

### 3. INSTRUKCJE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH

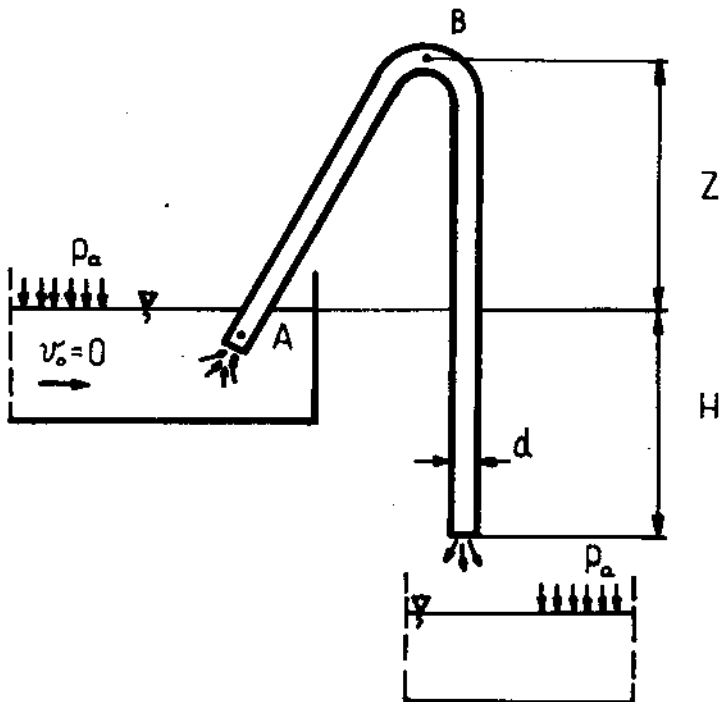
#### 3.1. Przepływ cieczy w lewarach o małych przekrojach

##### 3.1.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z laboratoryjną metodą pomiaru współczynnika wydanku, lewarów o małych przekrojach, oraz warunkami, przy których lewar może działać.

##### 3.1.2. Wprowadzenie

Przewód wygięty, w którym możliwy jest przepływ cieczy z otwartego zbiornika do wyższego poziomu niż swobodna powierzchnia, a wpływ następuje wylotem poniżej swobodnej powierzchni nazywamy lewarem (rys. 3.1.1.).



Lewar znajduje bardzo szerokie zastosowanie w technice sanitarnej. Zasadę działania wykorzystuje się do budowy:

- urządzeń zrzutowych odprowadzających nadmiar wód ze zbiorników retencyjnych do odbiorników,
- przelewów lewarowych w kanalizacji,
- samoczynnych urządzeń spłukujących, studzienek płuczących, płuczek zbiorników płuczących misek ustępowych,
- ujęć lewarowych wody dla potrzeb wodociągów, itd.

Zjawisko tzw. lewara wodnego można w prosty sposób wyjaśnić, wykorzystując w tym celu równanie Bernoulliego. Hydrauliczną analizę działania przeprowadzamy w oparciu o następujące założenia:

- a) lewar ma stałą średnicę przekroju  $d$ ,
- b) prędkość dopływu wody w zbiorniku górnym  $V_0 = 0$ ,
- c) wypływ jest swobodny,
- d) przewód jest całkowicie wypełniony wodą i istnieje pewna różnica poziomów  $H$  między rzędnymi zwierciadła wody w zbiorniku i końcem wylotu z lewara,
- e) na powierzchni swobodnej cieczy panuje takie samo ciśnienie jak u wylotu lewara,
- f) pole przekroju poprzecznego jest tego rzędu, że można pominąć różnice ciśnień w dowolnych punktach.

Przyjmując powyższe założenia napiszemy:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \sum h_{\text{str.}} \quad (3.1.1)$$

Wartość strat energetycznych można rozpisać jako:

$$\sum h_{\text{str.}} = \frac{v^2}{2g} (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \lambda \frac{l}{d}) = \frac{v^2}{2g} \left( \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \quad (3.1.2)$$

gdzie:

- $\xi_1$  - współczynnik strat na wlocie,
- $\xi_2$  - współczynnik strat na łuku,
- $\xi_3$  - współczynnik strat na wylocie,

$\xi_4 = \lambda \frac{l}{d}$  - równoważny współczynnik strat na długości lewara.

Podstawiając odpowiednio w równaniu (3.1.1) zależność (3.1.2) otrzymamy:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{2g} \left( \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \quad (3.1.3)$$

a stąd

$$V = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^n \xi_i}} \sqrt{2gH} \quad (3.1.4)$$

Zamiast sumarycznego współczynnika strat można przyjąć do obliczeń współczynnik wydatku  $\mu$  identyczny ze współczynnikiem wydatku wypływu przez otwór w naczyniu, gdzie:

$$V = \mu \sqrt{2gH} \quad (3.1.5)$$

Przyrównując stronami równania (3.1.4) i (3.1.5) otrzymamy

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^n \xi_i}} \quad (3.1.6)$$

Równanie (3.1.6) określa zależność funkcyjną między współczynnikiem wydatku  $\mu$ , a sumaryczną wartością współczynnika strat w lewarze.

Ostatecznie wydatek lewara możemy określić ze wzoru:

$$V = \mu A \sqrt{2gH} \quad (3.1.7)$$

w którym:

- V — wydatek lewara,
- $\mu$  — współczynnik wydatku,
- A — pole przekroju poprzecznego lewara.

Należy jednak pamiętać, że działanie lewara nie zawsze jest możliwe, a mianowicie ograniczone ono jest wysokością „z” (rys. 3.1.1) na jaką może być podniesiona wygięta część lewara.

Wartość „z” możemy określać układając równanie Bernoulliego dla swobodnego zwierciadła wody w zbiorniku i najwyżej położonego przekroju lewara zilustrowanego punktem B.

