

# ĆWICZENIE 1

**Temat:** Wyznaczenie przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła rewersyjnego

**Cel:** Wyznaczenie przyspieszenia ziemskiego

## Literatura:

- H. Szydłowski, "Pracownia fizyczna", PWN
- Sz. Szeczeniowski, "Fizyka doświadczalna", cz. I - Mechanika i akustyka, PWN
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker "Podstawy fizyki", tom I i II, PWN
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "Feynmana wykłady z fizyki", tom 1.1 i 1.2, PWN
- Dowolny Słownik fizyczny
- Dowolne Tablice fizyczne

## Zagadnienia:

1. Przyspieszenie ziemskie.
2. Bryła sztywna. Dynamika bryły sztywnej.
3. Ruch harmoniczny prosty.
4. Wahadło fizyczne. Budowa wahadła rewersyjnego.

**Wykaz przyrządów:** wahadło rewersyjne, licznik laserowy bądź stoper, przymiar liniowy.

**Zanotować niepewności pomiarowe użytych przyrządów pomiarowych.**

## PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

### Pomiary:

1. Zmierzyć odległość  $l_0$  między pryzmatami.
2. Zawiesić wahadło na jednym z uchwytów i zmierzyć czas  $t_1$  30 wahań dla różnych położeń soczewki znajdującej się między pryzmatami. Położenie soczewki  $d$  zmieniać co 10 cm. Pomiary zapisać w Tabeli 1.
3. Analogiczne pomiary wykonać dla drugiego, odwrotnego zawieszenia wahadła (zmierzyć czas  $t_2$ ). Pomiary zapisać w Tabeli 1.

Tabela 1.

L.p.	$d$ [cm]	$t_1 = 30T_1$ [s]	$T_1$ [s]	$t_2 = 30T_2$ [s]	$T_2$ [s]
1.					
2.					
...					

gdzie  $d$  - odległość między soczewką ruchomą a pryzmatem znajdującym się przy soczewce nieruchomej.

- Wykonać wykres zależności czasu trwania 30 wahań od położenia soczewki  $t(d)$  dla obydwu zawieszonych wahadła (obie zależności na jednym wykresie). Znaleźć punkt przecięcia wyżej wspomnianych krzywych i odczytać położenie  $d_0$  soczewki.
- Zmierzyć czas 30 wahań dla położenia soczewki z przedziału  $d_0 \pm 5$  cm. Pomiary wykonać dla obydwu zawieszonych wahadła, a położenie soczewki zmieniać co 1 cm. Wyniki zapisać w Tabeli 2.

**Tabela 2.**

L.p.	$d$ [cm]	$t_1 = 30T_1$ [s]	$T_1$ [s]	$t_2 = 30T_2$ [s]	$T_2$ [s]
1.					
2.					
...					

W przypadku nie przecięcia się linii, przejść do punktu 6, a punkt przecięcia wyznaczyć za pomocą ekstrapolacji.

- Wykonać wykres zależności okresu  $T_1$  i  $T_2$  od położenia soczewki  $d$ . Wyznaczyć punkt przecięcia  $S(d_0, T)$ .

**Obliczenia:**

Obliczyć przyspieszenie ziemskie ze wzoru:

$$g = \frac{4\pi^2 l_0}{T^2}$$

Sprawdzić zgodność otrzymanych wyników z wartościami tablicowymi średnimi oraz dla danej lokalizacji geograficznej (Zielona Góra) korzystając z kalkulatora internetowego (np. na stronie SensorsONE).

**Rachunek błędów:**

Błąd przyspieszenia ziemskiego  $\Delta g$  obliczyć metodą różniczki zupełnej

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial l_0} \right| \Delta l_0 + \left| \frac{\partial g}{\partial T} \right| \Delta T$$

korzystając ze wzoru:

$$\Delta g = \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta l_0 + \frac{8\pi^2 l_0}{T^3} \Delta T$$

# ĆWICZENIE 2

**Temat:** Wyznaczenie modułu sztywności metodą dynamiczną

**Cel:** Wyznaczenie modułu sztywności drutu

## Literatura:

- H. Szydłowski, "Pracownia fizyczna", PWN
- Sz. Szczęniowski, "Fizyka doświadczalna", cz. I - Mechanika i akustyka, PWN
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker "Podstawy fizyki", tom I i II, PWN
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "Feynmana wykłady z fizyki", tom 1.1 i 1.2, PWN
- Dowolny Słownik fizyczny
- Dowolne Tablice fizyczne

## Zagadnienia:

1. Bryła sztywna. Dynamika bryły sztywnej.
2. Własności sprężyste ciał stałych.
3. Drgania harmoniczne proste.
4. Moment siły, moment bezwładności.

