

Ćwiczenie nr 2 WYZNACZANIE GĘSTOŚCI CIAŁ STAŁYCH Instrukcja dla studenta

I. WSTĘP

W ćwiczeniu WAHADŁO MATEMATYCZNE badaliśmy wpływ przypadkowych zaburzeń na rozkład wyników pomiarów, a zatem i na dokładność wyniku końcowego. Nie są to jednak jedyne czynniki decydujące o dokładności wyniku końcowego. Istotną rolę odgrywają także dokładność używanych przyrządów oraz stosowane metody pomiaru.

Naszym zadaniem jest teraz możliwie dokładne wyznaczenie średniej gęstości metalowej próbki w kształcie walca. Jak zwykle, poza samą wartością badanej wielkości, będziemy też starali się ustalić, jak dokładnie tę wartość zmierzylismy. Gęstość wyznaczymy z zależności

$$\rho = \frac{m}{V},$$

gdzie m jest masą próbki, a V jej objętością.

Do wyznaczania mas próbek posłużymy się wagą elektroniczną, natomiast objętość każdej z próbek będziemy wyznaczali trzema różnymi metodami:

- A. Mierząc średnicę i wysokość walca suwmiarką i korzystając ze znanego wzoru na objętość walca (pomiar pośredni);
- B. Wyznaczając objętość próbki za pomocą wyskalowanej menzurki (pomiar bezpośredni);
- C. Za pomocą wagi, wykorzystując przy tym prawo Archimedesesa (pomiar pośredni).

II. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Masz do dyspozycji:

- dwie próbki w kształcie walca wykonane z nieznanymi metali;
- wagę elektroniczną wyświetlającą wartość masy z dokładnością do 0,01 g;
- suwmiarkę z wyświetlaczem elektronicznym pozwalającym na odczyt długości z dokładnością do 0,01 mm;
- menzurkę z naniesioną skalą objętości – „kreski skali” co 1cm³;
- dużą zlewkę o pojemności ok. 300 cm³;
- wodę destylowaną;
- pokojowy termometr mierzący temperaturę w laboratorium (temperaturę wody i innych przedmiotów zastanych w laboratorium);
- statyw i cienką nici.

Wykonanie pomiarów

Podczas wykonywania pomiarów pamiętaj o szczegółowej dokumentacji, tj. o notowaniu wszystkich informacji mogących mieć znaczenie podczas analizowania uzyskanych wyników. W szczególności notuj wszystkie mierzone wartości.

1. Pomiar mas próbek

- W pierwszym kroku wyznacz masy obu próbek. Rozpocznij od wypoziomowania i tarowania wagi. Pomiar masy każdej z próbek powtórz co najmniej 3 razy. Jeśli za każdym razem otrzymasz inny wynik, to kontynuuj serię pomiarów w celu wiarygodnego ocenienia parametrów rozkładu wyników (wartości średniej i jej niepewności standardowej). Jeśli wyniki będą się powtarzały, to możesz uznać, że odchylenia przypadkowe są mniejsze niż wartość odpowiadająca najmniejszej „działce skali” i nie ma potrzeby wydłużać serii pomiarów.

2. Wyznaczanie objętości próbek

Metoda A.

- Za pomocą suwmiarki wykonaj wielokrotne pomiary średnicy D każdej z próbek. Pamiętaj, że przedmiot wyglądający jak walec może w rzeczywistości nim nie być – poza przekonaniem się (jak podczas pomiaru masy), czy powtarzanie pomiaru „w tym samym miejscu” daje ten sam wynik, wykonaj pomiary kilku średnic tego samego przekroju („w różnych kierunkach”) i dla różnych wysokości (odległości od podstaw walca). W ten sposób sprawdzisz, czy dopuszczalne jest założenie, że przekrój próbki na każdej wysokości jest kołem o tym samym promieniu.
- W podobny sposób, powtarzając pomiary suwmiarką „w różnych miejscach”, wyznacz wysokość H każdej z próbek.

Metoda B.