W rozważanym przypadku równanie będzie miało postać:

$$0 + \frac{p_a}{\rho g} + 0 = z + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + \sum \frac{B}{A} h_{str.} \quad (3.1.8)$$

stąd

$$z = \frac{p_a - p_B}{\rho g} - \left( \frac{V^2}{2g} + \sum \frac{B}{A} h_{str.} \right) \quad (3.1.9)$$

gdzie:

$z$  — wysokość podniesionego wygięcia nad poziom zwierciadła swobodnego wody w zbiorniku,

$p_B$  — ciśnienie w najwyższym miejscu wygięcia wewnątrz lewara,

$\sum_A^B h_{str.}$  — straty wysokości energii wywołane przepływem na odcinku od miejsca wlotu do punktu B jak na rys. 3.1.1.

Analizując równanie (3.1.9) zauważymy, że wzniesienie wygięcia lewara teoretycznie może być równe wysokości ciśnienia atmosferycznego  $\frac{p_a}{\rho g}$ , ale tylko wtedy gdy prędkość przepływu w lewarze, i ciśnienie w punkcie „B” byłyby równe zero, co oczywiście jest niemożliwe.

Ponadto wzniesienie „ $z$ ” może być tym większe im mniejsze jest ciśnienie w punkcie wierzchołkowym „B”.

Stąd łatwo jest stwierdzić, że przy pewnej wysokości „ $z$ ” ciśnienie to może obniżyć się do ciśnienia wrzenia cieczy —  $p_w$  i wówczas wytwarza się para, która zgromadzona w najwyższym punkcie lewara w znacznych ilościach może spowodować przerwanie ciągłości strumienia cieczy.

W praktyce lewar przestanie działać. Przy przepływie wody przez lewar wysokość ciśnienia nie może spaść poniżej  $2m_{H_2O}$  [10], gdyż przy niższym ciśnieniu zaczyna z wody w sposób burzliwy wydzielac się rozpuszczone powietrze, powodując zjawisko kawitacji.

Stanowi ono szczególnie złożony przypadek przepływu przy równoczesnym istnieniu fazy ciekłej i gazowej przepływającego czynnika. Przepływ staje się wówczas niestabilny.

Powietrze gromadzące się w najwyższym punkcie lewara, zmniejsza jego przekrój czynny, powodując tym samym zwiększenie lokalne prędkości i spadek ciśnienia, który z kolei przyczynia się do zwiększonego wydzielania powietrza z wody, aż do przerwania ciągłości strumienia.

Występowanie kawitacji może mieć charakter okresowo zmienny, gdyż po wytworzeniu pary ciśnienie wzrasta, a następnie ma miejsce jej skroplenie.

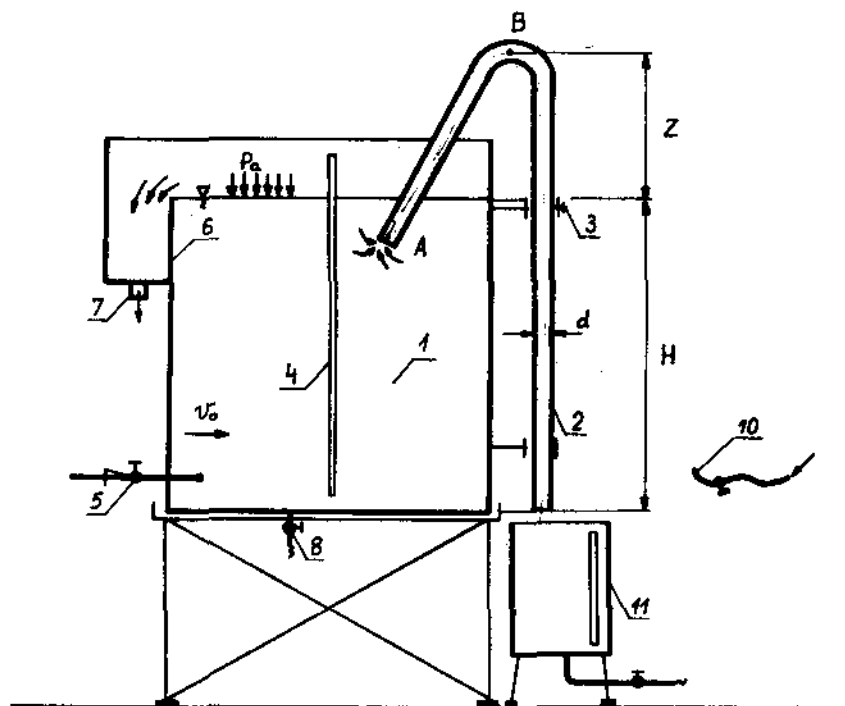
Kawitacji towarzyszą korozja i drgania akustyczne. Intensywność korozji jest tak duża, że może ona w krótkim czasie spowodować uszkodzenie konstrukcji lewara.

Biorąc pod uwagę szkodliwy aspekt zjawiska w praktyce nie powinniśmy przekraczać wysokości  $z = 7,0$  m.

Konstruując lewary należy pamiętać, że kawitacja powstaje wszędzie tam gdzie występują zmiany prędkości przepływu, które spowodują obniżenie lokalne ciśnienia aż do ciśnienia wrzenia cieczy w danej temperaturze.

### 3.1.3. Schemat i opis stanowiska

Stanowisko składa się ze zbiornika (1) w którym powierzchnia zwierciadła swobodnego wody jest daleko większa od powierzchni przekrojów poprzecznych badanych lewarów (2). Dwóch lewarów (2) o małych średnicach, lecz różnych przymocowanych do konstrukcji zbiornika w sposób umożliwiający zmianę wysokości „z”.



Rys. 3.1.2.

Regulację wysokości „z” możemy przeprowadzić za pomocą pokrętła mocującego (3).

Do pomiaru i obserwacji zwierciadła wody w zbiorniku służy rurka wodowskazowa (4).

Napełnianie i regulację poziomu wody w zbiorniku przeprowadzamy za pomocą otwarcia lub zamykania zaworu odcinającego dopływ wody z instalacji (5). Utrzymanie zwierciadła wody na niezmiennym poziomie zapewnia przelew (6). Woda z przelewu odprowadzana jest do kanalizacji wylotem (7). Opróżnianie zbiornika z wody odbywa się przez zawór (8) po jego otwarciu. Napełnianie wodą badanego lewara dokonuje się od strony wylotowej za pomocą odcinka węża gumowego z zaworem (10). Wydatek lewara mierzy się metodą „naczynia podstawianego” (11).

