

Doświadczenie nr 1

TEMAT : WYZNACZANIE WYKŁADNIKA POTĘGOWEGO CZASU WYPŁYWU WODY W ZALEŻNOŚCI OD GŁĘBOKOŚCI ZBIORNIKA

Instrukcja dla studenta

(opracowana przez dr Danutę Piwowarską)

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie zależności czasu wypływu wody (t) od głębokości zbiornika (H_k) i porównanie jej z teoretyczną zależnością.

2. LITERATURA:

1. K. Weinerowska „Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki”, Politechnika Gdańska, 2004 (
2. <http://www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl>; Mechanika płynów – laboratorium. Ćw.8 USTALONY WYPIY W CIECZY.
3. Gryboś R.: Podstawy mechaniki płynów, tom I, PWN Warszawa 1998
4. T. Dryński, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN Warszawa.
5. J. Typek, Materiały dydaktyczne dla studentów: <http://typjan.zut.edu.pl>
6. <http://labor.zut.edu.pl>; Analiza niepewności pomiarowych.
7. B. Pawlak, R. Gąsowski, J. Kozłowski, Ćwiczenia laboratoryjne z Fizyki dla przyrodników, US, Szczecin.

3. Wstęp teoretyczny

3.1. Równanie Bernoulliego dla płynu doskonałego.

(źródło: <http://www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl>)

Przepływ (wypływ) płynu odbywa się tylko w momencie zaistnienia różnicy ciśnień. Przepływ płynu, w zależności od liczby Reynoldsa, może mieć charakter laminarny (uwarstwiony), lub turbulentny. Przepływ może być również ustalony, gdy jego prędkość jest tylko funkcją miejsca, oraz nieustalony, gdy prędkość jest dodatkowo funkcją czasu. Dla przykładu, kiedy opróżniany jest zbiornik mamy do czynienia z nieustalonym wypływem cieczy, ponieważ poziom cieczy w zbiorniku obniża się, a co za tym idzie zmniejsza się również wysokość słupa cieczy, a tym samym prędkość wypływu. Gdyby jednak, w trakcie wypływu, utrzymywać lustro cieczy na stałym poziomie, wysokość słupa cieczy byłaby stała w czasie, występowałby wypływ ustalony ze stałą prędkością. W celu wyznaczenia prędkości wypływu cieczy, lub objętościowego natężenia przepływu przez otwory w ścianie lub dnie zbiornika wykorzystuje się równanie Bernoulliego. Zagadnienie to rozwiązuje się w oparciu o teorię przepływu jednowymiarowego płynu. Równanie Bernoulliego jest jednym z podstawowych równań mechaniki płynów, wyrażającym zmiany energii mechanicznej (przemianę energii kinetycznej i potencjalnej) strumienia płynu. Równanie zachowania energii dla strugi cieczy idealnej wyprowadza się porównując energię płynu między dwoma przekrojami poprzeczni strugi, przy założeniu, że:

- przepływający płyn jest doskonały (nielepki $\eta=0$, nieściśliwy $\rho = \text{const.}$),
- przepływ jest stacjonarny (ustalony), tzn. pochodna cząstkowa dowolnego parametru przepływu względem czasu jest równa zero,
- przepływ odbywa się bez wymiany ciepła i masy,
- do płynu nie jest dostarczana z zewnątrz żadna energia mechaniczna,
- przepływ ma miejsce w jednorodnym polu grawitacyjnym.

Przy powyższych założeniach równanie Bernoulliego przyjmuje ogólną postać:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.} \quad (1)$$

Mnożąc wszystkie człony równania (1) przez gęstość płynu (ρ) otrzymujemy równanie bilansujące energię mechaniczną i pracę sił tarcia w odniesieniu do jednostki objętości płynu:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho g h = p_d + p + p_h = p_0 = const. \quad (2)$$

Wszystkie człony powyższego równania mają wymiar [Pa].

