

LXVI OLIMPIADA FIZYCZNA

ZAWODY III STOPNIA

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Za zadanie doświadczalne można otrzymać maksymalnie 40 punktów.

Zadanie D.

Mając do dyspozycji:

- trzy rurki o jednakowym przekroju i o długościach: $(50,0 \pm 0,5)$ cm, $(75,0 \pm 0,5)$ cm, $(100,0 \pm 0,5)$ cm, wykonane z tego samego metalu,
- stalowy, płaski klucz,
- oscyloskop,
- baterię o napięciu znamionowym 4,5 V,
- przewody i zaciski umożliwiające zestawienie obwodu elektrycznego,

wyznacz wartość prędkości dźwięku w metalu, z którego wykonane są rurki, dla fali podłużnej biegnącej wzdłuż swobodnej rurki.

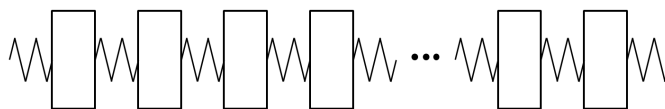
Uwaga:

Stalowy klucz możesz traktować jako ciało idealnie sztywne.

Rozwiązanie zadania D.

Część teoretyczna

Potraktujmy metalową rurkę jako zespół bardzo wielu bardzo cienkich, idealnie sztywnych elementów połączonych sprężystości (jak na Rys. 1).

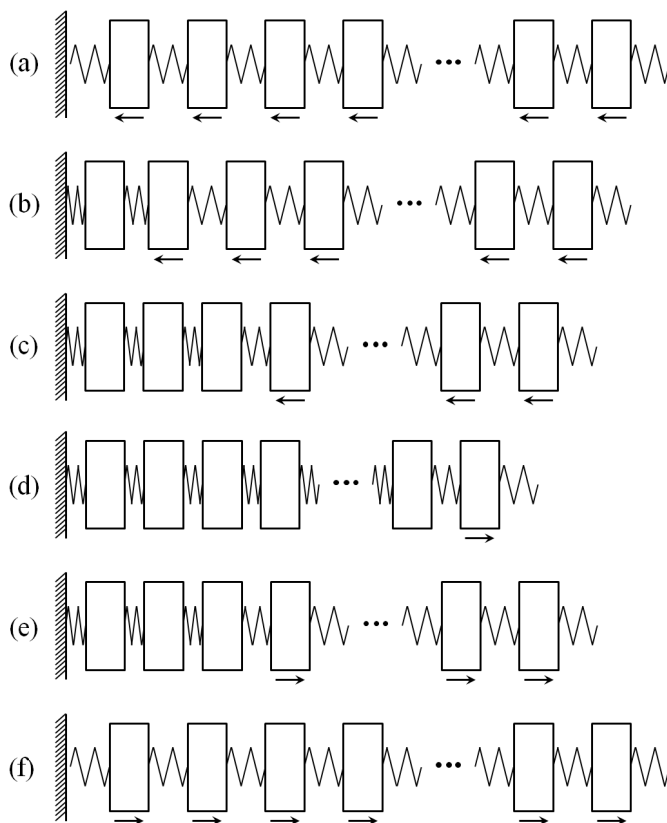


Rys. 1.

Jeśli rozważymy jeden taki element, który, poruszając się, uderza w nieruchomą, idealnie sztywną przeszkodę, to proces takiego zderzenia będzie trwał bardzo krótko. Jednak zderzenie całego zespołu takich elementów (czyli całej rurki) z taką przeszkodą będzie trwało istotnie dłużej. Przeanalizujmy kolejne etapy takiego procesu zderzenia (Rys. 2):