Dodatkowymi elementami wyposażenia stanowiska niezbędnymi dla przeprowadzenia badań są: zbiornik pomiarowy (11), termometr, zestaw trzech stoperów, przmiar liniowy, kątomierz i barometr.

### 3.1.4. Sposób wykonania ćwiczenia

Przed przystąpieniem do odrabiania ćwiczenia należy: pomierzyć długość lewara, średnicę i kąt zgięcia łuku. Po zmierzeniu i odnotowaniu wymienionych wielkości, lewar montujemy na stanowisku.

Montaż odbywa się przez włożenie lewara w odpowiednią prowadnicę wyposażoną w pokrętło mocujące (3), tak aby część wlotowa po napełnieniu zbiornika była w wodzie na dowolnie obranej wysokości „z”.

Upewniwszy się, że lewar w trakcie badań nie zmieni swego położenia, przystępujemy do napełniania zbiornika (1) wodą, odkręcając w tym celu zawór (5). Zbiornik napełniamy do wysokości, przy której zacznie działać przelew (6). Następnie pod wylot lewara podstawiamy zbiornik pomiarowy (11). Gdy zbiornik pomiarowy został podstawiony, przystępujemy do napełniania lewara wodą. Chcąc napełnić lewar, podłączamy do wylotu lewara końcówkę węża gumowego z zaworem (10). Otwierając zawór (10) spowodujemy wypływ wody z instalacji do lewara. Jeżeli uznamy, że lewar został całkowicie napełniony wodą, to zamykamy zawór (10) i szybkim ruchem odłączamy końcówkę węża, odkładając go w swoje poprzednie miejsce. Tak napełniony lewar powinien pracować – działać.

Jeśli stwierdzimy, że przelew zaczął działać przy niezmienionej wysokości to możemy przystąpić do pomiaru. Wydatek lewara mierzymy za pomocą „naczynia podstawianego” (11).

Ponadto należy pomierzyć różnicę wysokości między poziomem wody w zbiorniku górnym oraz wylotem z lewara H.

Pomiary wydatku wykonać dla każdego z lewarów 5 – krotnie, zwiększając stopniowo natężenie przepływu wody zaworem (5), zmieniając przez to nieznacznie ustaloną wysokość H.

Pomiaru temperatury wody dokonujemy w zbiorniku (11), dla każdego pojedynczego pomiaru.

Wyniki pomiarów i obliczeń wpisujemy do odpowiedniej tablicy wg załączonego wzoru pkt. 3.1.5.

### 3.1.5. Opracowanie wyników

Na podstawie zestawionych wyników z pomiarów i obliczeń zawartych w tablicy (3.1.1) należy przeprowadzić analizę rozbieżności otrzymanych wyników, z pięciu pomiarów dla każdego z lewarów oddzielnie.

Wyjaśnić, co jest przyczyną rozbieżności otrzymanych wartości oraz obliczyć wartość oczekiwaną i błąd pomiaru.

Otrzymaną wartość ostateczną współczynnika porównać z wartością obliczoną ze wzoru (3.1.6) i poddać analizie, w przypadku rozbieżności wyników.

Ponadto wykazać kiedy i po spełnieniu jakich warunków nastąpiłoby przerwanie działania każdego z lewarów zamontowanych na stanowisku.

Tablica 3.1.1

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń do współczynnika wydatku lewara  $\mu$ .

$L = \dots \dots \dots (m) \quad \alpha = \dots \dots \dots (^\circ) \quad g = \dots \dots \dots (m/s^2)$ $A = \dots \dots \dots (m^2) \quad \lambda = \dots \dots \dots$											
Nr	V (m <sup>3</sup> )	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	$\tau_3$ (s)	$\bar{\tau}$ (s)	$\bar{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	$\mu = \frac{\bar{V}}{A \sqrt{2gH}}$	t (°C)	$p_a$ (hPa)	Uwagi
1	2	3				4	5	6	7	8	9
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											
	$\bar{V} =$	$\bar{\tau} =$				$\bar{V} =$	$\bar{H} =$	$\bar{\mu} = \frac{\bar{V}}{A \sqrt{2gH}}$	$\bar{t} =$	$\bar{p}_a =$	

### 3.1.6. Własne uwagi i spostrzeżenia

Podać jakie mogą być następstwa wynikające ze zmiany natężenia dopływu do zbiornika wody, na efekt działania lewara?

Wymienić i omówić inne niż podano w treści dotyczącej ćwiczenia uproszczenia będące przyczyną rozbieżności otrzymywanych wyników.

Podać własne uwagi i spostrzeżenia dotyczące poprawności przeprowadzonych badań.

## 3.2. Wypływ cieczy przez przystawki

### 3.2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie współczynnika wypływu cieczy przez przystawki przy ustalonym i nieustalonym wypływie.

### 3.2.2. Wprowadzenie

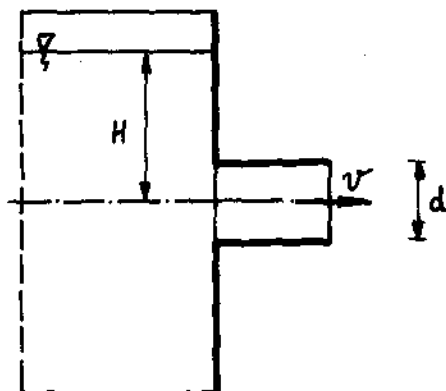
Przystawką nazywany jest króciec rurowy o dowolnym kształcie przekroju przepływowego i niezmiennego lub zmieniającego się w sposób dowolny, byleby ciągły w kierunku osi.

