

## POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI WODY I WYZNACZENIE KRYTYCZNEJ LICZBY REYNOLDSA METODĄ BADANIA SZYBKOŚCI WYPŁYWU WODY RURKĄ KAPILARNĄ

**I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie z cechami turbulentnego i laminarnego wypływu wody z naczynia, zaobserwowanie zmiany charakteru przepływu cieczy rzeczywistej przez kapilarę wraz ze zmianą prędkości (przejście z przepływu turbulentnego w laminarny). Wyznaczenie dynamicznego współczynnika lepkości wody  $\eta$  w oparciu o wykres zależności natężenia przepływu od wysokości słupa wody w naczyniu dla tej części zależności, która odpowiada wyłącznie wypływowi laminarnemu.

**II. Przyrządy:** cylinder ze skalą, kapilary, stoper, suwmiarka

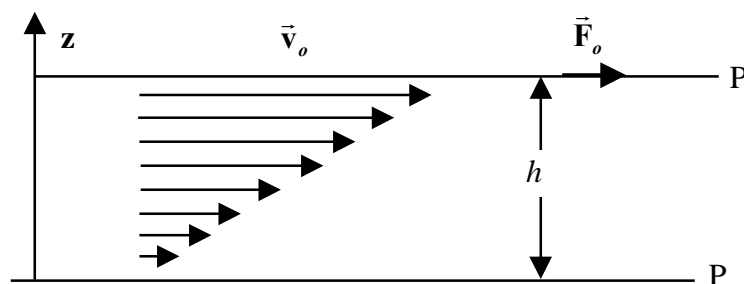
**III. Literatura:**

1. *Encyklopedia fizyki*, PWN Warszawa, 1973 r., str. 182
2. Sz. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, cz.1, PWN Warszawa, 1972.
3. J. A. Zakrzewski, A.K. Wróblewski, *Wstęp do fizyki*, PWN Warszawa, t.1, 1984 r., str. 300 i t.2, cz.1, 1989, str. 112.
4. M. Grotowski, *Wykłady fizyki*, t.1, Czytelnik, 1949, str. 285 - 295.
5. H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, PWN Warszawa, 1980.

### IV. Charakterystyka laminarnego i turbulentnego przepływu cieczy.

Oddziaływania między cząsteczkami cieczy (których natura jest w zasadzie elektryczna) powodują, że w każdej cieczy rzeczywistej, w odróżnieniu od jej modelowego odpowiednika - cieczy idealnej - występuje tarcie wewnętrzne, zwane też lepkością. Lepkość charakteryzuje opór cieczy przeciw płynięciu pod działaniem sił zewnętrznych. Wpływ lepkości w cieczach ujawnia się w całej ich objętości. Rozważmy warstwę cieczy o grubości  $h$ , zawartą między dwiema płaskimi i równoległymi płytkami np. P i P' (o powierzchni S każda), z których P spoczywa, a P' przemieszcza się z prędkością  $v_0$  pod wpływem stycznej siły zewnętrznej  $\vec{F}_o$  (rys.1). Tarcie wewnętrzne powoduje powstanie między dwiema sąsiednimi warstwami cieczy, poruszającymi się z niejednakową prędkością, sił stycznych do powierzchni tych warstw i skierowanych odwrotnie do ich prędkości względnej. Prędkość płytki P' -  $v_0$ , jest stała, o ile siła tarcia wewnętrznego cieczy T (tzw. opór lepki), występująca między drobinami cieczy, a w szczególności w warstwie przylegającej do płytki P', równoważy siłę zewnętrzną:  $\vec{F} = -\vec{T}$ . Cząsteczki cieczy przylegające do płaszczyzny P' przesuwają się wraz z nią z prędkością  $v_0$ , natomiast cząsteczki cieczy przylegające do płytki P (spoczywającej) mają prędkość zerową. W tej sytuacji, i pod warunkiem, że odkształcenie postaciowe cieczy jest jednorodne, w kierunku prostopadłym do powierzchni płytek (np. w kierunku osi z), w polu przekroju poprzecznego strugi ustala się prze-

plyw cieczy o różnych lokalnych prędkościach, zmieniających się liniowo w przedziale od  $|\vec{v}_o|=0$  (dla  $z=0$ ) do  $|\vec{v}_o|=v_o$  (dla  $z=h$ ).