Dzieląc obie strony równania (2) przez człon ρg (ciężar właściwy płynu) otrzymamy:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + h = h_0 = const. \quad (3)$$

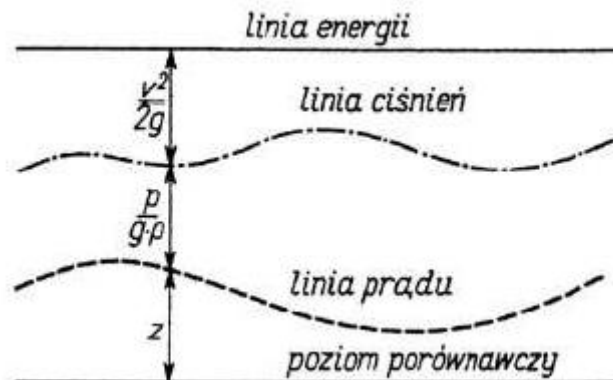
gdzie:

$\frac{v^2}{2g}$ – wysokość prędkości [m],

$\frac{p}{\rho g}$ – wysokość ciśnienia [m],

h – wysokość położenia [m].

Zależność wyrażoną równaniem Bernoulliego w postaci (3) można opisać w następujący sposób: dla każdego punktu linii prądu (przekroju strugi) cieczy doskonałej, znajdującej się w ruchu ustalonym pod działaniem wyłącznie siły ciężenia jako siły masowej, suma wysokości położenia, wysokości ciśnienia i wysokości prędkości jest wartością stałą. Poniżej przedstawiono graficzną postać równania Bernoulliego (rys. 1).



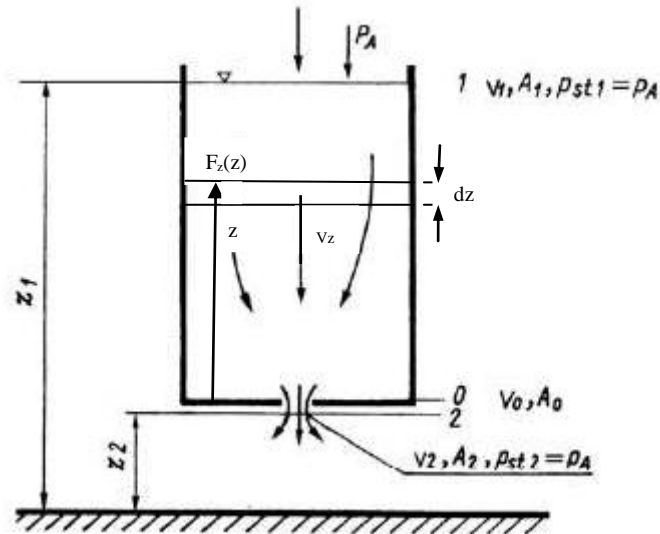
Rys. 1. Graficzna interpretacja równania Bernoulliego.
(rys. źródło: <http://www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl>.)

Z rysunku 1 wynika, że rozpatrywana linia prądu wzniesiona jest ponad pewien poziom porównawczy oznaczony jako z . Jeżeli nad każdym punktem będziemy odkładać w górę pewną wysokość

$\left(\frac{p}{\rho g}\right)$, to otrzymamy linię ciśnienia. Linia ciśnienia obrazuje sumę $\left(\frac{p}{\rho g} + z\right)$, czyli przebieg wartości energii potencjalnej. Odmierzając od linii ciśnienia wartość wysokości prędkości $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ otrzymamy linię energii. Jak widać sumaryczna energia jest wartością stałą.

3.2. Wpływ ze zbiornika

Z ustalonym wypływem cieczy mamy do czynienia, gdy swobodna powierzchnia (zwierciadło) cieczy pozostaje na niezmięnionej wysokości $z = (z_1 - z_2) = \text{const.}$ (rys.2.)



Rys. 2. Ustalony wypływ cieczy przez mały otwór w dnie zbiornika.
(rys. źródło: <http://www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl.>)

Oznaczając przez: A_1 - pole powierzchni zwierciadła cieczy w zbiorniku, v_1 - prędkość i p_1 - ciśnienie w przekroju pierwszym, natomiast A_2 , v_2 , p_2 , powierzchnię otworu znajdującego się w dnie zbiornika, prędkość wypływającej cieczy oraz ciśnienie w przekroju wylotowym, równanie Bernoulliego będzie miało postać:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2. \quad (4)$$