Zasadniczo rozróżnia się trzy rodzaje przystawek:

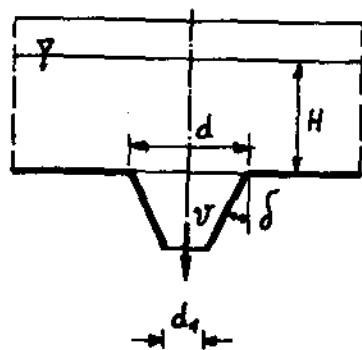
Rys. 3.2.1 – walcowe,

Rys. 3.2.2 – stożkowe (zbieżne i rozbieżne),

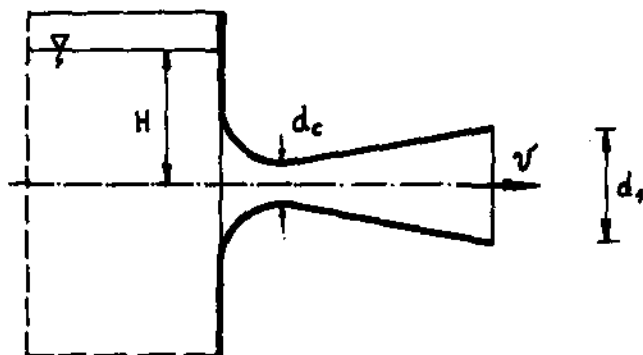
Rys. 3.2.3 – o kształtach specjalnych.



Rys. 3.2.1



Rys. 3.2.2



Rys. 3.2.3

Przystawki są umieszczone w dnie lub ścianach bocznych zbiornika, do wewnątrz lub na zewnątrz pod różnymi kątami, bądź u wylotu rury.

W praktyce znajdują zastosowanie wszędzie tam gdzie chodzi o nadanie odpowiedniego kierunku wypływającemu strumieniowi, lub istnieje potrzeba powiększenia wypływu bez zwiększania powierzchni otworu wypływowego, bądź zwiększania zagłębienia jego pod zwierciadłem wody H.

Podczas wypływu przez przystawki na elementy cieczy działają siły: lepkości, ciężkości i napięcia powierzchniowego.



Współczynnik wypływu w ogólnym przypadku jest funkcją:

- liczby Reynolds' a

$$Re = \frac{V d}{\nu} \quad (3.2.1)$$

- liczby Froude' a

$$Fr = \frac{V^2}{gd} \quad (3.2.2)$$

- liczby Webera

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma} \quad (3.2.3)$$

gdzie:

d - średnica otworu wlotowego do przystawki,

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe na granicy ciecz-powietrze.

Oprócz wymienionych sił rzutujących na wartość interesującego nas współczynnika  $\mu$ , ma również wpływ sposób dopływu cieczy do otworu wlotowego przystawki. Zmniejszenie wartości  $\mu$  zaczyna się od liczby prawdopodobieństwa  $E > 0,6 - 0,7$ .

Liczbę E określa się z zależności:

$$E = \frac{V \varphi}{\sqrt{gH}} \left( \frac{d}{4} + 4 \frac{R}{d} \right) \quad (3.2.4)$$

gdzie:

$V \varphi$  - składowa styczna prędkości w odległości R od osi otworu

Z chwilą gdy E osiągnie wartość od 0,6 - 0,7 obserwuje się powstanie leja wirowego na powierzchni swobodnej wody z rdzeniem powietrznym przenikającym do osi otworu wlotowego ze zbiornika.

Wyznaczenie na drodze pomiarów współczynnika wypływu  $\mu$  przez przystawki przy stałym naporze oparte jest o wzór:

$$\mu = \frac{V}{A_p \sqrt{2gH}} \quad (3.2.5)$$

gdzie:

$A_p$  - pole powierzchni otworu w przystawce.

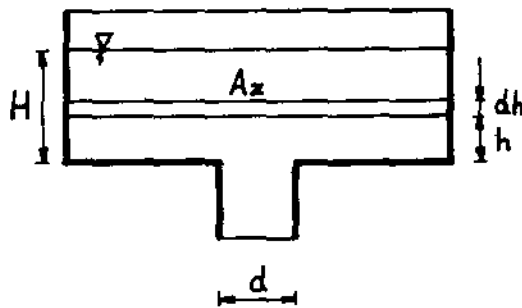
Wzór 3.2.5 jest słuszny, gdy prędkość dopływającej wody do zbiornika  $V_0$  może być pominięta tj. gdy  $V_0 < 0,2$  (m/s), oraz gdy ciśnienia zewnętrzne po obu stronach otworu są sobie równe. Wartość naporu  $H$  w trakcie pomiaru dla wypływu ustalonego pozostaje na dowolnej, lecz stałej wysokości.

Jeżeli prędkość  $V_0 \geq 0,2$  m/s wówczas wzór 3.2.5 przyjmie postać:

$$\mu = \frac{\dot{V}}{A_p \sqrt{2g \left( H + \frac{V_0^2}{2g} \right)}} \quad (3.2.6)$$

Zagadnienie praktyczne, wypływu cieczy w ruchu nieustalonym, sprowadza się do całkowitego lub częściowego opróżniania zbiornika w odpowiednim czasie. Czas opóźnienia limitowany jest przez szereg czynników. Jednym z nich jest współczynnik wypływu  $\mu$ .

Opierając się na rys. 3.2.4 można przeprowadzić następujące rozważania:



Rys. 3.2.4

Objętość cieczy, która wypływa w czasie  $d\tau$  można wyrazić następującą zależnością:

$$-A_z dh = A_p \mu \sqrt{2gh} d\tau \quad (3.2.7)$$

stąd:

$$d\tau = -\frac{A_z dh}{A_p \mu \sqrt{2gh}} \quad (3.2.8)$$

Czas potrzebny na obniżenie poziomu zwierciadła cieczy w zbiorniku z położenia  $H$  do wysokości  $H_1$ :

$$\tau = \frac{1}{A_p \mu \sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{A_z dh}{\sqrt{H}} \quad (3.2.9)$$

gdzie:

- $A_p$  - powierzchnia przekroju poprzecznego przystawki,
- $H_1$  - początkowa wysokość cieczy nad otworem.
- $H_2$  - końcowa wysokość cieczy nad otworem.