- Za pomocą menzurki (o średnicy nieznacznie większej od średnic próbek) wypełnionej wodą z kranu wyznacz objętości każdej z próbek. Należy w tym celu wody do menzurki, tak aby jej poziom pokrywał się z jedną z kresek skali – zwróć uwagę jaki wpływ na dokładność odczytu ma kształt powierzchni wody (menisk) oraz położenie Twojego oka względem powierzchni cieczy (paralaksa) – odczytaj objętość V_1 . Następnie podwieś próbkę na cienkiej nitce (pozwala na to mała śrubka w jednej z podstaw każdej z próbek) i ostrożnie zanurz ją całkowicie w menzurce. Zwróć uwagę, czy do próbki nie „przykleiły się” (zwłaszcza od spodu) bąbelki powietrza. Następnie odczytaj nowy poziom wody, tj. objętość V_2 .

Na ogół nowy poziom nie będzie pokrywał się z żadnym ze znaczników skali – czy można wiarygodnie odczytać ułamek szerokości działki do najbliższego znacznika? Jeśli tak, to wyznacz tę wartość i zapisz wynik. Czy powtarzanie tego pomiaru jest celowe? Jeśli tak, wykonaj odpowiednią serię pomiarów w celu jak najdokładniejszego wyznaczenia objętości próbki. Różnica odczytanych objętości to poszukiwana objętość próbki.

Metoda C.

- Należy tyle wody destylowanej do zlewki, aby mogła się w niej całkowicie zanurzyć każda z próbek. Zanotuj temperaturę panującą w laboratorium.
- Wyznacz masę m_{zw} zlewki z wodą.
- Zawieś próbkę na statywie tak, aby wisząc swobodnie mogła całkowicie zanurzyć się w wodzie w zlewce stojącej na wadze. Po zanurzeniu próbka nie może opierać się o dno zlewki.
- Odczytaj wskazania wagi, m_{zwp} , gdy podwieszona próbka jest całkowicie zanurzona w zlewce. Zwróć uwagę, czy do próbki nie „przykleiły się” (zwłaszcza od spodu) bąbelki powietrza. Jeśli zdecydujesz się na wielokrotne pomiary, to pamiętaj, że

między pomiarami należy osuszyć próbkę (np. ręcznikiem papierowym) i rozpoczynać kolejny pomiar od pomiaru masy zlewki z wodą (dlaczego?).

- Powtórz pomiary dla drugiej próbki, pamiętając o rozpoczęciu od ponownego zważenia zlewki z wodą.

Wyznaczenie masy wypartej wody wymaga dwóch niezależnych wważen – zlewki z wodą oraz zlewki z wodą i zanurzoną w niej próbką. Można jednak skorzystać z możliwości wytarowania wagi po ustawieniu na niej zlewki z wodą, co po zanurzeniu próbki pozwala bezpośrednio zmierzyć masę wypartej wody. Drugi sposób jest dokładniejszy (dlaczego?).

III. ZADANIA DOMOWE

Zadanie 1

(obowiązkowe przed przystąpieniem do wykonania pomiarów)

- a) Wyprowadź wzory na wyznaczanie gęstości metodami A, B oraz C. Zwróć uwagę, że w metodzie C opartej na prawie Archimedesesa, różnica pomiędzy masą zlewki z wodą destylowaną i zawieszoną w niej próbką (m_{zwp}), a masą zlewki tylko z wodą (m_{zw}) jest równa masie wypartej przez próbkę wody m_{ww} (dlaczego?). W związku z tym objętość próbki V możemy wyznaczyć ze związku: $V = \frac{m_{zwp} - m_{zw}}{\rho_w}$, gdzie ρ_w to gęstość wody.
- b) Korzystając z informacji o dostępnych przyrządach pomiarowych (patrz CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA instrukcji) oraz wiedząc, że średnice i wysokości próbek mieszczą się w przedziale 2-5 cm, oceń, która z metod pomiarowych pozwoli najdokładniej wyznaczyć gęstości próbek. Zaryzykuj uszeregowanie metod od najdokładniejszej do najmniej dokładnej. Jak rozpoznasz, czy wyniki uzyskane różnymi metodami są ze sobą zgodne?