**Wykaz przyrządów:** wahadło torsyjne, śruba mikrometryczna, suwmiarka, waga, licznik laserowy bądź stoper.

**Zanotować niepewności pomiarowe użytych przyrządów pomiarowych.**

## PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

### Pomiary:

1. Zmierzyć średnicę pręta  $a$ , długość pręta  $l$ , promień i masę walców  $W$  ( $r_w, m_w$ ) oraz promień i masę tarczy  $T$  ( $r_T, m_T$ ). Dokonać pomiaru odległości  $d$  między osią kołków nasadowych (osią mocowania walców) a osią obrotu wahadła.
2. Zmierzyć czas  $t_0$  30 drgań wahadła nieobciążonego, wyznaczyć okres  $T_0$ . Pomiary wykonać 5 razy i zapisać w Tabeli 1.
3. Zmierzyć czas  $t_w$  30 drgań wahadła obciążonego walcami  $W$  i wyznaczyć okres  $T_w$ . Pomiary wykonać 5 razy i zapisać w Tabeli 1.
4. Zmierzyć czas  $t_T$  30 drgań wahadła obciążonego tarczą  $T$  i wyznaczyć okres  $T_T$ . Pomiary wykonać 5 razy i zapisać w Tabeli 1.

**Tabela 1.**

L.p.	$t_0 = 30T_0$ [s]	$T_0$ [s]	$t_w = 30T_w$ [s]	$T_w$ [s]	$t_T = 30T_T$ [s]	$T_T$ [s]
1.						
...						

**Obliczenia:**

Obliczyć średnie wartości okresów  $T_\theta$ ,  $T_w$  i  $T_T$ .

Obliczyć moment bezwładności walców  $J_w$  na podstawie wzoru:

$$J_W = NJ_0 + Nmd^2$$

gdzie  $N$  - ilość walców,  $J_0$  - moment bezwładności pojedynczego walca względem własnej osi symetrii równoległej do osi drgań. Wzór na moment bezwładności  $J_0$  należy znaleźć w literaturze.

Obliczyć moment bezwładności tarczy  $J_T$  analogicznie jak dla walców (należy zwrócić uwagę na definicję parametru  $d$ ).

Obliczyć moduł sztywności dla przypadku wahadła obciążonego walcami  $G_w$ , oraz dla przypadku wahadła obciążonego tarczą  $G_T$ :

$$G_W = \frac{8\pi l J_W}{a^4 (T_W^2 - T_0^2)} \quad G_T = \frac{8\pi l J_T}{a^4 (T_T^2 - T_0^2)}$$

Sprawdzić zgodność otrzymanych wyników z wartościami tablicowymi (moduł Kirchoffa  $G$ ). Z jakiego materiału mógł być wykonany drut?

**Rachunek błędów:**

Błąd momentów bezwładności  $\Delta J_w$  i  $\Delta J_T$  obliczyć metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta J_W = \left| \frac{\partial J_W}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial J_W}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial J_W}{\partial d} \right| \Delta d$$

$$\Delta J_T = \left| \frac{\partial J_T}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial J_T}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial J_T}{\partial d} \right| \Delta d$$

ze wzoru:

$$\Delta J_{W/T} = \left( \frac{1}{2} NR^2 + Nd^2 \right) \Delta m + NmR \Delta R + 2Nmd \Delta d$$

Błąd modułów sztywności  $\Delta G_w$  i  $\Delta G_T$  obliczyć metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta G_W = \left| \frac{\partial G_W}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial G_W}{\partial J_W} \right| \Delta J_W + \left| \frac{\partial G_W}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial G_W}{\partial T_W} \right| \Delta T_W + \left| \frac{\partial G_W}{\partial T_0} \right| \Delta T_0$$

$$\Delta G_T = \left| \frac{\partial G_T}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial G_T}{\partial J_T} \right| \Delta J_T + \left| \frac{\partial G_T}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial G_T}{\partial T_T} \right| \Delta T_T + \left| \frac{\partial G_T}{\partial T_0} \right| \Delta T_0$$

ze wzorów:

$$\Delta G_W = \frac{8\pi J_W}{a^4 (T_W^2 - T_0^2)} \Delta l + \frac{8\pi l}{a^4 (T_W^2 - T_0^2)} \Delta J_W + \frac{32\pi l J_W}{a^5 (T_W^2 - T_0^2)} \Delta a +$$