Gdy powierzchnia zwierciadła cieczy A_1 jest dużo większa od powierzchni otworu A_2 ($A_1 \gg A_2$) zakłada się, że mamy do czynienia z wypływem cieczy przez mały otwór. Wynika z tego, że prędkość v_1 jest bardzo

mała w porównaniu z prędkością v_2 , więc człon $\left(\frac{v_1^2}{2g}\right)$ może być pominięty. Ponadto ciśnienie w obu przekrojach nieznacznie się od siebie różni i można przyjąć, że $p_1 = p_2 = p_a$ (ciśnienie atmosferyczne). Liniowa prędkość teoretyczna wynosi, więc:

$$v_2 = v_t = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}. \quad (5)$$

Powyższe równanie to tzw. wzór **Torricelliego**. Wynika z niego, że teoretyczna prędkość wypływu cieczy przez mały otwór w ścianie lub dnie zbiornika zależy tylko od głębokości jego zanurzenia pod lustrem cieczy. W rzeczywistości prędkość wypływu jest mniejsza od wyznaczonej z równania (5). Wynika to z istnienia sił masowych oraz sił stycznych (lepkości) występujących w płynach rzeczywistych.

3.2.1. Współczynnik strat prędkości

Wpływ lepkości cieczy uwzględniono wprowadzając do równania (5) współczynnik poprawkowy (strat prędkości) φ , definiowany wzorem:

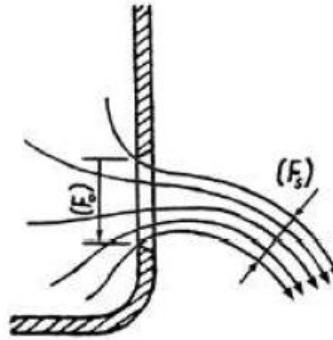
$$\varphi = \frac{v_{rz}}{v_t} \quad (\varphi \leq 1). \quad (6)$$

Podstawiając (5) do równania (6) otrzymujemy równanie na rzeczywistą prędkość liniową:

$$v_{rz} = \varphi \cdot v_t = \varphi \cdot \sqrt{2g(z_1 - z_2)}. \quad (7)$$

3.2.2. Współczynnik kontrakcji

Obserwacje strugi cieczy wypływającej przez otwór dowodzą, że przekrój strugi w pewnej odległości od otworu jest mniejszy niż przekrój samego otworu. Zjawisko to nosi nazwę kontrakcji strugi i wynika z faktu istnienia sił masowych w płynie.



Rys. 3. Strumień cieczy wypływającej przez mały otwór w ścianie bocznej zbiornika.

Stosunek powierzchni przekroju strumienia F_s do powierzchni otworu F_0 (A_2) nazywa się współczynnikiem kontrakcji (przewężania) strumienia :

$$\mu = \frac{F_s}{F_0}. \quad (8)$$

Wartość współczynnika kontrakcji zależy od ukształtowania krawędzi otworu, zaokrąglenia jego brzegów oraz chropowatości. Zjawisko kontrakcji uwidacznia się najbardziej dla otworów ostro krawędziowych. Dla otworu okrągłego o delikatnie zaokrąglonych krawędziach i małej chropowatości wartość współczynnika kontrakcji może osiągnąć jedność.

3.2.3. Współczynnik wypływu

Współczynnik przepływu (wypływu) obejmuje oba wyżej wymienione zjawiska. Jeżeli przejmujemy, że rzeczywiste objętościowe natężenie przepływu wynosi:

$$\dot{V}_{rz} = F_s \cdot v_{rz}, \quad (9)$$

podstawiając równania (7) oraz (8) otrzymamy:

$$\dot{V}_{rz} = F_s \cdot v_{rz} = \mu \cdot F_0 \cdot \varphi \cdot v_t = \mu \cdot \varphi \cdot \dot{V}_t, \quad (10)$$

gdzie: \dot{V}_t , to teoretyczne objętościowe natężenie wypływu:

$$\dot{V}_t = F_0 \cdot v_t = A_2 \cdot v_2. \quad (11)$$

Przekształcając równanie (10) otrzymujemy zależność określającą współczynnik wypływu:

$$\alpha = \frac{\dot{V}_{rz}}{\dot{V}_t}, \quad (12)$$

$$\alpha = \mu \cdot \varphi = \kappa \quad (13)$$

gdzie $\alpha = \kappa$ to współczynnik przepływu (wypływu).

