A4. Pomiar natężenia przepływu cieczy w zależności od ciśnienia hydrostatycznego

***Celem ćwiczenia** jest poznanie praw przepływu cieczy, doświadczalne zbadanie zależności natężenia przepływu cieczy od ciśnienia oraz określenie rodzaju przepływu badanej cieczy.*

Przepływ – to ruch cieczy. Jest on ***stacjonarny***, jeśli prędkość cieczy w każdym punkcie rozpatrywanej objętości nie zależy od czasu. Ruch stacjonarny nazywa się warstwowym lub ***laminarnym,*** gdy wektory prędkości poszczególnych warstw cieczy są wzajemnie równoległe i tym samym wyznaczają wspólny kierunek przepływu, któremu nie towarzyszy mieszanie się sąsiednich warstw cieczy. Gdy takie mieszanie występuje, przepływ nazywa się ***turbulentnym.***

Przepływ cieczy opisują następujące równania:

Równanie ciągłości strumienia: *prędkości cieczy v w strumieniu są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni przekrojów strumienia S, czyli:* $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$

Równanie Bernoulliego: $$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = const$$

(p – ciśnienie, ρ – gęstość, g- przyspieszenie ziemskie, h – wysokość słupa cieczy),
które mówi, że: *w stacjonarnym strumieniu idealnej i nieściśliwej cieczy całkowite ciśnienie, złożone z ciśnienia statycznego (1 człon równania), dynamicznego (2 człon) oraz hydrostatycznego (3 człon) jest stałe w dowolnym przekroju poprzecznym strumienia.*
Z powyższego równania wynika, że zmiany prędkości przepływu ***cieczy idealnej*** występują tylko pod wpływem *siły ciężkości* oraz *zmian ciśnienia*. W ruchu ***cieczy rzeczywistej*** istotną rolę odgrywa także *siła tarcia wewnętrznego,* czyli ***siła lepkości*** *F,* która – działając pomiędzy warstwami cieczy – dąży do wyrównywania się ich prędkości. Jest ona proporcjonalna do gradientu prędkości *(dv/dr*) dwóch warstw cieczy, odległych o *r* i do powierzchni stykających się warstw *S,* co przedstawia ***prawo Newtona***: $F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dr}$, gdzie η jest w*spółczynnikiem lepkości* danej cieczy.

Natężenie przepływu J **–** jest to objętość cieczy przepływającej przez poprzeczny przekrój rurki w jednostce czasu ($J=V/t$). Wymiarem jest m^3/s.

Z drugiej strony, ***prawo Poisseuille'a*** mówi, że przy przepływie laminarnym natężenie przepływu jest liniową funkcją gradientu ciśnienia hydrostatycznego ($\Delta p/l$) i zależy od czwartej potęgi promienia rurki R, czyli: $$J = \frac{V}{t} = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l}.$$

Powyższe równanie można też zapisać jako: $J = \frac{V}{t} = \pi R^2 \cdot \bar{v}$, gdzie $\bar{v} = \frac{R^2}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l}$ jest ***średnią***

prędkością wypływającej cieczy, równą połowie prędkości maksymalnej.

Ważną wielkością hydrodynamiczną jest tzw. ***liczba Reynoldsa R_e,*** krytyczna wartość, po przekroczeniu której, przepływ przestaje być laminarny, a staje się turbulentny. Jest to bezwymiarowa wielkość, zdefiniowana wzorem: $R_e = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot R}{\eta}$. Dla przepływu laminarnego przez rurkę cylindryczną krytyczna wartość liczby Reynoldsa wynosi $R_e \cong 2500$.

Literatura uzupełniająca:

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker - Podstawy fizyki – T.2. rozdz.15.8-15.10
2. Cz. Bobrowski – Fizyka –krótki kurs – rozdz. 1.10
3. S. Przestalski – Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki – Część 4 rozdz.4

Zobacz też:

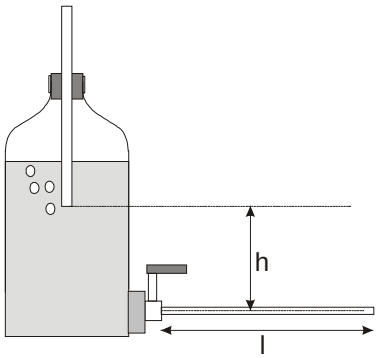
symulacje komputerowe na stronie internetowej *Katedry Fizyki i Biofizyki* **(https://sparrow.up.poznan.pl/kfb/)** (zakładka: *Symulacje zjawisk fizycznych*),

A4. Protokół pomiarów i obliczeń

Nr pary:	Imię i nazwisko studenta:	Kierunek studiów: grupa
Data:	Imię i nazwisko prowadzącego:	Zaliczenie:

Wykonanie ćwiczenia

Przyrządy i materiały: naczynie Mariotte'a, miedziane rurki, zestaw szklanych rurek o różnej długości osadzonych w gumowych korkach, suwmiarka, miara metrowa, stoper, cylinder miarowy, zlewka.



