



Podstawy Fizyki Ciepło

Praca zbiorowa

Ćwiczenie F 23

**WYZNACZANIE OBJĘTOŚCI PRZEPLYWAJĄCEJ
KRWI METODĄ KALORYMETRYCZNĄ**

opr. techn. Mirosław Maś

Uniwersytet Przyrodniczo - Humanistyczny
Siedlce 2019

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie przy pomocy bilansu cieplnego objętości krwi przepływającej przez rękę metodą kalorymetryczną, oraz obliczenie ile procent ogólnej ilości krwi tłoczonej przez serce przepływa w czasie pomiaru przez dłoń.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy sprawdzić czy zestaw laboratoryjny jest kompletny.

Do ćwiczenia należy opanować następujące zagadnienia teoretyczne:

- elementy kinetyczno-molekularnej teorii budowy ciał stałych, cieczy i gazów,
- zasada zachowania energii, bilans cieplny,
- ciepło, temperatura, ciepło właściwe, jednostki,
- ruch cieczy (idealnej i rzeczywistej),
- kinetyka układu krążenia,

2. Wprowadzenie teoretyczne

Elementy kinetyczno-molekularnej teorii budowy ciał stałych, cieczy i gazów.

Ciała w stanie gazowym charakteryzują się tym, że cząsteczki znajdują się na ogół w dużych odległościach i działają na siebie głównie w krótkich chwilach zderzeń. W przypadku gazu zamkniętego w naczyniu, jego cząsteczki poruszając się bezładnie we wszystkich kierunkach zderzają się ze sobą i ze ściankami naczynia. W wyniku zderzeń bardzo dużej liczby cząsteczek powstaje ciśnienie. Ciśnienie to można określić w zależności od objętości gazu i jego temperatury.

W cieczech odległości między drobinami są porównywalne z ich wymiarami. Dlatego siły międzycząsteczkowe odgrywają w nich istotną rolę. Wobec tego ciecze różnią się od gazów znacznie większymi siłami kohezji pomiędzy cząsteczkami i bardziej gęstym wypełnieniem przez nie przestrzeni. Ciecze są praktycznie nieściśliwe, a objętość ich zmienia się jedynie nieznacznie ze zmianami ciśnienia i temperatury. Wzrost temperatury powoduje wzrost objętości, natomiast zmniejszenie gęstości cieczy. W odróżnieniu od gazów zachowują stałą objętość, czyli upodabniają się do ciał stałych. Cząsteczki w cieczy w wyniku ruchu cieplnego drgają głównie wokół swoich położeń równowagi.

Ciałami stałe charakteryzują się tym, że elementy, z których są zbudowane, ułożone są w przestrzeni w sposób uporządkowany.

Zasada zachowania energii, bilans cieplny. Bilans cieplny jest zestawieniem ilości ciepła pobranego i oddanego przez poszczególne elementy zamkniętego układu, które nie są ze sobą w stanie równowagi termodynamicznej. Stosowanie bilansu cieplnego możliwe jest tylko w przypadku układów, które są idealnie odizolowane od otoczenia, gdyż w tym przypadku nie występuje zmiana całkowitej energii układu na skutek przepływu ciepła (od lub do otoczenia) lub wykonywanie pracy. Zgodnie z zasadą zachowania energii całkowite ciepło pobrane (Q_1) przez ciało o niższej temperaturze musi być równe ilości ciepła oddanego (Q_2) przez ciało, którego początkowa temperatura była wyższa:

$$Q_1 = Q_2$$

Powyższa zasada obowiązuje w tym ćwiczeniu. Dlatego możemy zapisać:

$$Q_{kr} = Q_p$$

Gdzie Q_{kr} - ilość ciepła oddanego przez przepływającą krew a ΔQ_p - ilość ciepła pobranego przez wodę i kalorymetr, w którym umieszczono rękę.

Ciepło to jedna z form przekazywania energii pomiędzy układem a otoczeniem na skutek istniejącej między nimi różnicy temperatury. Ze zjawiskiem transferu (przepływu) ciepła spotykamy się praktycznie codziennie. Jednym z takich przykładów jest proces przekazywania energii termicznej (energii cieplnej) pomiędzy gorącym kubkiem, tj. układem, a otoczeniem, czyli miejscem, w którym znajduje się kubek. Konsekwencją tego przekazu energii jest proces stopniowego zmniejszania się temperatury kubka, zachodzący aż do chwili, w której temperatura kubka zrówna się z temperaturą otoczenia - innymi słowy proces ten trwa do momentu osiągnięcia przez kubek oraz otoczenie stanu równowagi termodynamicznej.