**Rys.1** Rozkład wektora prędkości cieczy rzeczywistej (lepkiej) zawartej między dwiema płytkami równoległymi P i P', z których płytka P spoczywa.

Stan taki opisuje się gradientem prędkości o jednej nie znikającej wartości w kierunku osi  $z$ :  $dv/dz = v_o/h$ . W przypadku gdy odkształcenie postaciowe cieczy, pod wpływem stycznej siły zewnętrznej  $F_o$  jest jednorodne, współczynnik lepkości cieczy  $\eta$ , będący miarą oporu lepkiego cieczy, wylicza się ze wzoru Newtona [1]:

$$\eta = \frac{F_o}{S \cdot \frac{dv}{dt}} \quad (1)$$

W układzie SI jednostką lepkości jest  $1 Pa \cdot s$  (paskalosekunda). We wzorze (1) wyrażenie  $t = F_o/S$  oznacza działające na płytę naprężenie styczne. Takie naprężenie działa też na każdą równoległą do płytki warstwę cieczy, która porusza się z prędkością różną od prędkości warstwy sąsiedniej. Wobec tego, że cząsteczki płynącej cieczy rzeczywistej (lepkiej), w sąsiednich warstwach, poruszają się z różnymi prędkościami, przepływ jej wygodnie jest scharakteryzować podając średnią prędkość ruchu. Przy małych średnich prędkościach, tory cząsteczek cieczy są liniami gładkimi, linie prądu są równoległe i nie mieszają się. Taki przepływ nazywa się regularnym, warstwowym lub laminarnym. Ze wzrostem średniej prędkości przepływu tory cząsteczek cieczy nabierają charakteru nieuporządkowanego, burzliwego. W cieczy tworzą się zawirowania i występują nieregularności przepływu strug cieczy. Taki ruch cieczy nazywany jest turbulentnym.

W przypadku gdy przepływ cieczy jest laminarny, współczynnik lepkości  $\eta$  ma charakter stałej fizycznej cieczy. Nie zależy on od grubości warstwy ośrodka lepkiego ani od rozmiarów płytek. Nie zależy też od naprężenia stycznego.

Ze wzrostem średniej prędkości przepływu i w warunkach jego złożonej geometrii, może nastąpić zmiana charakteru przepływu z laminarnego w turbulentny.

W takiej sytuacji pojęcie oporu lepkiego należy zastąpić pojęciem oporu turbulentnego.

## V. Prawa przepływu cieczy

### V.1 Ciecz idealna.

Podstawową zasadą fizyczną, rządzącą przepływem cieczy idealnej (nielepkiej, nieściśliwej, nieważkiej) przez przewody o różnych przekrojach poprzecznych jest "zasada ciągłości strugi". Jeśli w miejscu gdzie przekrój strugi jest  $A$ , prędkość płynącej cieczy jest  $v$ , a w innym miejscu

strugi odpowiednio przekrój poprzeczny wynosi  $A'$  i prędkość przepływu wynosi  $v'$ , to zasada ta pozwala zapisać równanie:

$$v \cdot A = v' \cdot A' \quad (2)$$

Prawo to, jakkolwiek sformułowane dla cieczy idealnej, można stosować do przepływu cieczy rzeczywistej, jeśli przez  $v$  i  $v'$  rozumieć będziemy średnie prędkości przepływu w obszarach strugi cieczy o przekrojach odpowiednio  $A$  i  $A'$  oraz o ile można uznać, że prędkość cieczy jest stała.