Zadanie 2

(obowiązkowe – do wykonania przed ćwiczeniami rachunkowym, czyli przed zajęciami odbywającymi się tydzień po części doświadczalnej ćwiczenia)

Korzystając z wyników własnych pomiarów wyznacz oceny wartości wielkości mierzonych bezpośrednio (masy, średnice, objętości próbek) oraz wynikające z nich wartości gęstości dla każdej z trzech metod pomiarowych. Oblicz także niepewności standardowe wyznaczanych wielkości (s_x , $s_{\bar{x}}$). Wyniki zamieść w tabelkach arkusza kalkulacyjnego. Do tabelek wpisz również dokładność przyrządu użytego do danego pomiaru (Δ_x) oraz wartość $\frac{\Delta_x}{\sqrt{3}}$. Ostatnią pozycję tabelki, dotyczącą niepewności całkowitej pomiarów (u_x), uzupełnimy na ćwiczeniach rachunkowych.

UWAGA

Pamiętaj, że:

- obliczając wielkość mierzoną pośrednio, do wzoru wstawiamy najlepsze oceny (średnie z serii pomiarów) wielkości mierzonych bezpośrednio, zaś stałe uwzględniamy możliwie najdokładniej;
- podczas obliczeń nie zaokrąglamy wyników pośrednich.

IV. CZĘŚĆ RACHUNKOWA

UWAGA: Na stronie, z której pobrałaś/pobrałeś instrukcję znajduje się gotowy do załadowania arkusz kalkulacyjny do programu Calc pakietu Open Office przygotowany do wykonania obliczeń będących przedmiotem zadania domowego nr 2 (patrz ramka na poprzedniej stronie) oraz poniższych zadań. Arkusz ten lub równoważny będzie niezbędny podczas ćwiczeń rachunkowych i może być pomocny podczas przygotowania raportu końcowego.

Niepewność standardową całkowitą u wielkości mierzonej bezpośrednio wyznaczamy (co będzie szczegółowo uzasadnione na wykładzie) z zależności

$$u^2 = s^2 + \frac{1}{3} \Delta^2,$$

gdzie wielkość s to niepewność statystyczna (przypadkowa) pomiaru (niepewność średniej arytmetycznej), zaś Δ wynika z dokładności przyrządu stosowanego do pomiaru i oznacza wartość najmniejszej działki.

Obliczanie złożonej niepewności standardowej (niepewności wielkości mierzonej pośrednio), czyli „propagacja małych błędów”

Dla wszystkich rozważanych tu metod gęstość wyznaczana jest pośrednio. W dalszej analizie będziemy więc musieli stosować regułę wyznaczania **niepewności pomiarów pośrednich**, która będzie wyprowadzona na wykładzie.

Przyjmijmy, że wielkość y wyznaczamy pośrednio, korzystając z zależności matematycznej $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, gdzie wielkości x_i są mierzone bezpośrednio. Ocenę wielkości y otrzymujemy podstawiając uzyskane oceny wartości wielkości x_i , zaś niepewność u_y oceny y obliczana jest za pomocą wzoru na przenoszenie niepewności

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_i \right)^2,$$

gdzie u_i są niepewnościami x_i . **Jeśli wielkość x_i wyznaczamy na podstawie serii pomiarów, to do zależności matematycznej podstawiamy wartość średnią serii.**

Średnia ważona

Jeżeli ta sama wielkość została zmierzona N niezależnymi metodami, w wyniku czego otrzymano N wartości x_i wraz z niepewnościami u_i , wówczas najlepszą oceną poszukiwanej wielkości jest średnia ważona \bar{x}_w , zaś za oceny niepewności przyjmujemy większą z wartości u_{int} i u_{ext} , gdzie:

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{u_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{u_i^2}}, \quad u_{int}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{u_i^2}}, \quad u_{ext}^2 = \frac{u_{int}^2}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}_w}{u_i} \right)^2.$$

Dyskusja wyboru niepewności zostanie przeprowadzona na wykładzie.