W przypadku, gdy zbiornik ukształtowany jest w ten sposób, że posiada zmienny przekrój poprzeczny wzdłuż wysokości, to ustala się zależność zmiany  $A_z$  w funkcji  $h$ ,

$$A_z = f(h) \quad (3.2.10)$$

którą wprowadza się do 3.2.9.

$$\tau = \frac{1}{\mu A_p \sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{f(h)}{\sqrt{h}} dh \quad (3.2.11)$$

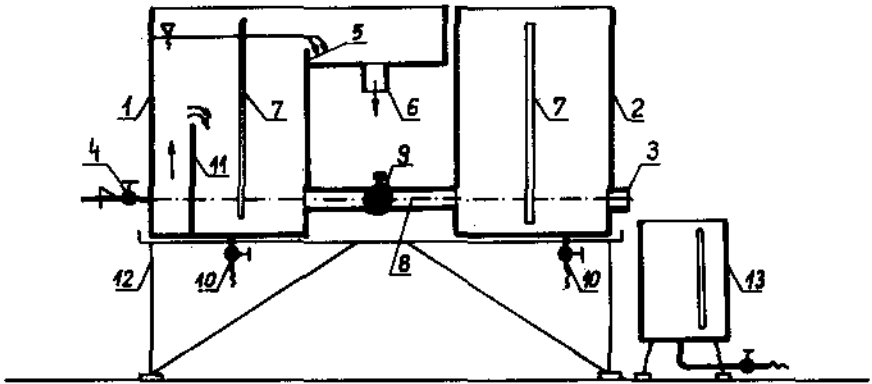
Czas opróżniania zbiorników złożonych z części o różnych kształtach oblicza się jako sumę czasów poszczególnych części.

Wyznaczenie współczynnika wypływu przy zmiennym naporze  $H$  i stałej powierzchni przekroju  $A_z$  oparte jest o przekształcony wzór 3.2.11.

$$\mu = \frac{2 A_z (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\bar{\tau} A_p \sqrt{2g}} \quad (3.2.12)$$

### 3.2.3. Schemat i opis stanowiska

Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 3.2.5. Stanowisko do badania współczynnika wypływu cieczy przez otwory zaopatrzone w przystawki rys. 3.2.5. składa się ze zbiornika (1) zaopatrzonego w przelew. Zbiornika (2) w którym na jednej ze ścian bocznych znajduje się otwór (3) z gwintem do montowania badanej przystawki. Zbiornik (1) napełnia się wodą z sieci wodociągowej poprzez przewód zaopatrzony w zawór (4). Utrzymywanie stałego poziomu wody w zbiorniku (1) zabezpiecza przelew (5). Z przelewu nadmiar wody odprowadzany jest do kanalizacji wylotem (6). Poziomy wody w zbiornikach odczytywane są na rurkach wodowskazowych (7). Zero wodowskazów pokrywa się z poziomem osi otworu (3) i przewodu (8). Zbiorniki zostały połączone ze sobą dwoma równoległymi przewodami (8) o różnych średnicach i wyposażono je w za-



Rys. 3.2.5.

wory odcinające (9). Opróżnianie zbiorników z wody można przeprowadzić za pomocą kurków spustowych (10). Ścianka (11) umocowana wewnątrz zbiornika (1) ma za zadanie uspokojenie dopływającej wody z instalacji do modelu. Model ustawiono na stalowej konstrukcji (12). Dodatkowe wyposażenie modelu stanowi zbiornik pomiarowy (13), komplet przystawek, korki gumowe, klucz monterski, suwmiarka, przymiar liniowy, termometr, stopery.

### 3.2.4. Sposób wykonania doświadczeń

#### 3.2.4.1. Wyznaczenie współczynnika $\mu$ dla przystawki przy stałym naporze wypływu

Wyznaczanie współczynnika  $\mu$  dla przystawki przy stałym naporze wypływu rozpoczynamy od pomiaru parametrów geometrycznych badanej przystawki (mierzymy długość i średnicę).

Następnie przystępujemy do zamontowania jej w otworze (3) zbiornika (1). Otwór wyływowy przystawki zatykamy korkiem gumowym. Po zatknięciu otworu wypływowego otwieramy zawory przelotowe (9) na przewodach łączących zbiorniki, oraz zawór (4), którym doprowadzana jest woda do modelu. Napełnianie wodą powinno trwać do chwili ustalenia poziomów wody w zbiornikach (1) i (2). Gdy zaobserwujemy, że przelew (5) zaczął działać, wyjmujemy korek gumowy z otworu przystawki, przez który następuje wypływ wody do zbiornika pomiarowego (13).

Pomiar rozpoczynamy wtedy, gdy poziomy wody w zbiornikach ustali się i będzie pracował przelew.

Wypływ wody mierzy się przez określenie czasu  $\tau$  (zestawem co najmniej dwóch stoperów) napełniania się zbiornika pomiarowego (13) o znanej objętości  $V$ .

Wyznaczoną w podany sposób wartość  $\mu$  dla ustalonego położenia wysokości zwierciadła wody nad osią otworu w zbiorniku (2), wykonać 5-krotnie, ustalając za każdym razem inną wartość  $V$ , wody w zbiorniku pomiarowym i wartość  $H$ .

Zmiany powyższych wielkości przeprowadzamy za pomocą odpowiedniej regulacji – pokręcania zamknięciem zaworów na przewodach łączących (9). Otrzymane wielkości z pomiarów i obliczeń zestawiamy w tablicy 3.2.1.

Tablica 3.2.1

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń współczynnika wypływu przez przystawkę przy stałym naporze

L = ..... (m)		g = ..... (ml)						
d <sub>1</sub> = ..... (m)		A <sub>p</sub> = ..... (m <sup>2</sup> )						
d <sub>2</sub> = ..... (m)		Nr przystawki						
Nr	τ <sub>1</sub> (s)	τ <sub>2</sub> (s)	τ <sub>3</sub> (s)	$\bar{\tau}$ (s)	H (m)	V (m <sup>3</sup> )	$\mu = \frac{V}{\tau A_p \sqrt{2gH}}$	Uwagi
1	2			3	4	5	6	
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

### 3.2.4.2. Wyznaczanie współczynnika $\mu$ dla przystawki przy zmiennym naporze przepływu

W otworze (3) zbiornika (2) montuje się badaną przystawkę i wylot zamyka korkiem gumowym. Następnie, napełnia wodą obydwie zbiorniki. Po napełnieniu ich, zamyka się przepływ między nimi zaworami (9). Jeżeli stwierdzimy, że przepływ między zbiornikami nie występuje, czekamy aż ustabilizuje się w nim zwierciadło wody. Ustabilizowanie się wody możemy uznać wtedy gdy nie będziemy obserwowali wahań zwierciadła wody w rurce piezometrycznej umocowanej na bocznej ścianie zbiornika (2).