1. Cała rurka porusza się jednostajnie w kierunku przeszkody (na Rys. 2(a) w lewo). Każdy element rurki pozostaje nieruchomy względem pozostałych.
2. Dochodzi do kontaktu pierwszego elementu rurki z przeszkodą. Gdyby element ten nie był połączony z resztą rurki (czyli z elementami znajdującymi się na Rys. 2(b) na prawo od niego), to odbiłby się sprężystości od przeszkody i poruszałby się z tą samą co do wartości prędkością co na początku, lecz w przeciwną stronę (na Rys. 2(b) w prawo). Ponieważ jednak element ten oddziałuje z drugim elementem (położonym na prawo od niego), który początkowo porusza się w jego kierunku, to nie odbija się od przeszkody, lecz zatrzymuje. Odległość pomiędzy pierwszym i drugim elementem ulega nieznacznemu zmniejszeniu (co odpowiada lokalnemu ściśnięciu rurki).
3. Kolejne elementy rurki zatrzymują się na skutek oddziaływania z elementami położonymi na lewo od nich (które zatrzymały się bardzo krótką chwilę wcześniej). Odległości pomiędzy zatrzymanymi elementami są nieznacznie mniejsze, niż między elementami w swobodnej rurce (zatrzymana część rurki jest ściśnięta - patrz Rys. 2(c)). Granica pomiędzy elementami zatrzymanymi i tymi jeszcze poruszającymi się przemieszcza się wzdłuż rurki w prawo. Jest to propagacja akustycznej fali podłużnej.
4. Granica, o której mowa w punkcie 3., dociera do drugiego końca rurki. Jej skrajny element nie oddziałuje z żadnym innym elementem z prawej strony. Zatem element ten, na skutek odbicia od elementu znajdującego się po jego lewej stronie, zacznie się poruszać w kierunku przeciwnym do pierwotnego kierunku ruchu (czyli w prawo - patrz Rys. 2(d)), oddalając się od swojego lewego sąsiada.
5. Kolejne elementy znajdują się w sytuacji, w której ich lewy sąsiad jest nieruchomy, natomiast prawy sąsiad porusza się ruchem postępowym w prawo, oddalając się od nich (Rys. 2(e)). W związku z tym one również rozpoczynają ruch postępowy w prawo. „Front” tych zmian przemieszcza się wzdłuż pręta w lewo. Znowu mamy do czynienia z propagacją akustycznej fali podłużnej.

6. „Front” opisany w poprzednim punkcie dociera do lewego końca rurki, pozostającego do tej pory w kontakcie z przeszkodą. Skrajny element położony na tym końcu również rozpoczyna ruch postępowy w prawo, razem z pozostałą częścią rurki (Rys. 2(f)). Skutkiem tego ustaje jego kontakt z przeszkodą.



Rys. 2. Kolejne etapy procesu zderzenia rurki z nieruchomą przeszkodą.

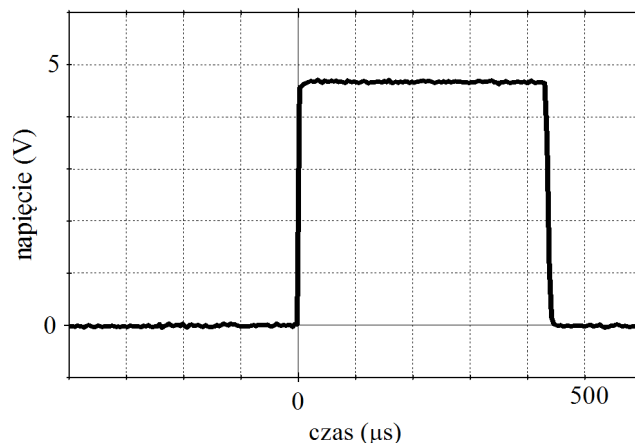
W opisanym powyżej procesie zderzenia kontakt rurki z przeszkodą trwa tyle, ile wynosi dwukrotny czas propagacji akustycznej fali podłużnej wzdłuż całej rurki. Aby więc możliwe było wyznaczenie prędkości v dźwięku w metalu, z którego wykonana jest rurka, wystarczy więc dla znanej długości l rurki wyznaczyć ten czas i skorzystać z zależności:

$$v = \frac{2l}{\tau}, \tag{1}$$

gdzie τ oznacza czas pozostawania rurki w kontakcie z przeszkodą w trakcie zderzenia. Ponieważ zarówno rurka, jak i przeszkoda (płaski klucz) przewodzą prąd elektryczny, czas ten można wyznaczyć, zestawiając obwód złożony z szeregowo połączonej baterii, rurki, klucza i oscyloskopu. Obwód ten zamykany będzie na skutek kontaktu rurki z kluczem. Wtedy za pomocą oscyloskopu wyznaczyć można przedział czasu, w jakim w obwodzie płynie prąd.

Część doświadczalna

W celu wykonania doświadczenia zestawiono obwód składający się z połączonych szeregowo kolejno: klucza płaskiego, baterii, oscyloskopu, rurki o długości l . Kolejne elementy tego układu połączoneo znajdującymi się w zestawie kablami z zaciskami. Jeżeli w takim układzie rurka jest w kontakcie z kluczem, to w obwodzie płynie prąd. Ponieważ elementem o największym oporze (dużo większym od oporu wszystkich innych elementów) jest oscyloskop, to napięcie na nim będzie w praktyce niemal równe sile elektromotorycznej baterii. Natomiast jeżeli rurka nie jest w kontakcie z kluczem, to w obwodzie prąd nie płynie, a napięcie na oscyloskopie jest równe zero. Dzięki temu, rejestrując przebieg napięcia na oscyloskopie w czasie zderzenia rurki z kluczem (Rys. 3), można wyznaczyć przedział czasu, w jakim obiekty te pozostają w kontakcie w trakcie zderzenia. Ponieważ celem doświadczenia jest wyznaczenie prędkości dźwięku w swobodnym przecie, warunek ten najłatwiej zapewnić, upuszczając pionowo rurkę na klucz leżący poziomo na stole.