Jednostką ciepła w układzie SI jest jednostka energii, czyli dżul (J).

Ciepło właściwe jest współczynnikiem określającym skłonność ciała do łatwiejszej lub trudniejszej zmiany temperatury pod wpływem dostarczonej energii cieplnej. Jest ono ściśle związane ze wzorem na ilość energii cieplnej potrzebnej do ogrzania/ochłodzenia ciała. Wzór na ciepło właściwe jest prostym przekształceniem wzoru na tę energię:

$$C_w = \frac{Q}{m\Delta T}$$

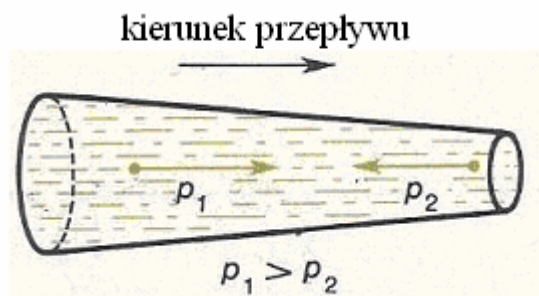
Jednostką ciepła właściwego jest J/kgK. Ciepło właściwe jest zależne od substancji i od jej stanu skupienia.

Temperatura jest podstawową wielkością fizyczną charakteryzującą zjawiska cieplne. Wskazuje ona kierunek przepływu energii cieplnej. Gorące ciało, (czyli ciało o wyższej temperaturze) ma energię „na wyższym poziomie”, niż ciało chłodne. A ponieważ poziomy energetyczne dążą do wyrównywania się, to **samorzutny przepływ energii zachodzi zawsze od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze**. To wydaje się oczywiste, bo przecież nikt nigdy nie zauważył - że zimny lód ogrzał cieplejszego niż on człowieka, jednak warto mieć świadomość, że fakt ten jest podstawą dla pojęcia temperatury. Jednostką temperatury w układzie SI jest Kalwin (K).

Ruch cieczy.

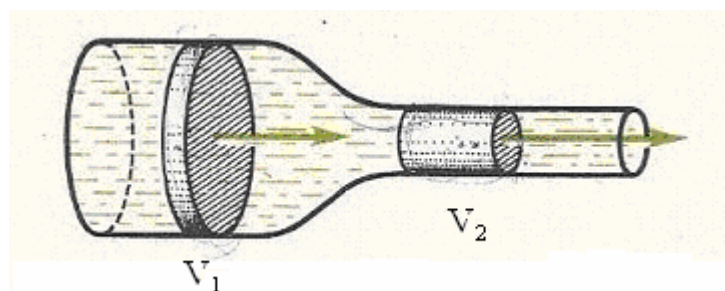
Opis ruchu cieczy jest różny dla cieczy idealnych i rzeczywistych.

Przepływ cieczy (i gazów) odbywa się pod wpływem różnicy ciśnień. Przykład ruchu cieczy w rurze przedstawia rysunek.



Ciecz idealna, to ciecz nielepka i nieściśliwa, można dla niej napisać ogólne równanie ruchu, które w pewnym przybliżeniu może służyć także do opisu zachowania się cieczy rzeczywistych.

Przy przepływie cieczy idealnej przez sztywną rurę jest spełnione *prawo ciągłości*, które mówi, że przez każdy przekrój rury w tym samym czasie przepływa taka sama objętość cieczy:



$$V_1 = V_2$$

albo

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

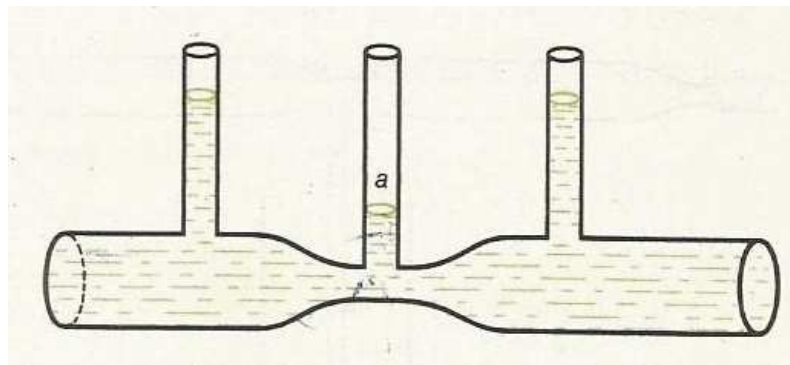
lub

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

gdzie: V_1 - jest prędkością cieczy przepływającej przez przekrój S_1 ;
 V_2 - prędkością cieczy przepływającej przez przekrój S_2 .