Gdy stan ustabilizowania nastąpił, możemy przystąpić do wyboru dowolnego poziomu  $H_1$  i  $H_2$  nad osią przystawki.

Wartość  $H_1$  należy tak dobrać, aby włączenie stoperów nastąpiło po odjęciu korka z otworu wylotowego przystawki i pomiar czasu odbywał się w chwili przechodzenia przez określony poziom  $H_1$  i  $H_2$  zwierciadła wody opadającego. Należy przy tym pamiętać, aby poziom  $H_2$  dobierać tak by znajdował się powyżej górnej krawędzi otworu w przystawce.

Pomiary powtórzyć 5-krotnie dla różnych, lecz dowolnie obranych wartości  $H_1$  i  $H_2$ , oraz różnych objętości V.

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tablicy 3.2.2.

Tablica 3.2.2

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń współczynnika wypływu przez przystawki przy zmiennym naporze.

$L =$ .....	(m)	$g =$ .....	( $m/s^2$ )	$N_r$ przystawki .....	
$d_1 =$ .....	(m)	$A_2 =$ .....	( $m^2$ )	$v =$ .....	( $m^2/s$ )
$d_2 =$ .....	(m)	$A_p =$ .....	( $m^2$ )	$p_a =$ .....	( $N/m^2$ )

Nr	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	$\tau_3$ (s)	$\bar{\tau}$ (s)	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$V$ ( $m^3$ )	$t$ ( $^{\circ}C$ )	$v$ ( $m^2/s$ )	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\sigma$ ( $N/m$ )	$\frac{V}{A_p \tau}$ ( $m/s$ )	$\mu = \frac{2 A_2 (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\bar{\tau} A_p \sqrt{2g}}$	Re	We
1	2			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1.															
2.															
3.															
4.															
5.															

Otrzymane wyniki z pomiarów i obliczeń wpisujemy do odpowiednich tablic pomiarów i obliczeń.

Zamieszczone w tablicach wyniki obliczeń przedstawić w sposób graficzny, przedstawiając zależność współczynnika  $\mu$  od  $Re$  i  $We$ .

Obliczyć średnią wartość współczynników  $\mu$  i porównać je z wielkościami podanymi w literaturze.

Wymienić i omówić przyczyny ewentualnych rozbieżności otrzymanych wyników pomiaru  $\mu$

Podać jakie mogą być skutki nierównomiernego dopływu wody do otworu przystawki przy wyznaczaniu  $\mu$  dla poszczególnych przystawek.

Przeprowadzić analizę błędów.

### 3.2.6. Własne uwagi i spostrzeżenia

Podać w jakich przypadkach otrzymanie prawidłowych wyników, oraz powtarzalność w ćwiczeniu będzie możliwa do uzyskania.

## 3.3. Kawitacja na zwężeniu rury

### 3.3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z laboratoryjną metodą wyznaczania parametrów zjawiska kawitacji oraz obserwacji efektów dźwiękowych i wizualnych podczas trwania zjawiska.

### 3.3.2. Wprowadzenie

Kawitacją nazywamy zespół zjawisk towarzyszących lokalnemu spadkowi ciśnienia cieczy w stosunku do ciśnienia wrzenia a danej temperaturze.

W układach przepływowych powstaje wszędzie tam, gdzie wskutek zmiany prędkości przepływu (wywołanej np. zmianą przekroju) ciśnienie może ulec obniżeniu do ciśnienia wrzenia.

Podczas przepływu cieczy przez przewężenie, ciśnienie w przekroju przewężenia może teoretycznie przyjmować dowolnie małe wartości, praktycznie jednak wartość ciśnienia jest ograniczona i nie może spaść poniżej ciśnienia wrzenia, odpowiadającego temperaturze przepływającej cieczy.

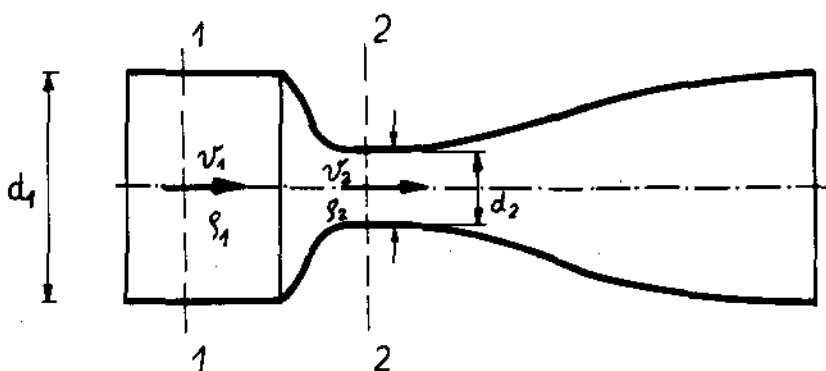
Obniżenie ciśnienia do wartości bliskich ciśnieniu parowania towarzyszy wydzielaniu się gazów i par cieczy czyli zjawisko kawitacji. Z występowaniem kawitacji jest zawsze związany wzrost strat energii, niszczenie materiału (tzw. erozja kawitacyjna) oraz pojawienie się charakterystycznych efektów dźwiękowych (tzw. szum kawitacyjny).

Kawitacja jest zjawiskiem bardzo złożonym i zależy od parametrów cieczy i ruchu w jakim ta ciecz się znajduje.

W technice, z jednej strony staramy się tak projektować i konstruować systemy przepływowe, by nie dopuszczać do powstawania zjawiska ze względu na jego szkodliwy

wpływ. Z drugiej strony zjawisko kawitacji próbuje się wykorzystać do celów praktycznych, jak np. wytwarzanie emulsji, rozdrabnianie ciał stałych, procesach mieszania i innych procesach technologicznych.

Sz szczególnie prosty i jednocześnie bardzo przejrzysty przypadek kawitacji zachodzi podczas przepływu wody w przewodzie zwężającym się, a następnie rozszerzającym rys. 3.3.1.



Rys. 3.3.1.

Strumień za przewężeniem płynie swobodniej otoczony mieszaniną pęcherzyków par. Po przepłynięciu w obszar wyższego ciśnienia, pęcherzyki pary skraplają się a w pewnej odległości za przewężeniem ciecz znów zapełnia cały przekrój przewodu, inaczej mówiąc od tzw. przeciwcisnienia.