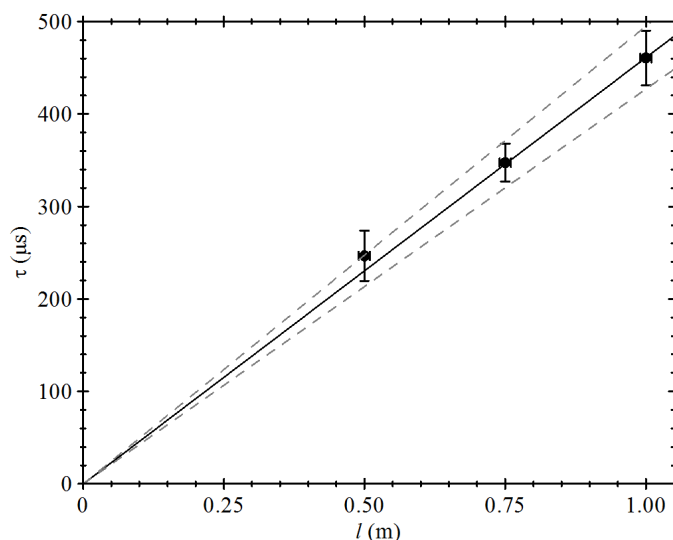
Rys. 3. Przykładowy przebieg napięcia na oscyloskopie w czasie zderzenia rurki z kluczem.

Dla każdej z trzech długości l rurki przeprowadzono pomiary długości przedziału czasu, w jakim rurka pozostaje w kontakcie z kluczem w trakcie zderzenia. Ze względu na znaczny rozrzut otrzymywanych wyników liczbowych, dla każdej długości rurki pomiary powtórzono 12 razy. Wyniki pomiarów zebrano w Tab. 1:

l (cm)	$50,0 \pm 0,5$	$75,0 \pm 0,5$	$100,0 \pm 0,5$
τ (μs)	279	370	459
	258	341	476
	226	342	440
	243	360	499
	230	344	440
	241	364	482
	245	329	443
	251	337	454
	238	339	459
	248	354	464
	280	356	461
	241	333	450
τ_{sr}	248	347	461
$\Delta\tau$	27	21	30

Tab. 1. Wyniki pomiarów przedziału czasu τ , w jakim rurka pozostaje w kontakcie z kluczem w trakcie zderzenia, dla każdej z trzech długości rurki l , wraz z wartością średnią (τ_{sr}) oraz połową różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną zmierzoną wartością ($\Delta\tau$), będącą oszacowaniem niepewności wartości τ_{sr} .

Zależność średniej wartości τ od długości rurki l wykreślono wraz z dopasowaną prostą na Rys. 4:



Rys. 4. Zależność przedziału czasu τ , w jakim rurka pozostaje w kontakcie z przeszkodą w trakcie zderzenia, od długości l rurki wraz z dopasowaną prostą (linia ciągła). Linie przerywane odpowiadają prostym o możliwie najmniejszym i największym nachyleniu.

Współczynnik kierunkowy dopasowanej prostej wynosi $\frac{\tau}{l} = (461 \pm 34) \frac{\mu\text{s}}{\text{m}}$.

Stąd szukana wartość prędkości wynosi:

$$v = \frac{2l}{\tau} = (4340 \pm 340) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Głównym źródłem niepewności otrzymanego wyniku jest niepewność wyznaczenia czasu τ , która wynika z przypadkowego rozrzutu poszczególnych wyników pomiaru. Oprócz tego wynik może być obarczony błędem systematycznym, wynikającym np. z przyjętego założenia, że klucz jest ciałem idealnie sztywnym, choć w rzeczywistości w czasie zderzenia ulega niewielkiemu ugięciu.

Punktacja zadania D.

Część teoretyczna

Pomysł na wyznaczenie prędkości v przez pomiar czasu zderzenia τ – 2 pkt.

Poprawny opis procesu zderzenia – 4 pkt.

Wzór (1) lub równoważny – 1 pkt

Pomysł na układ doświadczalny umożliwiający przeprowadzenie pomiaru – 3 pkt.

Część doświadczalna

Zestawienie i opis układu umożliwiającego poprawne wyznaczenie czasu τ – 1 pkt

Wykonanie pomiarów τ dla wszystkich dostępnych rurek i wyznaczenie współczynnika $\frac{\tau}{l}$ z dopasowania odpowiedniej prostej – 3 pkt.

Co najmniej czterokrotne powtórzenie każdego pomiaru τ – 3 pkt.

Poprawny wynik liczbowy wraz z oszacowaniem jego niepewności – 2 pkt.

Wskazanie głównych źródeł niepewności – 1 pkt