Z równania ciągłości wynika, że prędkości przepływu cieczy są odwrotnie proporcjonalne do przekroju rury. Prędkość cieczy (przepływając od przekroju większego do mniejszego) ulega przyspieszeniu, co oznacza, że na warstwę cieczy ulegającą przyspieszeniu działa siła. Siła ta wytwarza ciśnienie, tzw. **ciśnienie statyczne**, które zgodnie z *prawem Pascala* rozchodzi się we wszystkich kierunkach jednakowo.

Do pomiaru tych ciśnień stosuje się manometry w postaci pionowych rurek wmontowanych do przewodu, przez który płynie ciecz.



Na podstawie pomiaru wysokości słupka cieczy w manometrze obliczamy ciśnienie hydrostatyczne $h\gamma$ (gdzie h jest wysokością słupka cieczy, a γ - ciężarem właściwym cieczy), które jest równe ciśnieniu statycznemu przepływającej cieczy.

Dla pełnego opisu ruchu cieczy sformułujemy związek pomiędzy ciśnieniami oraz prędkością przepływu. Zależność nosi nazwę *równania Bernoulliego*. Wynika z niego, że w przekrojach większych prędkość cieczy jest mniejsza, ciśnienie większe; natomiast w przewężeniach - prędkość cieczy wzrasta, a ciśnienie maleje. W przewężeniu ciśnienie zmniejsza się tym bardziej, im bardziej wzrasta tam prędkość przepływu cieczy.

Dotychczas omawialiśmy przepływ cieczy przez rury o sztywnych ścianach. Zupełnie inaczej przedstawia się ruch cieczy w rurce elastycznej pod ciśnieniem stałym. Różnica pomiędzy rurką sztywną a elastyczną uwydatnia się dopiero wtedy, gdy ciecz porusza się pod **zmiennym ciśnieniem**. Z rury sztywnej pod wpływem zmiennego ciśnienia ciecz wypływa w sposób przerywany, natomiast z rury elastycznej - strumieniem ciągłym, o ile przerwy w działaniu ciśnienia nie są zbyt długotrwałe. Wynika to stąd, że pod wpływem ciśnienia rura rozpręża się i gromadzi pewien zasób płynu; kiedy ciśnienie przestaje działać, ściany rury kurczą się i wypychają zmagazynowaną ciecz. Każde zaburzenie, powstałe w rurce elastycznej wypełnionej cieczą, rozchodzi się w niej z określoną prędkością. Przypuśćmy, że wywołujemy krótkotrwałe ciśnienie, które na początku elastycznej rury wytwarza jej

"wzdęcie". Dzięki sprężystości ścian rury, wzdęcie to porusza się podobnie jak fala na powierzchni wody. Rozchodzenie się opisanego zaburzenia nosi nazwę *fali tętna*.

Ruch cieczy rzeczywistej. Przy przepływie cieczy rzeczywistej istotną rolę w jej ruchu odgrywa *opór lepki* (*lepkość*). Opór ten jest wywołany wzajemnym oddziaływaniem sił molekularnych sąsiednich warstw cieczy.

Dla zwykłych cieczy, złożonych z cząsteczek o niewielkiej masie molekularnej (tzw. *cieczy niutonowskich*) oraz dla gazów, współczynnik lepkości jest wielkością stałą przy ustalonej temperaturze i ustalonym ciśnieniu. Dla *cieczy nieniutonowskich*, tzn. dla cieczy o dużym ciężarze drobinowym, a szczególnie dla ciał bezpostaciowych, współczynnik lepkości przy ustalonej temperaturze i stałym ciśnieniu nie jest wielkością stałą. Współczynnik lepkości w tym ostatnim przypadku zależy od różnych parametrów, takich jak czas lub szybkość deformacji. Przykładem cieczy nieniutonowskich są m. in. takie ciecze jak *smoła* lub *protoplazma* żywych komórek.

Na ogół opis szczegółowy ruchu lepkiej cieczy rzeczywistej jest bardzo trudny, ponieważ zwykle bardzo trudne jest rozwiązanie równania dla różnych konkretnych sytuacji.