W przypadku wypływu cieczy przez otwór ostro krawędziowy, wartość $\kappa = \alpha = 0,61-0,63$ [lit.3]. Widać stąd, że bez jego uwzględnienia przy obliczeniu objętościowego natężenia przepływu można popełnić błąd rzędu 40 %.

3.3. Określenie czasu wypływu cieczy przez otwór w dnie

Wyprowadzone na podstawie równania Bernoulliego wzory, umożliwiające określenie prędkości wypływu cieczy przez otwór znajdujący się w dnie zbiornika lub w ścianie bocznej, są słuszne w przypadku przepływu ustalonego. Niekiedy jednak wypływ z otworu ma charakter nieustalony, co oznacza, że warunki przepływu cieczy ulegają zmianom w czasie. Najczęstszą przyczyną tego zjawiska są zmiany położenia zwierciadła cieczy przed /lub za ścianką, w której znajduje się otwór. Przykładem takiej sytuacji jest zagadnienie opróżniania zbiornika, kiedy to zwierciadło znajdującej się w nim cieczy stopniowo obniża się, a wartości prędkości i natężenia przepływu zmniejszają się w miarę wypływu cieczy przez otwór. Formuły określające prędkość i natężenie ustalonego przepływu cieczy, w przypadku nieustalonym pozwalają jedynie określić chwilową prędkość i chwilowe natężenie przepływu cieczy przez otwór.

Aby wyprowadzić formułę określającą czas opróżniania zbiornika przez otwór, przyjmuje się założenia:

- przepływ w zbiorniku ma charakter jednowymiarowy;
- nieustalony ruch cieczy podczas jej wypływu ze zbiornika można taktować jako sumę nieskończonej liczby chwilowych stanów ustalonych.

Rzeczywista prędkość wypływu cieczy przez otwór znajdujący się w dnie zbiornika będzie wówczas określona za pomocą z równania (7):

$$v_{rz} = \varphi \cdot v_t = \varphi \cdot \sqrt{2g(z_1 - z_2)}. \quad (7)$$

Chwilowy wydatek cieczy z takiego otworu określa równanie:

$$Q_{ch}(z) = v_{rz}(z) F_s \quad (14)$$

Podstawiając zależności (7), (8) oraz (13) do równania (14) i wprowadzając oznaczenie $z = z_1 - z_2$ otrzymujemy:

$$Q_{ch}(z) = \kappa F_0 \sqrt{2gz} \quad (15)$$

Dla przypomnienia: κ jest współczynnikiem wypływu (przepływu) cieczy, natomiast F_s i F_0 są odpowiednio polami przekroju strumienia i otworu.

W przypadku wypływu cieczy ze zbiornika (przepływ traktujemy jako chwilowo ustalony), po czasie dt zwierciadło cieczy obniży się z głębokości z o wartość dz (**patrz rys.2**), stąd wyznaczymy elementarną zmianę objętości wypływu cieczy dV w zbiorniku:

$$dV = -F_z(z) dz \quad (16)$$

gdzie $F_z(z)$ - jest polem przekroju poprzecznego zwierciadła cieczy w odległości z nad dnem zbiornika, a znak „minus” oznacza ubytek objętości cieczy w zbiorniku. Ta sama objętość dV wypłynęła w czasie dt przez otwór z chwilowym wydatkiem $Q_{ch}(z)$:

$$dV = Q_{ch}(z) dt \quad (17)$$

Podstawiając (17) do (16) oraz wykorzystując zależność (15) określającą wydatek chwilowy, po przekształceniach otrzymujemy:

$$dt = - \frac{F_z(z)}{\kappa F_{otw} \sqrt{2gz}} dz \quad (18)$$

Całkowity czas obniżania zwierciadła cieczy od $z_1 = H_p$ (**początkowy** poziom cieczy w zbiorniku, patrz rys.2) do $z_2 = H_k$ (**końcowy** poziom cieczy w zbiorniku) jest sumą odpowiednich czasów elementarnych dt , a zatem:

$$T = \int_0^T dt = - \int_{H_p}^{H_k} \frac{F_z(z)}{\kappa F_{otw} \sqrt{2gz}} dz \quad (19)$$