$$+ \frac{16\pi l J_W T_W}{a^4 (T_W^2 - T_0^2)^2} \Delta T_W + \frac{16\pi l J_W T_0}{a^4 (T_W^2 - T_0^2)^2} \Delta T_0$$

$$\Delta G_T = \frac{8\pi J_T}{a^4 (T_T^2 - T_0^2)} \Delta l + \frac{8\pi l}{a^4 (T_T^2 - T_0^2)} \Delta J_T + \frac{32\pi l J_T}{a^5 (T_T^2 - T_0^2)} \Delta a +$$

$$+ \frac{16\pi l J_T T_T}{a^4 (T_T^2 - T_0^2)^2} \Delta T_T + \frac{16\pi l J_T T_0}{a^4 (T_T^2 - T_0^2)^2} \Delta T_0$$

# ĆWICZENIE 6

**Temat:** Badanie drgań tłumionych przy drganiach wymuszonych

**Cel:** Wyznaczenie współczynnika sprężystości sprężyny metodą statyczną i dynamiczną oraz wyznaczenie modułu sztywności drutu.

## Literatura:

- H. Szydłowski, "Pracownia fizyczna", PWN
- Sz. Szczęniowski, "Fizyka doświadczalna", cz. I - Mechanika i akustyka, PWN
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker "Podstawy fizyki", tom I i II, PWN
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "Feynmana wykłady z fizyki", tom 1.1 i 1.2, PWN
- Dowolny Słownik fizyczny
- Dowolne Tablice fizyczne

## Zagadnienia:

1. Własności sprężyste ciał stałych.
2. Układ drgający - wahadło sprężyste.
3. Drgania harmoniczne proste.
4. Prawo Hooke'a.

**Wykaz przyrządów:** statyw, sprężyny, ciężarki, śruba mikrometryczna, waga, przymiar liniowy, stoper.

**Zanotować niepewności pomiarowe użytych przyrządów pomiarowych.**

## PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

### Pomiary:

1. Wybrać sprężynę do przeprowadzenia doświadczenia. Należy zwrócić uwagę, aby jej kształt nie był zbyt deformowany w wyniku jakichś uszkodzeń.
2. Zmierzyć promień drutu  $r$ , z którego wykonana jest sprężyna, promień jej nawinięcia  $R$  oraz ilość zwojów  $i$ . Zważyć ciężarki oraz haczyk mocujący.
3. Zawiesić wybraną sprężynę na statywie i zmierzyć jej długość bez obciążenia  $x(0)$ .
4. Metoda statyczna. Do dolnego końca sprężyny zaczepiać kolejne ciężarki, mierząc za każdym razem ich łączną masę  $m$  ( $m_h$  masa haczyka) oraz całkowitą długość sprężyny  $x$ . Wyznaczyć wydłużenie sprężyny  $x_0$  względem konfiguracji sprężyny bez obciążenia  $x(0)$ . Czynność powtórzyć dla 10-ciu różnych obciążeń. Zmierzone wartości zapisać w Tabeli 1.

Tabela 1.

L.p.	$m$ [kg]	$M = m + m_h$ [kg]	$x$ [m]	$x_0$ [m]
1.				
...				

5. Metoda dynamiczna. Do dolnego końca sprężyny zaczepić ciężarki, mierząc za każdym razem ich łączną masę  $m$  ( $m_h$  masa haczyka). Wprawić układ w drgania w kierunku pionowym mierząc czas  $t$  10-ciu pełnych drgań. Obliczyć okres drgań własnych  $T$ . Dla ułatwienia pomiarów należy dobierać stosunkowo duże obciążenie, aby okres drgań układu był możliwie długi. Czynność powtórzyć dla 10-ciu różnych obciążeń. Zmierzone wartości zapisać w Tabeli 2.

**Tabela 2.**

L.p.	$m$ [kg]	$M = m + m_h$ [kg]	$t$ [s]	$T$ [s]	$T^2$ [s <sup>2</sup> ]
1.					
...					

**Obliczenia:**

Metoda statyczna.

Wykonać wykres zależności  $x_0(M)$ . Wyznaczyć współczynnik sprężystości  $k_S$  ze wzoru:

$$k_S = \frac{Mg}{x_0}$$

Zgodnie z powyższym wzorem, zależność  $x_0(M)$  powinna w przybliżeniu przedstawiać linię prostą. Jeżeli ostatnie punkty na wykresie, odpowiadające największym masom  $M$ , odchylają się od zależności liniowej, to świadczy to o przekroczeniu granicy proporcjonalności dla danej sprężyny. Wyniki dla tych punktów należy pominąć w dalszych obliczeniach.