Dwa rodzaje przepływów lepkich są stosunkowo proste do ujęcia matematycznego. Pierwszy z nich jest to przepływ *laminarny* (tzn. bezwirowy, nieburzliwy) cieczy w rurach cylindrycznych o przekroju kołowym.

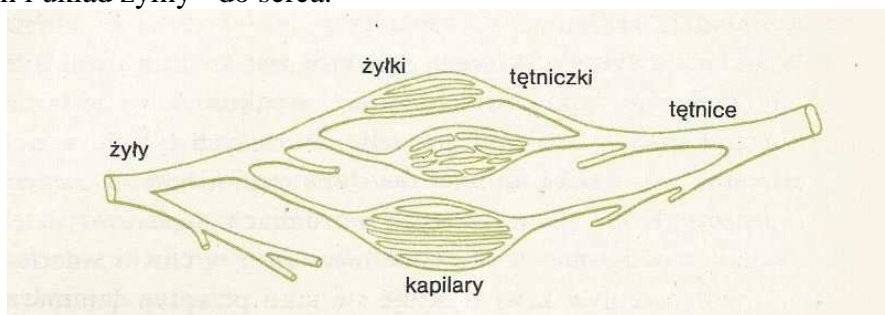
W tym przypadku siła lepkości wpływa na prędkość przepływu. A związany z tą prędkością *strumień* (zwany również *wydatkiem*), równy jest liczbowo objętości cieczy przepływającej przez poprzeczny przekrój rury w jednostce czasu, i wynosi

$$J = vS$$

gdzie $S = \pi r^2$ jest polem powierzchni przekroju.

Kinetyka układu krążenia.

Przepływ krwi u ssaków odbywa się pod wpływem periodycznie zmiennego ciśnienia serca, działającego podobnie jak pompa tłocząca. Krew płynie poprzez (zamknięty) układ elastycznych rur, jakimi są naczynia krwionośne, z serca poprzez tętnice, układ naczyń włosowatych i układ żylny - do serca.



Na rysunku schematycznie pokazano, jak (w narządach i tkankach) tętnice rozdzielają się na tętniczki, a następnie, na naczynia włosowate (*kapilary*) oraz jak kapilary łączą się w żyłki, a te z kolei przechodzą w żyły.

Ruch krwi w układzie krwionośnym jest uwarunkowany zarówno pracą serca, jak i właściwościami samej krwi oraz stanem układu naczyniowego, istotną rolę odgrywa tu łączny przekrój (tzw. *światło*) naczyń i sprężystość ścianek.

Na ogół przepływ krwi traktuje się jako przepływ laminarny.

3. Skład zestawu doświadczalnego.

W skład zestawu doświadczalnego wchodzi:

- kalorymetr wodny (zlewka szklana)
- waga
- termometr
- stoper

Opis ćwiczenia

Pomiar przeprowadza się w kalorymetrze wodnym, w którym umieszcza się rękę, zanurzając ją po staw nadgarstkowy do dokładnie zaznaczonej granicy. W początkowym okresie temperatura dłoni szybko maleje, a w kalorymetrze z wodą rośnie. Po upływie około 10 minut temperatury: ręki, wody i kalorymetru wyrównują się, po czym następuje powolny wzrost temperatury całego układu w wyniku oddawania ciepła przez przepływającą krew.

Krew jest cieczą nieniutonowską, a zatem nie stosuje się do znanych praw przepływu cieczy niuonowskich. Ruch krwi w organizmie odbywa się pod wpływem rytmicznych skurczów serca w naczyniach krwionośnych o elastycznych ścianach. Krew w organizmach stałocieplnych jest między innymi nośnikiem energii, która może być przekazywana na sposób ciepła. Fakt ten pozwala na przybliżony pomiar objętości przepływającej krwi przez kończynę metodą kalorymetryczną.

