał widmo zarejestrowanego sygnału (czyli natężenie poszczególnych częstotliwości tworzących ten sygnał), dzięki czemu możliwa była identyfikacja częstotliwości własnych badanego paska. Zarówno przebieg czasowy zarejestrowanego sygnału, jak i widmo zapisywane było do pliku, który poddawaliśmy późniejszej analizie. Dodatkowo nasz program generował wykresy widm zarejestrowanych sygnałów i zapisywał je jako pliki graficzne, aby ocena i identyfikacja wyników była szybsza. Opisane wyżej czynności wykonywane były przez nasz program na bieżąco, w trakcie trwania pomiaru. Parametry rejestrowania dźwięku dobraliśmy tak, by osiągnąć jak największą dokładność. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawione są na rysunku 6. Błąd, którym charakteryzuje się każdy pomiar, w naszym przypadku wynosi około 1 Hz.

W dalszych, bardziej szczegółowych badaniach zmienialiśmy obciążenie i długość paska oraz ustawienie zaworu kompresora. Stwierdziliśmy w ten sposób, że częstotliwość modu podstawowego generowanego dźwięku jest rzeczywiście odwrotnie proporcjonalna do długości paska L oraz wprost proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z obciążenia paska m , zgodnie ze wzorem (*), w którym należy podstawić $F = mg$. Zauważyliśmy też, że dla bardzo małego strumienia powietrza z kompresora układ nie generował dźwięku, a dopiero gdy przepływ został dostatecznie zwiększony folia zaczynała drgać i rozlegał się charakterystyczny pisk. Te obserwacje są zgodne z zaproponowanym przez nas modelem zjawiska opisanym w pierwszej części artykułu.

Rzecz jasna, naszymi doświadczeniami dokonaliśmy zaledwie wstępnej charakteryzacji badanego zjawiska. Nietrudno wskazać kilka dalszych pytań, na które odpowiedzi można uzyskać, wykonując nieprzesadnie skomplikowane eksperymenty. Niewątpliwie ważny jest rodzaj, a w szczególności gęstość liniowa drgającego materiału – można w tym celu zbadać „instrumenty” wykonane z papieru, gumy i źdźbeł trawy. Można też rozszerzyć zakres naciągów badanego paska oraz przyrzeć się sytuacji, w której naciąg ten nie jest równomierny (np. fragment papieru jest luźny). Warto też sprawdzić, jaki wpływ na natężenie dźwięku ma ułożenie pozostałych palców oraz miejsce, w które kierujemy główny strumień powietrza. Życzymy Czytelnikom owocnych własnych badań oraz wiele zabawy przy ich wykonywaniu!