Metoda dynamiczna.

Wykonać wykres zależności  $T^2(M)$ . Wyznaczyć współczynnik sprężystości  $k_D$  ze wzoru:

$$k_D = \frac{4\pi^2 M}{T^2}$$

Tak jak w poprzedniej metodzie zależność  $T^2(M)$  powinna być w przybliżeniu liniowa. W przypadku znacznych odstępstw od tej zależności, należy wyniki dla tych punktów pominąć w dalszych obliczeniach.

Używając średnich wartości współczynnika sprężystości  $\overline{k_S}$  i  $\overline{k_D}$  wyznaczyć, dla każdego z nich moduł sztywności  $G$  materiału sprężyny:

$$G_S = \frac{4i\overline{k_S}R^3}{r^4} \qquad G_D = \frac{4i\overline{k_D}R^3}{r^4}$$

Sprawdzić zgodność otrzymanych wyników z wartościami tablicowymi (moduł Kirchoffa  $G$ ). Z jakiego materiału mogła być wykonana sprężyna?

**Rachunek błędów:**

Błąd współczynników sprężystości  $\Delta k_S$  i  $\Delta k_D$  obliczyć metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta k_S = \left| \frac{\partial k_S}{\partial M} \right| \Delta M + \left| \frac{\partial k_S}{\partial x_0} \right| \Delta x_0 \qquad \Delta k_D = \left| \frac{\partial k_D}{\partial M} \right| \Delta M + \left| \frac{\partial k_D}{\partial T} \right| \Delta T$$

ze wzorów:

$$\Delta k_S = \frac{g}{x_0} \Delta M + \frac{Mg}{x_0^2} \Delta x_0 \qquad \Delta k_D = \frac{4\pi^2}{T^2} \Delta M + \frac{8\pi^2 M}{T^3} \Delta T$$

Błąd modułów sztywności  $\Delta G_S$  i  $\Delta G_D$  obliczyć metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta G_S = \left| \frac{\partial G_S}{\partial k_S} \right| \Delta k_S + \left| \frac{\partial G_S}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial G_S}{\partial r} \right| \Delta r$$
$$\Delta G_D = \left| \frac{\partial G_D}{\partial k_D} \right| \Delta k_D + \left| \frac{\partial G_D}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial G_D}{\partial r} \right| \Delta r$$

ze wzoru:

$$\Delta G_{S/D} = \frac{4iR^3}{r^4} \Delta k_{S/D} + \frac{12ik_{S/D}R^2}{r^4} \Delta R + \frac{16ik_{S/D}R^3}{r^5} \Delta r$$

# ĆWICZENIE 16

**Temat:** Interferometr Quinke'go

**Cel:** Wyznaczenie prędkości dźwięku oraz średniej masy molowej powietrza.

## Literatura:

- H. Szydłowski, "Pracownia fizyczna", PWN
- Sz. Szczęniowski, "Fizyka doświadczalna", cz. I - Mechanika i akustyka, PWN
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker "Podstawy fizyki", tom I i II, PWN
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "Feynmana wykłady z fizyki", tom 1.1 i 1.2, PWN
- Dowolny Słownik fizyczny
- Dowolne Tablice fizyczne

## Zagadnienia:

1. Fale stojące.
2. Prędkość rozchodzenia się fal w ośrodkach sprężystych.
3. Interferencja fal.
4. Równanie stanu gazu doskonałego. Masa cząsteczkowa i masa molowa.
5. Budowa i zasada działania interferometru Quinke'go.