4. Przebieg ćwiczenia:

1. Wyznaczamy objętość V_d dłoni:
2. Zaznaczyć na nadgarstku ręki kreskę i wyznaczyć objętość ręki zanurzając ją do zaznaczonego miejsca w zlewce z podziałką (zlewka jest częścią kalorymetru). Szukana objętość jest różnicą odczytu poziomu wody przed i po włożeniu do niej dłoni.
3. Do zlewki wlewamy taką ilość wody, aby dłoń (lekko zwinięta w pięść) mogła być zanurzona do wcześniej zaznaczonej granicy. Woda powinna mieć temperaturę $\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$.
4. Przed rozpoczęciem pomiarów zmierz temperaturę początkową wody.
5. Umieszczamy ponownie rękę w kalorymetrze, zanurzając ją po staw nadgarstkowy do dokładnie oznaczonej granicy (nie opierając przedramienia o brzeg pokrywy naczynia, ze względu na ucisk na naczynie krwionośne). Poruszając palcami mieszamy wodę w kalorymetrze.
6. Co minutę przez 30 min mierzymy i notujemy w tabeli temperaturę wody. W tym czasie nie wyjmujemy dłoni z wody, poruszając palcami mieszamy ciecz w kalorymetrze.
Nie opieraj ręki o dno naczynia i nie zmieniaj głębokości jej zanurzenia.

CZAS t [MIN]	TEMPERATURA T [$^\circ\text{C}$]
0	
1	
2	
3	
4	
...	
27	
28	
29	
30	

7. Po 30 minutach wyjmij dłoń z wody i zmierz tętno.
8. Wyniki pomiarów zmian temperatury w czasie przedstaw na wykresie: $T = f(t)$, gdzie: T - temperatura wody [$^\circ\text{C}$], t - czas [min]. Zaznacz (błędy) niepewności pomiarowe.
9. Do obliczeń wykorzystujemy przyrosty temperatury z przedziału T_A ($t = 10$ min) i T_B ($t = 30$ min).
10. Oszacuj niepewności pomiarowe i wyciągnij wnioski. Zapisz dokładność pomiarów masy, czasu i temperatury.
11. Oblicz błąd maksymalny bezwzględny i względny pomiaru objętości krwi (V_{kr}).

Obliczenia:

1. Obliczamy masę m_r dłoni, korzystając ze wzoru:

$$m_r = d_r \cdot V_r \quad [\text{g}],$$

gdzie:

d_r - gęstość ciała ludzkiego [$= 1.066 \text{ g/cm}^3$],
 V_r - objętość dłoni [cm^3].

2. Ważymy 3 razy zlewkę z wodą. (Zlewka waży 395 g). Obliczamy masę wody.
3. Objętość przepływającej krwi w przedziale czasu obliczamy ze wzoru:

$$V_{kr} = \frac{(m_r c_r + m_v c_v + m_k c_k)(T_B - T_A)}{d_{kr} c_{kr} (T_C - T_{sr})(T_B - T_A)}$$

gdzie:

m_r – masa ręki
 c_r – ciepło właściwe ludzkiego ciała ($3,4 \cdot 10^3 \text{ J/kgxK}$)
 m_v – masa wody
 c_v – ciepło właściwe wody ($4,2 \times 10^3 \text{ J/kgxK}$)
 m_k – masa kalorymetru
 c_k – ciepło właściwe kalorymetru ($0,503 \times 10^3 \text{ J/kg K}$)
 d_{kr} – gęstość krwi ($1,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ – dla kobiet)
($1,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ – dla mężczyzn)
 c_{kr} – ciepło właściwe krwi ($3,6 \times 10^3 \text{ J/kg x K}$)
 T_A – temperatura po upływie $t_A = 10 \text{ min}$
 T_B – temperatura po upływie $t_B = 30 \text{ min}$
 $T_C = 310^0 \text{ K}$
 $T_{sr} = (T_A + T_B)/2$

4. Procent ogólnej ilości krwi tłoczonej przez serce a przepływającej w tym czasie przez rękę obliczmy ze wzoru:

$$p = \frac{V_{kr} \cdot 100\%}{\frac{t_A - t_B}{wn}}$$

gdzie:

n – tętno serca (ilość skurczów serca na minutę)
 w – objętość wyrzutowa serca (ok. 70 ml)
 t – czas odpowiadający punktowi A i B na wykresie

5. Literatura:

1. *Instrukcje do ćwiczeń z fizyki* A. Daniluk
2. *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki i biofizyki* pod redakcją Murkowskiego.
3. *Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki* Stanisław Przystański
4. *Praca dyplomowa „Instrukcja do ćwiczenia nr 23 w pracowni fizycznej - ciepło.”*
Małgorzata Rogulska
5. <http://www.if.ajd.czest.pl/doc/laboratoria/biofizyka/c7.pdf>
6. https://pracowniefizyczne.up.krakow.pl/ /K9_Wydatek-krwi.pdf