Naczynie Mariotte'a składa się z butli z zaworem umieszczonym ponad dnem, w ścianie bocznej butli oraz korka z osadzoną w nim szklaną rurką. Jeśli w rurce tej znajduje się powietrze to oznacza to, że wypływ cieczy przez dolny (otwarty) zawór odbywa się na skutek ciśnienia hydrostatycznego słupa cieczy o wysokości h (patrz rysunek)

1. Suwmiarką mierzymy wewnętrzną średnicę miedzianej rurki (*2R*), przez którą następuje przepływ cieczy.
2. Za pomocą linijki mierzymy długość *l* badanej miedzianej rurki.
3. Wkręcamy rurkę w otwór zaworu zaopatrzonego w kranik.
4. Naczynie Mariotte'a zamykamy korkiem z osadzoną w nim najkrótszą z dostępnych szklanych rurek. Mierzymy wysokość *h* od końca rurki do poziomu wypływu wody.
5. Odkręcamy kranik i wypuszczamy wodę do zlewki aż do momentu, gdy pojawią się pęcherzyki powietrza u wylotu pionowej rurki, po czym zamykamy kranik i odstawiamy zlewkę na bok.
6. Podstawiamy cylinder miarowy pod badaną miedzianą rurkę i mierzymy objętość V_i (rozpoczynając od V_1 dla i =1) wypływającej wody w czasie t = 30 s.
7. Wodę ze zlewki oraz cylindra miarowego wlewamy z powrotem do naczynia Mariotte'a.
8. Postępując każdorazowo zgodnie z powyższym opisem wykonujemy pomiary natężenia przepływu cieczy dla pozostałych szklanych rurek osadzonych w korkach.

Tabela 1 T = ……[°C] *gęstość wody*: ρ = ……...[kg/m^3]

Długość rurki l	Średnica rurki $2R$	Promień rurki R	Wysokość słupa wody h	Objętość wypływającej cieczy V [10^{-6} m^3]	Ciśnienie powodujące wypływ p [N m^{-2}]	Natężenie przepływu $J\left[10^{-6}\frac{m^3}{s}\right]$	Prędkość przepływu v [m·s^{-1}]
ΔR = ……. [m]							
ΔV = …… [10^{-6} m^3]							
Δt = ……..…. [s]							

Tabela 2

Minimalna prędkość przepływu v_{min} [m·s^{-1}]		Minimalne natężenie przepływu $J_{min}\left[10^{-6}\frac{m^3}{s}\right]$		Liczba Reynoldsa R_{emin}	
v_{min}=	Δv_{min}=	J_{min}=	ΔJ_{min}=	R_{emin}=	ΔR_{emin}=
Zestawienie ($v_{min}\pm\Delta v_{min}$)		Zestawienie ($J_{min}\pm\Delta J_{min}$)		Zestawienie ($R_{emin}\pm\Delta R_{emin}$)	
Maksymalna prędkość przepływu v_{max} [m·s^{-1}]		Maksymalne natężenie przepływu $J_{max}\left[10^{-6}\frac{m^3}{s}\right]$		Liczba Reynoldsa R_{emax}	
v_{max}=	Δv_{max}=	J_{max}=	ΔJ_{max}=	R_{emax}=	ΔR_{emax}=
Zestawienie ($v_{max}\pm\Delta v_{max}$)		Zestawienie ($J_{max}\pm\Delta J_{max}$)		Zestawienie ($R_{emax}\pm\Delta R_{emax}$)	

Wnioski (określ rodzaj przepływu): …….…….

Opracowanie wyników

1. Dla wszystkich pomiarów obliczamy ciśnienie hydrostatyczne p ze wzoru: $p_i=\rho\cdot g\cdot h_i$, przyjmując g=9.81 m/s^2 oraz gęstość wody ρ w temperaturze pomiaru.
2. Dla każdego pomiaru obliczamy natężenie przepływu cieczy J_i ze wzoru: $J_i=\frac{V_i}{t}$ oraz prędkość przepływu cieczy z zależności: $v_i=\frac{J_i}{\pi R^2}$.

Uwaga! Do wszystkim wzorów wstawiamy wielkości fizyczne wyrażone w jednostkach SI !

3. Na papierze milimetrowym wykreślamy zależność natężenia przepływu cieczy J od ciśnienia powodującego ten przepływ $J= f(p)$.
4. Dla maksymalnej i minimalnej prędkości przepływu cieczy przez daną rurkę miedzianą obliczamy odpowiadające im liczby Reynoldsa ze wzoru: $R_e=\frac{R\cdot\rho\cdot v}{\eta}$, gdzie η=0.00106 $\left[\frac{N\cdot s}{m^2}\right]$ jest współczynnikiem lepkości wody. Wnioskujemy, czy badany przepływ jest laminarny czy turbulentny.
5. Błąd pomiaru dla maksymalnej i minimalnej wartości natężenia i prędkości przepływu a także liczby Reynoldsa obliczamy metodą logarytmiczną:

$$\frac{\Delta J_i}{J_i}=\left|\frac{\Delta V_i}{V_i}\right|+\left|\frac{\Delta t}{t}\right| \qquad \frac{\Delta v_i}{v_i}=\left|\frac{\Delta J_i}{J_i}\right|+\left|\frac{2\Delta R}{R}\right| \qquad \frac{\Delta R_e}{R_e}=\left|\frac{\Delta R}{R}\right|+\left|\frac{\Delta v_i}{v_i}\right|.$$

6. Następnie obliczamy i odpowiednio zaokrąglamy błędy bezwzględne powyższych wielkości.
7. Obliczone wartości J, v oraz R_e zestawiamy z błędami pomiarowymi ΔJ, Δv, ΔR_e w postaci: $X=(X\pm\Delta X)jedn.SI$.