Wyłączając wartości stałe przed całkę i uwzględniając znak „-”, otrzymujemy:

$$T = \frac{1}{\kappa F_{otw} \sqrt{2g}} \int_{H_k}^{H_p} \frac{F_z(z)}{\sqrt{z}} dz \quad (20)$$

Jest to formuła umożliwiająca teoretyczne określenie czasu obniżenia się zwierciadła cieczy od wysokości $z_1=H_p$ do $z_2=H_k$ nad dnem.

W szczególnym przypadku, gdy zbiornik jest całkowicie opróżniany, $z_2=H_k=0$, wtedy czas wypływu określa zależność:

$$T = \frac{1}{\kappa F_{otw} \sqrt{2g}} \int_0^{H_p} \frac{F_z(z)}{\sqrt{z}} dz \quad (21)$$

Funkcja $F_z(z)$ określa zmienność pola przekroju poprzecznego zbiornika w zależności od wysokości nad jego dnem i musi być określona indywidualnie dla każdego zbiornika. Jednak dla **zbiorników cylindrycznych** (tak jak w naszym przypadku lub prostokątnych), pole przekroju poprzecznego jest stałe na wysokości zbiornika i wówczas równanie (21) upraszcza się ostatecznie do:

$$T = \frac{F_z}{\kappa F_{otw} \sqrt{2g}} \int_0^{H_p} \frac{dz}{\sqrt{z}} = \frac{2F_z}{\mu F_{otw} \sqrt{2g}} \sqrt{H_p} \quad (22)$$

Jak wynika z obserwacji, w końcowej fazie opróżniania zbiornika mamy do czynienia z charakterystycznym zjawiskiem powstawania intensywnych wirów w okolicy otworu. Zjawisko to jest tym intensywniejsze, im większy jest zbiornik. Typową sytuacją z życia codziennego, w której można je zaobserwować, jest końcowy etap wypływu wody z wanny. Oczywiście jest, że stosując jednowymiarowy model opisu zjawiska, nie jest możliwe odwzorowanie wspomnianego efektu. Z tego względu zastosowanie wzoru (21) do pełnego opróżniania zbiornika może prowadzić do pewnych niezgodności uzyskanych wyników z obserwacją. Można więc uznać, że formuła określająca teoretyczny czas opróżniania zbiornika w dobry sposób odzwierciedla rzeczywistość dla $z_1=H_p$ większego od pewnej wysokości granicznej, poniżej której może nastąpić efekt zawirowań.

4. Wykładnik potęgowy czasu wypływu wody

Wzór (22) jest wzorem na czas wypływu wody ze zbiornika w zależności od wysokości nad jego dnem. W przypadku ma on następującą postać:

$$T = \frac{2F_z}{\kappa F_0 \sqrt{2g}} \sqrt{H_p} \quad (23)$$

Celem tego ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie wykładnika potęgowego czasu wypływu wody ze zbiornika w zależności od wysokości oraz porównanie go z wykładnikiem potęgowym występującym we wzorze (23).

Celem pośrednim jest też wykorzystanie metod analizy wymiarowej do wyprowadzenia powyższego wzoru na potrzeby doświadczenia.

Za wielkości istotne dla czasu t wypływu wody z dna zbiornika musimy uznać:

- wysokość, na której znajduje się ciecz- H_p [m] ($H_p = (z_1 - z_2)$ wysokość wody w zbiorniku od ustalonego poziomu "0", patrz rys.2),
- przyspieszenie grawitacyjne g [m/s²].