Decydujący wpływ na powstanie kawitacji mają w tym przypadku następujące czynniki:

- wytrzymałość cieczy na naprężenia rozciągające,
- zawartość rozpuszczonego gazu w cieczy i tzw. zarodków kawitacji (tj. mikroskopijnych skupisk gazu o wymiarach od 0,1 – 1,0 μ m),
- niektóre fizyczne i termodynamiczne własności cieczy (napiecie powierzchniowe, ciśnienie parowania, lepkość i inne),
- czas przejścia cieczy przez strefę obniżonego ciśnienia.

Ocenę możliwości powstania kawitacji w poziomej rurze z przewężeniem przeprowadzimy w oparciu o równanie Bernoulliego ułożonego dla dwóch punktów strugi, leżących na tym samym poziomie odniesienia: punktu o przepływie niezakłóconym ( $v_1, p_1$ ) i punktu w którym powstaje kawitacja ( $p_2, v_2$ ).

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \Delta h_{1-2} \quad (3.3.1)$$



gdzie:

$\Delta h_{1-2}$  — wysokość strat energetycznych na odcinku 1-2, które składają się ze strat liniowych i miejscowych

i równania ciągłości przepływu

$$\dot{V} = \frac{\pi d_1^2 V_1}{4} = \frac{\pi \cdot d_2^2 V_2}{4} \quad (3.3.2)$$

Ogólna strata energii może być wyrażona zależnością:

$$p_1 - p_2 = R \dot{V}^2 \quad (3.3.3)$$

gdzie:

R — jest opornością układu brana na odcinku 1-2.

Jeżeli  $p_2$  zmaleje tak, że  $p_2 < p_w$ , to w przekroju 2-2 nastąpi odparowanie cieczy. Gdy  $p_2$  będzie równe  $p_w$  to strumień objętości  $\dot{V}$  przepływającej cieczy będzie odpowiadał przepływowi krytycznemu  $\dot{V}_{kryt.}$ , którego nie wolno przekroczyć chcąc uniknąć kawitacji, czyli

$$\dot{V} = \dot{V}_{kryt.} = \sqrt{\frac{p_1 - p_w}{R}} \quad (3.3.4)$$

Analizując równanie 3.3.4 zauważymy, że kawitacja nie wystąpi jeżeli

$$p_1 > R \cdot \dot{V}_{kryt.}^2 + p_w \quad (3.3.5)$$

Dotrzymanie warunku 3.3.5 może być dokonane trzema sposobami:

- przewężenie przewodu lub urządzenie hydrauliczne tak ukształtować, aby w nim nie występowały zbyt małe ciśnienia;
- podwyższyć poziom ciśnienia statycznego  $p_1$ ;
- zmniejszyć ciśnienie wrzenia cieczy przez obniżenie temperatury;
- zmniejszyć oporność R przez zmianę materiału użytego do budowy układu przepływowego.

Istotną rolę w zagadnieniach kawitacji odgrywa wielkość charakterystyczna, określająca niebezpieczeństwo powstania kawitacji tzw. liczba kawitacji.

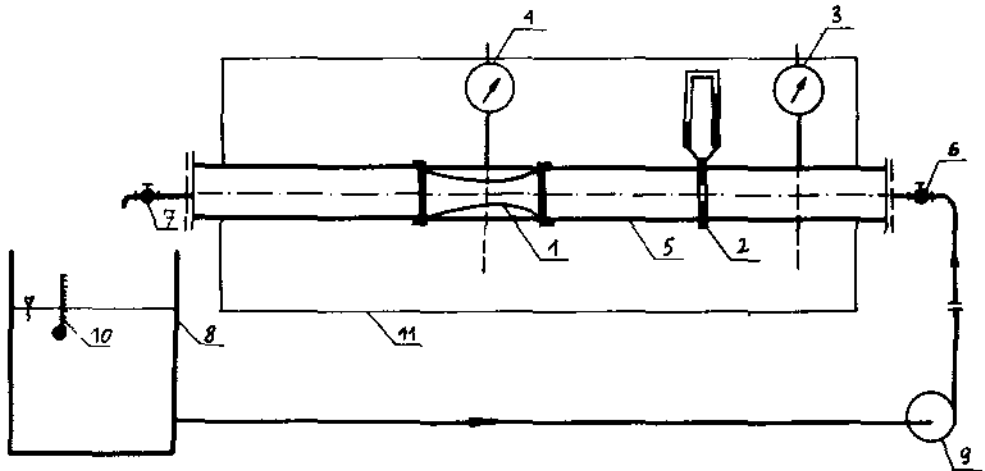
$$\sigma = \frac{p - p_w}{\rho V^2} = \frac{2(p - p_w)}{\rho v^2} \quad (3.3.6)$$

gdzie:

- $p$  i  $v$  — ciśnienie i prędkość w przepływie niezakłóconym  
 $p_w$  — ciśnienie wrzenia cieczy w danej temperaturze.

### 3.3.3. Schemat i opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe na rys. 3.3.2 składa się z odcinka przewężonej rury wykonanej ze szkła organicznego (1), układu pomiarowego natężenia przepływu (2) i ciśnień (3), manometru, wakuometru (4),



Rys. 3.3.2.

Woda do przewodu (5) podawana jest poprzez zawór regulacyjny (6), odprowadzana przez zawór regulacyjny (7) do zbiornika wody obiegowej (8). Ze zbiornika wody obiegowej (8) do tłoczego (9).

Dodatkowe wyposażenie stanowiska stanowi termometr (10). Poziomy odcinek rury został umocowany na odpowiedniej konstrukcji podtrzymującej (11).

### 3.3.4. Sposób wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie rozpoczynamy od włączenia silnika pompy wody obiegowej, a następnie ustalenia za pomocą zaworu (6) minimalnego przepływu.

Po ustaleniu przepływu określamy strumień objętości za pomocą krzywej pomiarowej (2) oraz mierzymy temperaturę wody w zbiorniku (8).