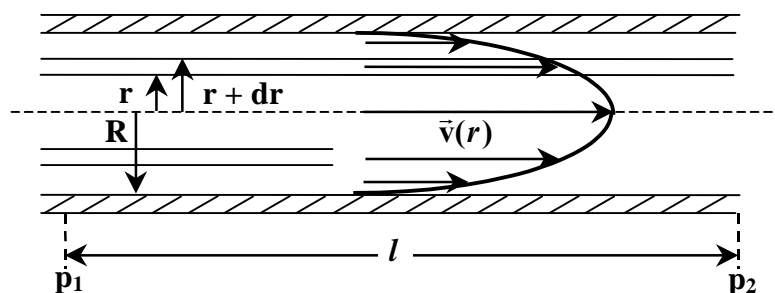
Drugim podstawowym prawem przepływu cieczy idealnej jest "zasada Bernoulliego", którą dla określonej strugi, wyodrębnionej w płynącym płynie, ujmujemy równanie:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const.} \quad (3)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością cieczy,  $h$  - wysokością wybranego przekroju poprzecznego strugi cieczy ponad poziom odniesienia,  $v$  - lokalną prędkością przepływu,  $p$  - ciśnieniem w danym przekroju poprzecznym strugi cieczy,  $g$  - wartością przyspieszenia ziemskiego.

### V.2 Ciecz rzeczywista przepływająca przez kapilarę.

Podczas laminarnego wypływu cieczy rzeczywistej przez kapilarę (o długości  $l$ , której promień wewnętrzny przekroju kołowego jest  $R$ ), spowodowanego różnicą ciśnień na jej końcach ( $p_1 - p_2$ ), tory cząsteczek cieczy są prostoliniowe i równoległe do osi rurki. Jednakże prędkości ich, w punktach wzdłuż średnicy kapilary (pokrywającej się np. z osią  $r$ ), są zróżnicowane co do wartości. Największą prędkość mają cząsteczki na osi kapilary ( $r = 0$ ), natomiast drobiny przylegające do ścianek wewnętrznych rurki ( $r = R$ ) mają prędkość równą zero. Symetria zagadnienia pozwala wyodrębnić w płynie współśrodkowe cylindry o promieniu  $r$  (dla  $0 < r < R$ ) i grubości  $dr$  na tyle małej, że prędkość drobin cieczy w zakresie wybranego cylindra jest stała i wynosi  $v(r)$  (rysunek 2).



Rys.2 Rozkład prędkości przepływu cieczy lepkiej w rurce o promieniu  $R$  pod wpływem różnicy ciśnień  $p_1 - p_2$ .

Jeżeli przepływ jest laminarny, to jedynie ruch cieplny cząsteczek powoduje wymianę pędu zachodzącą poprzez ścianki tak pomyślanych walców. Ten ruch cieplny ma tendencję do wyrównywania prędkości cząsteczek z sąsiednich obszarów. Ilościowo proces ten opisuje się siłą tarcia wewnętrznego  $T$ , proporcjonalną do powierzchni bocznej walców oraz do gradientu prędkości:

$$T = \eta \cdot S \frac{dv(r)}{dr} \quad (4)$$

gdzie  $\eta$  jest współczynnikiem lepkości.

W warunkach przepływu laminarnego, siła tarcia  $T$  i siła zewnętrzna  $F$  wynikająca (w tym przypadku) z różnicy ciśnień na końcach kapilary ( $F = \pi r^2 (p_1 - p_2)$ ), równoważą się:

$$\vec{T} + \vec{F} = 0 \quad (5)$$

Odpowiednie przekształcenia równania (5), przeprowadzone dla warunków brzegowych:  $v(r=0) = v_0$  i  $v(r=R) = 0$ , pozwalają wyprowadzić funkcję opisującą zależność prędkości drobin cieczy od promienia cylindra:

$$v(r) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (6)$$

Rysunek 2 ilustruje tę zależność (kwadratową) dla omawianego przypadku. Wzór (6) umożliwi obliczenie średniej prędkości laminarnego wypływu cieczy przez rurkę. Jeśli przez  $V$  oznaczymy objętość cieczy wypływającej w czasie  $t$ , to natężenie prądu cieczy opisuje wzór zwany też równaniem Hagen-Poiseuille'a:

$$\frac{V}{t} = \frac{\delta (p_1 - p_2) R^4}{8\eta l} \quad (7)$$

Natomiast średnia prędkość wypływu wody przez kapilarę wynosi:

$$v' = \frac{1}{\delta R^2} \cdot \frac{V}{t} \quad (8)$$

Należy podkreślić, że równanie (7) ma zastosowanie wyłącznie do przepływu laminarnego. W przepływie cieczy lepkiej energia kinetyczna  $E_k$  cieczy jest mniejsza od pracy  $W$  siły zewnętrznej  $F$  poruszającej płyn ( $E_k < W$ ). Obliczenia energii kinetycznej cieczy prowadzą do wyniku [2]:

$$E_k = \delta R^2 (p_1 - p_2) \frac{\rho v' R}{\eta} \cdot \frac{R}{12} \quad (9)$$

We wzorze (9) wyrażenie:

$$R_e = \frac{\rho v' R}{\eta} \quad (10)$$

nazywa się liczbą Reynoldsa. Jest to wielkość bezwymiarowa. Wprowadził ją w 1883 r. O. Reynolds. Znaczenie tej liczby nie ogranicza się tylko do analizowanego w tym opracowaniu przypadku. Jej stałość dla różnych przepływów równoważna jest tzw. podobieństwu przepływu. Na podstawie doświadczeń nad ruchem płynów, Reynolds stwierdził, że jeśli mamy różne ciecze płynące z różnymi prędkościami w różnych przewodach, to charakter ruchu tych cieczy będzie jednakowy przy jednakowych wartościach liczby  $R_e$  dla tych przepływów.

Korygując nieco wyrażenie dla  $R_e$  podane np. w [2], można zapisać:

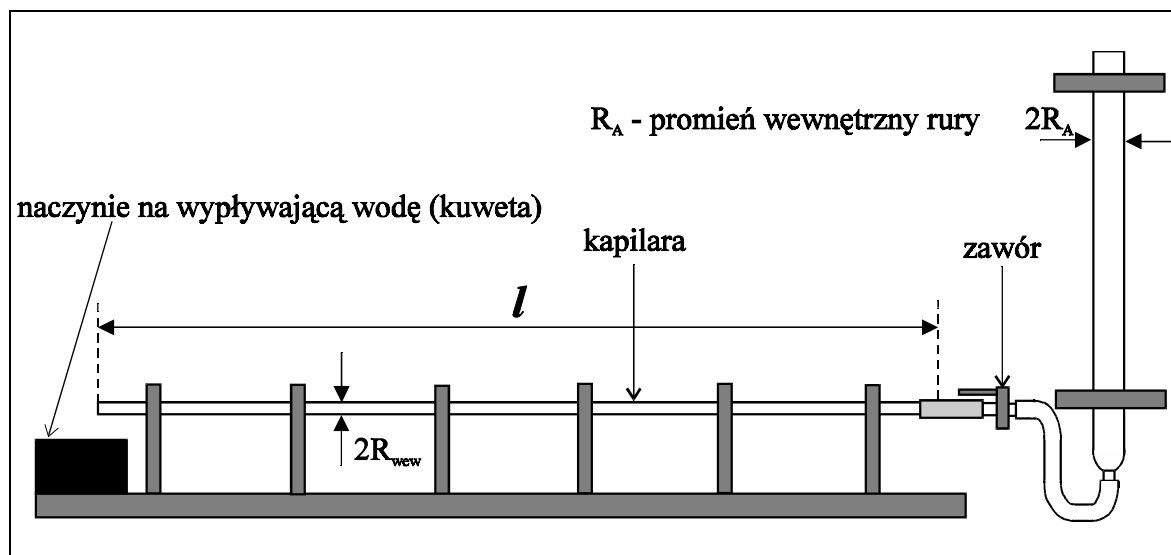
$$R_e = \frac{\text{praca zużyta na przyspieszenie zadanej objętości cieczy do prędkości } v}{\text{praca zużyta na pokonanie sił oporu lepkości przy przemieszczeniu tej obj. cieczy}} \quad (11)$$

Z powyższego wyrażenia wynika, że wzrost liczby  $R_e$  oznacza zwiększenie roli pracy zużytej na przyspieszenie cieczy, natomiast spadek jej wartości oznacza zwiększenie roli pracy zużytej na pokonanie oporu lepkości.