Jeżeli wyrażenie $\frac{2F_z}{\alpha F_0}$ występujące we wzorze (23) zastąpimy stałą C , to szukaną zależność $t = f(H, g)$

możemy przedstawić w postaci iloczynu ww. wielkości, każdej w nieznanej jeszcze potęgde:

$$t = C \cdot H_p^\alpha \cdot g^\beta \quad (24)$$

Dla jednostek miar otrzymujemy:

$$(\text{s})^1 = (\text{m})^\alpha \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^\beta \quad (25)$$

Otrzymujemy układ równań:

$$\begin{cases} 1 = -2\beta \\ 0 = \alpha + \beta \end{cases}$$

z którego wyznaczmy:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} \\ \beta = -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (26)$$

a stąd:

$$t = C \cdot H_p^{0,5} \cdot g^{-0,5} \quad \text{lub} \quad t = \frac{C}{\sqrt{g}} \cdot H_p^{0,5} \quad (27)$$

co jest zgodne z równaniem (23), przytoczonym na początku tego opracowania. Ponieważ analiza wymiarowa nie daje informacji o stałej C (**constant**), należy ją wyznaczyć doświadczalnie.

Wzór (27) można zapisać w postaci:

$$\ln t = 0,5 \ln H_p + \ln \left(\frac{C}{\sqrt{g}} \right) \quad (28)$$

(porównaj: $y = a \cdot x + b$)

Wtedy wykładnik potęgowy czasu wypływu wody (α) jest określony przez współczynnik kierunkowy (a) nachylenia prostej opisanej równaniem (28). Określenie parametru b prostej opisanej równaniem (28) pozwala wyznaczyć wartość stałej C .

5. OPIS DOŚWIADCZENIA

Cel ćwiczenia:

Pomiary mają na celu wyznaczenie zależności czasu wypływu wody (t) od głębokości zbiornika (H_k) i porównanie jej z teoretyczną zależnością.

5.1. Zestaw pomiarowy

Na zestaw pomiarowy składają się: cylindryczna plastikowa butelka z obciętym dnem o stałym przekroju poprzecznym, korek (lub nakrętka) z cienką rurką, woda, przymiar liniowy oraz stoper.

5.2. Metoda pomiarowa

Czas wypływu wody ze zbiornika w zależności od wysokości nad jego dnem opisuje równanie (22)

$$T = \frac{2F_z}{\kappa \cdot F_0 \sqrt{2g}} \sqrt{H_p}$$

gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim, a H_p głębokością wody w zbiorniku.

Jednakże na potrzeby naszego doświadczenia zastosujemy zmodyfikowaną postać tego równania, wyznaczoną metodą analizy wymiarowej, czyli (27):

$$t = \frac{C}{\sqrt{g}} \cdot H_p^{0,5}$$

Ze wzoru (27) (również 22) wynika, że czas jest proporcjonalny do wysokości w potęgę 0,5. Aby potwierdzić tę zależność należy powyższe równanie zapisać w postaci (28):

$$\ln t = 0,5 \cdot \ln H_p + \ln \left(\frac{C}{\sqrt{g}} \right)$$

Doświadczalne wyniki pomiarów aproksymować będziemy zależnością $\ln(t)=f(\ln H_k)$:

$$\ln t = a \cdot \ln H_p + b \quad (29)$$

$$\downarrow \qquad \downarrow$$

$$y = a \cdot x + b$$

gdzie $b = \ln \left(\frac{C}{\sqrt{g}} \right)$.

Metodą regresji liniowej wyznaczamy współczynnik kierunkowy a dla prostej poprowadzonej przez punkty ($\ln t = f(\ln H_p)$). Metoda sporządzania wykresów i metoda regresji liniowej opisana jest w **Lit. 6**. **Współczynnik kierunkowy (a) tej prostej będzie szukaną wartością wykładnika potęgowego (α), a wyznaczenie parametru b prostej pozwala wyznaczyć wartość stałej C. Wyniki należy porównać z wartością teoretyczną.**

Głębokość wody H_p w zbiorniku można zmierzyć bezpośrednio linijką, ale większą dokładność uzyskamy wyznaczając ją ze znajomości objętości V wody wlanej do zbiornika i pola F_z przekroju poprzecznego zbiornika: $H_p = \frac{V}{F_z}$.