**Wykaz przyrządów:** interferometr Quinke'go, generator mocy, multimetr, termometr.

**Zanotować niepewności pomiarowe użytych przyrządów pomiarowych.**

## PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

### Pomiary:

1. Odczytać temperaturę  $T$  powietrza na termometrze pokojowym. Pomiar powtórzyć również po wykonaniu wszystkich pomiarów.
2. Na generatorze ustawić wybraną częstotliwość  $f$  (pokrętko *Frequency*) z zakresu 2 - 5 kHz. Częstotliwość może się zmieniać nieznacznie w trakcie wykonywania pomiarów, będzie miało to wpływ na późniejsze wyniki. Dlatego za każdym razem należy odczytać wartość częstotliwości przed i po wykonaniu pomiarów, a różnicę określić jako niepewność pomiarową  $\Delta f$ .
3. Przesuwając ramię interferometru od najmniejszego do największego wydłużenia obserwować wychylenia wskazówki multimetru. Wskazówka multimetru powinna widocznie oscylować podczas zmiany wydłużenia ramienia interferometru. Pokrętkiem multimetru ustawić zakres odczytywanego natężenia, tak aby wskazówka nie wychodziła poza skalę. Dodatkowo pokrętkiem generatora *Amplitude* można ustalić wzmocnienie sygnału. Wzmocnienie powinno być wystarczająco duże, aby hałas z sali laboratoryjnej nie wpływał na pomiary.
4. Ramię interferometru ustawić w położeniu początkowym, czyli na  $r = 0$ cm. Przesuwając ramię interferometru odczytać jego wydłużenie  $r_{max}$  oraz  $r_{min}$  odpowiadające maksimum i minimum natężenia dźwięku (maksymalne i minimalne wychylenie wskazówki multimetru). Pomiary wykonać dla całego wydłużenia interferometru (od 0 do 15.5 cm). Jeśli dla wybranej



częstotliwości będzie mniej niż dwa minima i maksima, to znaczy, że wybrana częstotliwość jest za niska.

- Pomiary wykonać dla 10-ciu różnych częstotliwości  $f$  z zakresu 2 - 5 kHz. Pomiary zapisać w Tabeli 1, dostosowując ją do ilości odczytanych minimów i maksimów.

**Tabela 1.**

L.p.	$f$ [Hz]	$r_{max}$ [m]	$\Delta r_{max}$ [m]	$\overline{\Delta r_{max}}$ [m]	$\lambda_{max}$ [m]	$r_{min}$ [m]	$\Delta r_{min}$ [m]	$\overline{\Delta r_{min}}$ [m]	$\lambda_{min}$ [m]	$\lambda$ [m]	$v$ [m/s]
1.			---				---				
...			---				---				

### Obliczenia:

Dla każdej częstotliwości obliczyć długość fali  $\lambda_{max}$  i  $\lambda_{min}$  wykorzystując średnią wartość odległości między kolejnymi maksimami  $\overline{\Delta r_{max}}$  i kolejnymi minimami  $\overline{\Delta r_{min}}$  ze wzoru:

$$\lambda_{max} = 2 \cdot \overline{\Delta r_{max}} \quad \lambda_{min} = 2 \cdot \overline{\Delta r_{min}}$$

Długość fali  $\lambda$  wyznaczyć jako wartość średnią z  $\lambda_{max}$  i  $\lambda_{min}$ . Wykonać wykres zależności  $\lambda_{max}(f)$  oraz  $\lambda_{min}(f)$ .

Dla każdej częstotliwości obliczyć prędkość dźwięku w powietrzu  $v$  a następnie wyznaczyć wartość średnią  $\overline{v}$ .

$$v = f \cdot \lambda$$

Korzystając ze średniej wartości prędkości dźwięku  $\overline{v}$ , obliczyć średnią masę molową powietrza  $\overline{m}$  ze wzoru (przyjąć  $\kappa = 1.4$ ):

$$\overline{m} = \kappa \frac{RT}{\overline{v}^2}$$

### Rachunek błędów:

Błąd pomiaru prędkości dźwięku wyznaczyć za pomocą odchylenia standardowego z próby:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \overline{v})^2}$$

Przeprowadzić test  $3\sigma$  (trzy sigma).

Błąd wyznaczenia średniej masy molowej  $\Delta \overline{m}$  powietrza obliczyć metodą różniczek zupełnej:

$$\Delta \overline{m} = \left| \frac{\partial \overline{m}}{\partial T} \right| \Delta T + \left| \frac{\partial \overline{m}}{\partial \overline{v}} \right| \Delta \overline{v}$$

$$\Delta \overline{m} = \frac{\kappa R}{\overline{v}^2} \Delta T + \frac{2\kappa R T}{\overline{v}^3} \Delta \overline{v}$$

Za błąd średniej prędkości dźwięku  $\Delta \overline{v}$  podstawić wartość odchylenia standardowego  $S$ .