Laminarnym przepływom cieczy rzeczywistych przez przewody odpowiada wartość liczby  $R_e$  mniejsza od pewnej wartości krytycznej  $R_{e_c}$ . Przy wzroście prędkości przepływu cieczy następuje przekroczenie krytycznej wartości liczby Reynoldsa. Odpowiada to zmianie charakteru wypływu cieczy, z laminarnego w turbulentny. O ile ruch laminarny odpowiada stanowi pewnej równowagi dynamicznej, i przy wartościach  $R_e$  mniejszych od minimalnej wartości krytycznej równowaga ta jest trwała, to przy  $R_e$  większych od niej powstaje stan równowagi chwiejnej. Przy minimalnym zaburzeniu zostaje on zniszczony, co powoduje przejście ruchu laminarnego w turbulentny. Jeżeli natomiast nie ma zaburzenia, to stan równowagi chwiejnej może się utrzymywać. Doświadczalnie stwierdzono, że wartość  $R_{e_c}$  zależy od sposobu przeprowadzenia doświadczenia, między innymi od nierówności powierzchni rury, sposobu wpływania cieczy do rury. Jeżeli ciecz wpływająca do rury jest słabo zaburzona, to ruch przejdzie z laminarnego w turbulentny przy dużej wartości  $R_{ek}$  sięgającej kilkudziesięciu tysięcy i odwrotnie, zaburzenia ruchu pociągają za sobą małe wartości  $R_{ek}$  [3].

## VI. Zestaw doświadczalny do badania turbulentnego i laminarnego wypływu cieczy i metoda pomiaru.<sup>1</sup>

Zestaw składa się z pionowego cylindra kończącego się przewężeniem, połączonego węzami gumowymi z dwoma kapilarami umieszczonymi poziomo. Różnica ciśnień na końcach kapilary równa jest ciśnieniu hydrostatycznemu słupa cieczy w pionowym cylindrze o polu przekroju poprzecznego  $A$  ( $A = \pi \cdot R_A^2$ , gdzie  $R_A$  jest wewnętrznym promieniem przekroju kołowego cylindra).



Rys. 3 Schemat układu pomiarowego.

W chwili  $t = 0$  poziom lustra cieczy sięga wysokości  $h_0$  (odpowiednio objętość cieczy jest  $V_0 = h_0 \cdot A$ ). Wysokość  $h_0$  podzielona jest na szereg odcinków równej długości  $d = |\Delta h|$

<sup>1</sup> Rozdziały VI i VII zostały w pewnym zakresie zmienione w stosunku do pierwotnej wersji z 1995 r. przez mgr Jerzego Wiśniewskiego.

( piszemy moduł, ponieważ poziom w rurze obniża się, a  $\Delta h$  zdefiniowane jest jako  $\Delta h = h_i - h_{i-1}$  jest mniejsze od zera; traktując równe odcinki  $d$  jako dodatnie piszemy  $d = |\Delta h|$  lub możemy napisać  $d = -\Delta h$  ). Podczas wypływu cieczy z kapilary, jej objętość równa jest objętości cieczy wypływającej z pionowego cylindra. Wobec tego, że długość każdego odcinka  $|\Delta h|$  jest jednakowa, poddawana obserwacji objętość cieczy jest stała i wynosi  $\Delta V = A \cdot |\Delta h| = -A \cdot \Delta h$ , a odpowiadający jej czas wypływu  $\Delta t_j = t_{i+1} - t_i$  (wskaźnik  $j = i + 1$ ), gdzie  $t_i$  jest czasem mierzonym od chwili  $t = 0$  (gdzie  $h = h_0$ ) do chwili przejścia lustra cieczy przez „i”-tą kreskę na cylindrze. W doświadczeniu tym na skutek wypływu cieczy z całego układu obniża się różnica ciśnień na końcach kapilary wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia hydrostatycznego. Dla tego przypadku, z równania (7) otrzymujemy (uwzględniamy, że  $p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h(t)$  oraz że objętość  $V$  wypływającej cieczy z kapilary w czasie  $\Delta t$  jest równa objętości cieczy  $\Delta V$  wypływającej z pionowego cylindra w tym samym czasie):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t_j} = \frac{-A \cdot \Delta h}{\Delta t_j} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta} h(t_i) \quad (12)$$

lub

$$\frac{\Delta h}{\Delta t_j} = -\frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta \cdot A} h(t_i) . \quad (12a)$$