Zadanie 1

- a) Zmierzono bok kwadratu otrzymując $a = (2,50 \pm 0,03)$ m. Ile wynosi ocena pola tego kwadratu i jaka jest niepewność tej oceny?
b) Szereg praw fizycznych przyjmuje postać

$$y = ax_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n},$$

gdzie a oraz k_i są pewnymi zadanymi stałymi, zaś wielkości x_i to rozmaite wielkości fizyczne podlegające pomiarom. Jeśli wielkości te znane są z niepewnościami u_i , pokaż, że niepewność wielkości y wynosi

$$u_y^2 = y^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_i u_i}{x_i} \right)^2.$$

Zadanie 2

Wysokość H domu możemy wyznaczyć ze związku $H = L \operatorname{tg} \varphi$, gdzie L jest długością cienia rzucanego przez dom, zaś φ to kąt pod którym widać dom z końca cienia. Jeśli mierzona długość cienia $L_0 = 25$ m znana jest wystarczająco dokładnie, zaś zmierzony kąt $\varphi_0 = 45^\circ$ z niepewnością $u_\varphi = 1^\circ$, wyznacz niepewność u_H wysokości domu.

Zadanie 3

Wyprowadź wyrażenie na niepewność przyspieszenia ziemskiego wyznaczanego na podstawie pomiaru okresu wahadła matematycznego. Oblicz wartość liczbową tej niepewności dla własnych danych doświadczalnych.

Zadanie 4

Wyznacz wartości liczbowe niepewności standardowych całkowitych (u_x) wszystkich wielkości mierzonych bezpośrednio.

Zadanie 5

Dla wszystkich trzech metod pomiaru gęstości wyprowadź podane niżej wzory wyrażające niepewność gęstości przez wielkości mierzone bezpośrednio oraz ich niepewności.

Metoda A.

$$u_{\rho_A}^2 = \left(\frac{4\bar{m}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}} \right)^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{2u_D}{\bar{D}} \right)^2 + \left(\frac{u_H}{\bar{H}} \right)^2 \right) = \rho_A^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{2u_D}{\bar{D}} \right)^2 + \left(\frac{u_H}{\bar{H}} \right)^2 \right).$$

Metoda B.

$$u_{\rho_B}^2 = \left(\frac{u_m}{V_2 - V_1} \right)^2 + \left(\frac{\bar{m} u_{V_1}}{(V_2 - V_1)^2} \right)^2 + \left(\frac{\bar{m} u_{V_2}}{(V_2 - V_1)^2} \right)^2$$

lub inaczej

$$u_{\rho_B}^2 = \left(\frac{\bar{m}}{V_2 - V_1} \right)^2 \left(\left(\frac{u_m^2}{\bar{m}} \right) + \left(\frac{u_{V_1}}{V_2 - V_1} \right)^2 + \left(\frac{u_{V_2}}{V_2 - V_1} \right)^2 \right) = \rho_B^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{u_{V_1}}{V_2 - V_1} \right)^2 + \left(\frac{u_{V_2}}{V_2 - V_1} \right)^2 \right).$$

W powyższych wzorach u_{V1} i u_{V2} oznaczają niepewności pomiaru wielkości V_1 i V_2 . Oceniając wielkości u_{V1} i u_{V2} postępujemy jak w przypadku pomiaru wysokości i średnicy. Jeśli wyniki pomiarów objętości dają powtarzalne wartości, to niepewność statystyczną możesz pominąć.

Metoda C.

$$u_{\rho C}^2 = \left(\frac{\rho_w u_m}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{m} \rho_w u_{mzwp}}{(\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw})^2} \right)^2 + \left(\frac{\bar{m} \rho_w u_{mzw}}{(\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw})^2} \right)^2 + \left(\frac{\bar{m} u_{\rho w}}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2$$

lub nieco inaczej

$$u_{\rho C}^2 = \left(\frac{\bar{m} \rho_w}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mzwp}}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mzw}}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\rho w}}{\rho_w} \right)^2 \right),$$

czyli

$$u_{\rho C}^2 = \rho_C^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mzwp}}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mzw}}{\bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\rho w}}{\rho_w} \right)^2 \right).$$