# ĆWICZENIE 18

**Temat:** Wyznaczenie dynamicznego współczynnika lepkości

**Cel:** Wyznaczenie bezwzględnego współczynnika lepkości metodą Stokesa.

## Literatura:

- H. Szydłowski, "Pracownia fizyczna", PWN
- Sz. Szczeniowski, "Fizyka doświadczalna", cz. I - Mechanika i akustyka, PWN
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker "Podstawy fizyki", tom I i II, PWN
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "Feynmana wykłady z fizyki", tom 1.1 i 1.2, PWN
- Dowolny Słownik fizyczny
- Dowolne Tablice fizyczne

## Zagadnienia:

1. Gęstość
2. Ciężar, ciężar właściwy.
3. Tarcie.
4. Lepkość, współczynnik lepkości.
5. Prawo Stokesa.

**Wykaz przyrządów:** Szklany cylinder z badaną cieczą, zestaw kulek, śruba mikrometryczna, katetometr, stoper, waga.

**Zanotować niepewności pomiarowe użytych przyrządów pomiarowych.**

## PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

### Pomiary:

1. Zmierzyć temperaturę cieczy. Wybrać dwie dowolne kulki, każda powinna być wykonana z innego materiału. Dokładnie je oczyścić.
2. Zmierzyć masę  $m$  wybranych kulek oraz ich średnice  $d$  ( $d = 2r$ ).
3. Zmierzyć wewnętrzny promień cylindra  $R$  oraz mierzalną długość drogi opadania kulek  $h$  (odległość między znacznikami **A** i **B** na cylindrze). Jeśli poziom cieczy będzie się pokrywał ze znacznikiem **A**, bądź będzie poniżej tego znacznika, to należy zdefiniować nowy znacznik **A**. Nowy znacznik **A** powinien znajdować się około 2 cm poniżej poziomu cieczy.
4. Zmierzyć czas spadku w cieczy pierwszej wybranej kulki. Pomiar czasu rozpocząć od znacznika **A** i zakończyć na znaczniku **B**. Pomiary wykonać 20 razy. Wyniki pomiarów zapisać w Tabeli 1.
5. Czynności z punktu 4 wykonać dla drugiej kulki. Wyniki pomiarów zapisać w Tabeli 1.
6. Po wykonaniu wszystkich pomiarów zmierzyć temperaturę cieczy.

### Obliczenia:

Obliczyć średnią gęstość materiału, z którego wykonane są wybrane kulki:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{4/3\pi r^3}$$

**Tabela 1.**

	<b>Kulka 1 - <i>rodzaj materiału</i></b>	<b>Kulka 2 - <i>rodzaj materiału</i></b>
<b>Lp.</b>	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]
<b>1.</b>		
<b>...</b>		
<b>T [s]</b>		

Na podstawie wyznaczonej gęstości określić rodzaj materiału kulek.

Osobno, dla każdej kulki obliczyć wartość współczynnika lepkości cieczy ze wzoru:

$$\eta = \frac{2r^2 g T (\rho - \rho_0)}{9h \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right)}$$

gdzie:

$r$  - promień kulki

$T$  - średni czas spadania

$R$  - promień cylindra

$g$  - przyspieszenie ziemskie

$\rho$  - gęstość kulki

$h$  - długość drogi opadania kulki w cieczy

$\rho_0$  - gęstość badanej cieczy (szczegóły sprawdzić na karcie charakterystyki przy stanowisku doświadczalnym)

Wartość lepkości wyrazić w jednostkach  $[\eta] = \text{kg/m} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$ . Wartość lepkości cieczy powinna być taka sama, niezależnie od rodzaju kulki.

### **Rachunek błędów:**

Błąd pomiaru gęstości kulek  $\Delta\rho_1$  i  $\Delta\rho_2$  wyznaczyć metodą różniczeki zupełnej:

$$\Delta\rho = \left| \frac{\partial\rho}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial\rho}{\partial r} \right| \Delta r$$

ze wzoru:

$$\Delta\rho = \frac{3}{4\pi r^3} \Delta m + \frac{9m}{4\pi r^4} \Delta r$$

Błąd pomiaru czasu spadku kulek wyznaczyć za pomocą odchylenia standardowego z próby:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - T)^2}$$

Błąd pomiaru lepkości cieczy  $\Delta\eta$  wyznaczyć metodą mieszaną (połączenie pochodnej logarytmicznej z różniczką zupełną):

$$\Delta\eta = \pm\eta \left( \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{2.4}{1 + 2.4 \frac{r}{R}} \frac{\Delta r}{R} + \frac{2.4}{2.4 + \frac{R}{r}} \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta\rho}{\rho - \rho_0} + \frac{\Delta\rho_0}{\rho - \rho_0} \right)$$