Oznaczając przez

$$\lambda = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta \cdot A} = const , \quad (13)$$

przy  $\Delta h \rightarrow 0$  (co odpowiada  $\Delta t_j \rightarrow 0$ ) otrzymamy równanie opisujące charakter zmian wysokości słupa w cylindrze a jednocześnie prędkość obniżania się lustra cieczy, ponieważ mamy:

$$-v = \frac{dh}{dt} = -\lambda \cdot h(t) . \quad (14)$$

Stąd otrzymuje się funkcję wykładniczą

$$h(t) = h_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (15)$$

opisującą czasową zmienność  $h(t)$ .

Dla warunków naszego doświadczenia równanie (12) zapiszemy w postaci

$$\frac{\Delta V}{\Delta t_j} = \lambda \cdot A \cdot H_j = \alpha \cdot H_j , \quad (16)$$

gdzie  $\alpha = \lambda \cdot A$ ,  $H_j$  - wysokość słupa wody odpowiadająca środkowi przedziału ( $h_i, h_{i+1}$ ).

Idea niniejszego doświadczenia opiera się na wykorzystaniu zapisu równania Hagen-Poiseuille’a w postaci wzoru (16). Wynika z niego, że pomiędzy natężeniem przepływu  $y = \frac{\Delta V}{\Delta t_j}$ ,

a wysokością poziomu wody w cylindrze  $x = H_j$ , istnieje zależność wprost proporcjonalna i  $\alpha$  jest współczynnikiem nachylenia linii prostej przedstawiającej tę zależność. Lewa strona równania (16), jak wynika ze wzoru (8), określa wielkość proporcjonalną do szybkości  $v'$  wypływu wody z cylindra przez rurkę kapilarną. Współczynnik  $\alpha$  jest związany ze współczynnikiem lepkości wody  $\eta$  wzorem:

$$\eta = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \alpha} \quad (17)$$

(wynika to ze związku współczynnika  $\alpha$  z równania (16) z wielkością  $\lambda$  daną równaniem (13)). Liczbę Reynoldsa znajdziemy z wyrażenia (10), po uwzględnieniu wzoru (8):

$$R_e = \frac{\rho \cdot v' \cdot R}{\eta} = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{\rho \cdot R}{\eta} = \frac{\rho}{\pi \cdot R \cdot \eta} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (18)$$

## VII. Pomiary i opracowanie wyników <sup>1</sup>

### a) Pomiary.

W ćwiczeniu należy wykonać pomiary wysokości słupa wody  $h$  w funkcji czasu  $t$  czyli  $h = h(t)$ , przyjmując np. stałą zmianę  $|\Delta h| = 5$  cm wysokości słupa wody w cylindrze. Do tych pomiarów należy wykorzystać właściwą kapilarę (w zestawie - tę o większej średnicy wewnętrznej).

Wobec stałości przekroju poprzecznego  $A$ , wykonane pomiary ( $h_i, t_i$ ) można zastosować do zbadania zależności (16), dla stałej wartości  $\Delta V = A \cdot |\Delta h|$  i obliczonych na podstawie pomiarów wielkości przedziałów czasowych  $\Delta t_j = t_{i+1} - t_i$  (wskaźnik  $j = i + 1$ ). Wyniki pomiarów można zebrać w tabelach I i II.