W przypadku bezpośredniego pomiaru masy wypartej wody (tarowanie wagi) wyrażenie na niepewność ma postać

$$u_{\rho C}^2 = \left(\frac{\bar{m} \rho_w}{\bar{m}_{ww}} \right)^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mww}}{\bar{m}_{ww}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\rho w}}{\rho_w} \right)^2 \right) = \rho_C^2 \left(\left(\frac{u_m}{\bar{m}} \right)^2 + \left(\frac{u_{mww}}{\bar{m}_{ww}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\rho w}}{\rho_w} \right)^2 \right).$$

Zauważ, że wszystkie wzory na niepewność gęstości zostały doprowadzone do postaci, w której występuje wielkość wyznaczana oraz niepewności wielkości mierzonych bezpośrednio.

Zadanie 6

Oszacuj niepewności wartości gęstości wyznaczonej każdą z metod (przynajmniej dla jednej próbki). **Wskazówka:** przed przystąpieniem do obliczeń, wybierz, Twoim zdaniem, najwygodniejszą postać odpowiedniego wzoru.

V. RAPORT KOŃCOWY

Raport końcowy należy oddać tydzień po zakończeniu ćwiczeń rachunkowych dotyczących doświadczenia WYZNACZANIE GĘSTOŚCI CIAŁ STAŁYCH. Wykorzystaj własne dane, a opis wykonaj samodzielnie!

Raport końcowy winien zawierać następujące elementy:

1. Krótkie streszczenie: zdefiniowanie przedmiotu badań, hipotezy wstępnej dotyczącej uszeregowania dokładności metod pomiarowych i dotyczący tej hipotezy wnioski końcowy;
2. Skróty opis metod pomiaru, przyrządów i przebiegu pomiarów;
3. Surowe wyniki pomiarów w odpowiednio zaprojektowanych i czytelnych tabelach (przykładowy wzór tabel znajdziesz na końcu opisu);
4. Krótki opis metod analizy danych z przytoczeniem wzorów i definicji symboli (zrozumiały i czytelny dla osoby, która nie zna instrukcji wykonywania doświadczenia);
5. Wyniki końcowe dla trzech metod (odpowiednio zaokrąglone wartości gęstości i ich niepewności) oraz najlepszą ocenę gęstości i niepewność tej oceny uzyskane za pomocą średniej ważonej. Przy wyznaczaniu średniej ważonej, aby zagwarantować przejrzystość obliczeń i łatwą kontrolę ich poprawności, skorzystaj z tabelki:

metoda	ρ_i	u_{ρ_i}	$1/ u_{\rho_i}^2$	$\rho_i/ u_{\rho_i}^2$	$\rho_i - \bar{\rho}_w$	$(\rho_i - \bar{\rho}_w)^2$	$\frac{(\rho_i - \bar{\rho}_w)^2}{u_i^2}$
A							
B							
C							
suma =					suma =		
$u_{int} =$					$= \bar{\rho}_w$ $u_{ext} =$		

6. Wnioski końcowe dotyczące dokładności metod;
 7. Sugestie odnośnie metali, z których wykonane były próbki (skorzystaj z tablic wartości gęstości różnych metali).
- Raport końcowy może być napisany ręcznie, byle porządnie i czytelnie. Jeśli jednak zdecydujesz się na wykorzystanie procesora tekstów, to przestrzegaj zasad typograficznych obowiązujących w publikacjach naukowych. Streszczenie podstawowych reguł jest umieszczone na stronie Pracowni.
- Raport nie powinien zawierać szczegółów obliczeń numerycznych wynikających z zastosowanych wzorów. Po prostu załóż, że osoba, do której skierowany jest ten raport, potrafi, jak Ty, dodawać, mnożyć, ... i nie musisz, ukazując kolejne operacje numeryczne, prowadzić jej „za rękę”.

UWAGA

Pamiętaj, że:

- niepewność końcowego wyniku pomiaru zaokrąglamy do dwóch cyfr znaczących;
- wynik końcowy zaś zaokrąglamy, tak aby ostatnia cyfra znacząca wypadła na tym samym miejscu co ostatnia cyfra znacząca niepewności, przy czym, wartość i jej niepewność muszą być wyrażone w tych samych jednostkach;
- podczas obliczeń nie zaokrąglamy wyników pośrednich.