5.3. Wykonanie ćwiczenia

1. Przyjąć poziom zerowy $z_2 = H_k = 0$ wysokości słupa cieczy i zaznaczyć ją na ściance zbiornika. Sprawdzić poziome ustawienie wyskalowanego pustego zbiornika, umocować spust tak, aby nie wylewała się nim woda i napełnić zbiornik wodą do ustalonego poziomu $z_2 = H_k = 0$.
2. Przyjąć początkową wysokość słupa cieczy $H_{pi} = z_{Li}$ (w indeksie dolnym i-oznacza Lp.), zaznaczyć ją na ściance zbiornika.
3. Na ściance zbiornika zaznaczyć miejsca odpowiadające położeniu zwierciadła wody dla innych wysokości nieco niższej (o ok. 1 cm) od wcześniej przyjętej wysokości H_{pi} . Wlać do zbiornika wodę na określony poziom H_{pi} .
4. Otworzyć odpływ ze zbiornika i stoperem zmierzyć czas wypływu wody od poziomu $z_{Li} = H_{pi}$ do poziomu $z_2 = H_k = 0$, czynność powtórzyć pięciokrotnie, a wyniki pomiarów zapisać w Tabeli 1.

Uwaga: Najlepiej, aby poziom wody w zbiorniku był nieco wyższy, tak aby pomiar czasu rozpocząć nie od razu, ale od momentu, gdy woda osiągnie określoną wysokość. Zmierzyć czas wypływu wody ze zbiornika, czynność powtórzyć pięciokrotnie.

5. Czynność opisaną w punkcie 3 powtarzać dla co najmniej 6-ciu różnych wysokości słupa wody w naczyniu.

6. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 1.
7. Zrobić zdjęcie układu pomiarowego.

Tabela 1.

Lp.	V [dm ³]	H _{pi} [m]	t [s]					t _{sr} [s]	ln(t _{sr})	ln(H _{pi})	α	u(α)
			1	2	3	4	5					
1.												
2.												
3.												
4.												
5.												
6.												
7.												
8.												

Ponadto podać:

- średnicę otworu $d =$ [mm]; $\Delta d =$ [mm] (niepewność maksymalna pomiaru średnicy otworu)
- pole przekroju poprzecznego zbiornika $F_z =$ [mm²]; $\Delta F_z =$ [mm] (niepewność maksymalna pomiaru średnicy otworu);
- $\Delta V =$ [dm³] (niepewność maksymalna pomiaru objętości wody)
- $\Delta t =$ [s] (niepewność maksymalna pomiaru czasu).

5.4. Opracowanie wyników pomiarowych

1. Uzupełnić tabelę i sporządzić wykres zależności $\ln(t_{sr}) = f(\ln H_{pi})$; zastosować w. (29).
2. Metodą regresji liniowej znaleźć współczynniki a i b tej prostej oraz ich niepewności standardowe $u(a)$, $u(b)$.
3. Przyjmując $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$, wyznaczyć z równania $\ln\left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right) = b$ wartość stałej C:

$$C = \sqrt{g} \cdot e^b \quad (30)$$

gdzie $e \approx 2,718$

oraz jej niepewność: $u(C) = C \cdot u(b)$.

Niepewność $u(a) = u(a)$

4. Zapisać końcowy wzór na **wykładnik potęgowy czasu wypływu wody: $\alpha \pm u(\alpha)$ i $C \pm u(C)$.**
5. Porównać uzyskany wynik z teoretyczną wartością wynikającą ze wzoru (22).
6. Dla chętnych: Przeprowadzić krytyczną analizę otrzymanych wyników i wyznaczyć doświadczalną wartość κ występującą we wzorze (22).

➤ UWAGA

Typowe opracowanie doświadczenia domowego powinno zawierać:

- 1) Tytuł ćwiczenia, datę i miejsce jego wykonania oraz nazwiska osób prowadzących eksperyment.
- 2) Cel i zakres doświadczenia.
- 3) Teoretyczny opis analizowanego zjawiska, wraz z opisem jego poszczególnych elementów.
- 4) Schemat i zdjęcie stanowiska pomiarowego, wraz z opisem jego poszczególnych elementów.
- 5) Opis działania stosowanych przyrządów i zasad pomiaru za ich pomocą.
- 6) Opis przebiegu doświadczenia.
- 7) Zestawienie wyników pomiarów (najczęściej tabelaryczne).

- 8) **Opracowanie i zestawienie wyników obliczeń** wraz z przykładem obliczeniowym i przeliczeniem jednostek.
- 9) **Analizę niepewności pomiarowych**
- 10) **Wnioski.**