Tabela I

$l$ [m]	$R_{wew} = R$ [m]	$2R_A$ [m]	$d =  \Delta h $ [m]	$\Delta V = A \cdot  \Delta h $ [m <sup>3</sup> ]

Tabela II

1	2	3	4	5	6	7
<b>i</b>	<b><math>h_i</math> [m]</b> $i = 0, 1$ ...	<b><math>\ln h_i</math></b> $i = 0, 1,$ ...	<b><math>t_i</math> [s]</b> $i = 0, 1 \dots$	<b><math>\Delta t_j = t_{i+1} - t_i</math></b> $i = 0, 1, 2 \dots$ $j = i + 1$	<b><math>H_j = (h_i + h_{i+1}) / 2</math></b> $i = 0, 1, \dots; j = i + 1$	<b><math>\frac{\Delta V}{\Delta t_j}</math> [m<sup>3</sup>/s]</b>
0	$h_0$	$\ln h_0$	$t_0 = 0$	—	—	—
1	$h_1$	$\ln h_1$	$t_1$	$\Delta t_1$	$H_1$	$\Delta V / \Delta t_1$

gdzie:  $l$  - długość kapilary,  
 $R$  - promień kapilary,  
 $2R_A$  - średnica cylindra,  
 $d = |\Delta h|$  - długość wybranego odcinka na rurze,  
 $\Delta V = A \cdot |\Delta h|$  - odpowiadająca odcinkowi  $|\Delta h|$  objętość cieczy,  
 $i$  - nr kreski na cylindrze,  
 $h_i$  - wysokość słupa wody,  
 $H_j = (h_i + h_{i+1}) / 2$  - środek przedziału ( $h_i, h_{i+1}$ ),

### b) Opracowanie wyników.

1. Sporządzić dwa wykresy:

**wykres 1** zależności  $y = \ln h_i$  w funkcji  $x = t_i$  (tabela II, kolumny 3 i 4);

**wykres 2** zależności  $y = \frac{\Delta V}{\Delta t_j}$  w funkcji  $x = H_j$  (tabela II, kolumny 6 i 7).

<sup>1</sup> Rozdziały VI i VII zostały w pewnym zakresie zmienione w stosunku do pierwotnej wersji z 1995 r. przez mgr Jerzego Wiśniewskiego.

2. Na obu wykresach zaznaczyć położenie punktu, w którym przebieg odchyła się od linii prostej. Dla **wykresu 2** podać współrzędne tego punktu ( $H_j$ ,  $\Delta V/\Delta t_j$ ). W punkcie tym następuje zmiana charakteru wypływu wody: wypływ turbulentny przechodzi w laminarny (w miarę zmniejszania  $h$ ).
3. Dla tej części wykresu 2, która odpowiada laminarnemu wypływowi wody (wykres jest liniowy) znaleźć współczynnik nachylenia prostej  $\alpha$  metodą najmniejszych kwadratów (lub graficznie). Następnie ze wzoru (17) wyznaczyć współczynnik lepkości  $\eta$ .
4. Znaleźć krytyczną wartość liczby Reynoldsa  $R_{ek}$  ze wzoru (18) wykorzystując wartość  $\Delta V/\Delta t_j$  odczytaną z wykresu 2, w punkcie odchylenia się przebiegu od linii prostej (patrz punkt 2).
5. Ocenic błędy zmierzonych wielkości  $\eta$  i  $R_{ek}$ .

## UWAGA

Opracowanie wyników pomiarów zamieszczone w tej instrukcji dotyczy tylko kapilary o większej średnicy (kapilary są dwie). Dla drugiej kapilary o mniejszej średnicy pomiary wykonujemy podobnie (mierzymy wysokość  $h$  w funkcji czasu  $t$ ). Następnie wykonujemy wykres  $y = \ln h$  w funkcji  $x = t$ , znajdujemy współczynnik nachylenia tej prostej a tym samym współczynnik  $\lambda$  (dla tej kapilary ta zależność powinna być liniowa w całym zakresie wartości  $t$ ). Obliczamy współczynnik lepkości wody  $\eta$  i przeprowadzamy rachunek błędów.

Dokładny opis wykonania ćwiczenia dla drugiej kapilary dającej tylko przepływ laminarny zamieszczony jest w *I pracowni fizycznej J.L. Kacperski „Pomiar współczynnika lepkości wody. Badanie funkcji wykładniczej.”*