Przykładowe tabele, w których możesz umieścić uzyskane wyniki

Pomiary bezpośrednie

pomiar masy próbki – m [g]		
pomiar	próbka 1	próbka 2
1		
2		
·		
·		
·		
średnia masa \bar{m} [g] niepewność pojedynczego pomiaru s_m [g] niepewność średniej $s_{\bar{m}}$ [g] Δ_m [g] $\Delta_m / \sqrt{3}$ [g] u_m [g]		

pomiar średnicy próbki – D [cm]		
pomiar	próbka 1	próbka 2
1		
2		
·		
·		
·		
średnia \bar{D} [cm] niepewność pojedynczego pomiaru s_D [cm] niepewność średniej $s_{\bar{D}}$ [cm] Δ_D [cm] $\Delta_D / \sqrt{3}$ [cm] u_D [cm]		

pomiar wysokości próbki – H [cm]		
pomiar	próbka 1	próbka 2
1		
2		
⋮		
⋮		
⋮		
średnia wysokość \bar{H} [cm] niepewność pojedynczego pomiaru s_H [cm] niepewność średniej $s_{\bar{H}}$ [cm] Δ_H [cm] $\Delta_H / \sqrt{3}$ [cm] u_H [cm]		

pomiar objętości próbki za pomocą menzurki [cm³]		
	próbka 1	próbka 2
objętość V_1 wody w menzurce [cm ³] objętość V_2 wody i próbki [cm ³] objętość próbki $V = V_2 - V_1$ [cm ³] $\Delta_{V1} = \Delta_{V2}$ [cm ³] $\Delta_{V1} / \sqrt{3} = \Delta_{V1} / \sqrt{3}$ [cm ³]		

pomiar masy wypartej wody – m_{ww} [g]				
pomiar	próbka 1		próbka 2	
	m_{zwp}	m_{zw}	m_{zwp}	m_{zw}
1				
2				
⋮				
⋮				
⋮				
średnia \bar{m}_{zwp} lub \bar{m}_{zw} [g] niepewność pojedynczego pomiaru s_m [g] niepewność średniej $s_{\bar{m}}$ [g] $\Delta_m = \Delta_{m_{zwp}} = \Delta_{m_{zw}}$ [g] $\Delta_m / \sqrt{3}$ [g] $u_{m_{zwp}}$ lub $u_{m_{zw}}$ [g]				
$m_{ww} = \bar{m}_{zwp} - \bar{m}_{zw}$ [g]				

Jeżeli zdecydowałaś/zdecydowałeś się na skorzystanie z możliwości wytarowania wagi po ustawieniu na niej zlewki z wodą, co po zanurzeniu próbki pozwala bezpośrednio zmierzyć masę wypartej wody dane umieść w tabelce jak niżej.

pomiar masy wypartej wody – m_{ww} [g]		
pomiar	próbka 1	próbka 2
1		
2		
·		
·		
·		
średnia \bar{m}_{ww} [g] niepewność pojedynczego pomiaru $s_{m_{ww}}$ [g] niepewność średniej $s_{\bar{m}_{ww}}$ [g] $\Delta_{m_{ww}}$ [g] $\Delta_{m_{ww}}/\sqrt{3}$ [g] $u_{m_{ww}}$ [g]		

Wyznaczanie gęstości

	gęstość [g/cm³]	
	próbka 1	próbka 2
Metoda A		
Metoda B		
Metoda C		

W obliczeniach dla metody C uwzględnij zależność gęstości wody od temperatury. Dla ułatwienia życia podajemy niżej tabelę ukazującą tę zależność dla zakresu temperatur pokojowych, przy ciśnieniu atmosferycznym (*Handbook of Chemistry and Physics, CRC press, 64th Ed.*)

temperatura [°C]	gęstość [g/cm ³]	temperatura [°C]	gęstość [g/cm ³]
16	0,998946	21	0,997996
17	0,998778	22	0,997774
18	0,998599	23	0,997542
19	0,998408	24	0,997300
20	0,998207	25	0,997048