Dla doświadczalnego wyznaczenia zależności  $p_1$  i  $p_2$  od  $\dot{V}$  pomiary prowadzimy dla  $\dot{V} < \dot{V}_{\text{krytycznego}}$ .

Ustalenie przebiegu zjawiska wymaga wykonania szeregu pomiarów dla różnych wartości przepływu, a tym samym i różnych  $p_1$  i  $p_2$ . Otrzymane wartości należy wykorzystać do sporządzenia charakterystyki krzywej  $R\dot{V}^2$  na odcinku pomiarowym 1–2.

W celu dokonania obserwacji początkowej i rozwiniętej fazy kawitacji oraz określenia  $P_2$  krytycznego należy zwiększyć przepływ przez odpowiednie otwarcie zaworów regulacyjnych (6) i (7).

Poczynione w ten sposób obserwacje pozwolą na określenie przedziału  $[\dot{V}, \dot{V}_{\text{kryt.}}]$  przepływu wolnego od kawitacji.

Wykorzystując podany wyżej sposób przeprowadzania pomiarów, należy znaleźć przedział dla  $p_2 = p_w$ , przy czym  $p_w$  jest ciśnieniem parowania w temperaturze pomiaru odczytanym z tablic.

### 3.3.5. Opracowanie wyników

W oparciu o uzyskane wyniki z pomiarów oraz obserwacje należy sporządzić charakterystykę przepływu na odcinku 1 – 2. Określić przedział natężenia przepływu wolnego od kawitacji.

Wykorzystując krzywą  $p_1 = f_1(\dot{V})$ , wyznaczyć odpowiednie przedziały ciśnienia  $p_1$ , zabezpieczające przed kawitacją odpowiadające przedziałowi wolnemu od kawitacji i występowaniu kawitacji.

Wyniki pomiarów i obliczeń oraz obserwacji zestawzić w tablicy 3.3.1.

Tablica 3.3.1

Zestawienie wyników badań przepływu z kawitacją

Nr	$P_1$ (MPa)	$P_2$ (MPa)	$P_{ISA}$ (MPa)	$\dot{V}$	$t$ (°C)	$P_w$	Uwagi
1	2	3	4	5	6	7	8
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

### 3.3.6. Własne uwagi i spostrzeżenia

Opracowując wyniki, zwrócić szczególną uwagę na długość przedziału  $[\dot{V}, \dot{V}_{kawitacji}]$ , krzywą  $p_2 = f_2(\dot{V})$  wyznaczoną dla  $\dot{V} < \dot{V}_{kryt.}$ , przedłużyć na przedział  $\dot{V} > \dot{V}_{kryt.}$

Podać inne własne uwagi i spostrzeżenia.

### 3.4. Dynamiczne działanie strumienia

#### 3.4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z jednym ze sposobów pomiaru i teoretycznego wyznaczania wartości naporu hydrodynamicznego na powierzchni pozostające w równowadze.

#### 3.4.2. Wprowadzenie

Naporem hydrodynamicznym nazywamy siłę z jaką strumień cieczy działa na powierzchnię przegrody ustawioną na jego linii działania w odległości nie większej niż długość zwartej części strumienia.

Wypływający z dyszy strumień, po napotkaniu przegrody na linii działania, oddziałuje na nią siłą zwaną naporem hydrodynamicznym. Wartość siły zależy od prędkości, wymiarów przekroju poprzecznego strumienia i kształtu, oraz wymiarów powierzchni przegrody i jej położenia w stosunku do osi linii działania. W praktyce wiedza o zachowaniu się strumienia wykorzystywana jest np. do konstruowania turbin wodnych, urządzeń hydromechaniczacji, konstrukcji zraszaczy itp.

Wartość naporu hydrodynamicznego możemy obliczyć stosując zasadę ilości ruchu zapisaną równaniem:

$$\frac{d \vec{\pi}}{d \tau} = \vec{P} \quad (3.4.1)$$

gdzie:

$\vec{P}$  — wektor główny sił zewnętrznych,

$d \vec{\pi}$  — wektor pędu ogólnego, ograniczonego nieruchomą powierzchnią kontrolną o polu A.

Stosując zasadę wyrażoną równaniem 3.4.1 do obszaru ograniczonego powierzchnią kontrolną (w jej chwilowym położeniu) o polu A, otrzymamy:

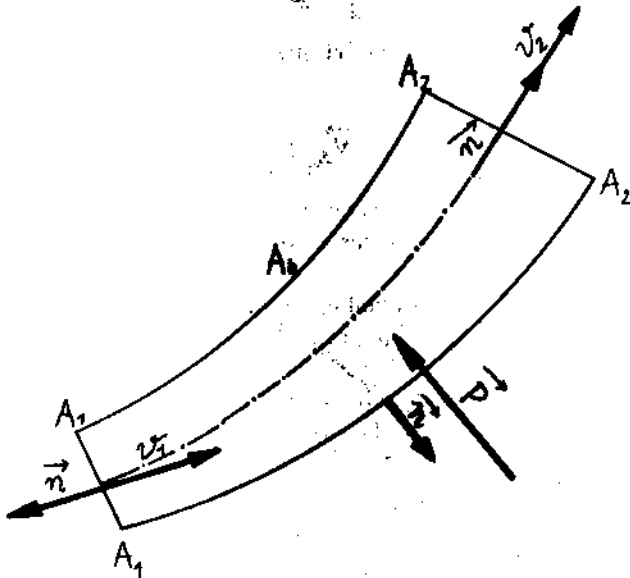
$$\frac{d \vec{\pi}}{d \tau} = \iint_A \vec{V} \rho V_n dA = \vec{P} \quad (3.4.2)$$

Równanie 3.4.2 wyraża twierdzenie:

Strumień pędu przez powierzchnię kontrolną w ruchu ustalonym płynie, równy jest wektorowi głównemu sił zewnętrznych jakie działają na płyn zawarty w obszarze ograniczonym tą powierzchnią.

W dalszych rozważaniach zastosujemy równanie 3.4.2 do rozpatrzenia przypadku przepływu jednowymiarowego i ustalonego ruchu cieczy.

W tym celu obierzmy chwilowe **położenie** powierzchni kontrolnej, jak na rys. 3.4.1 dla której napiszemy:



Rys. 3.4.1

$$\int_{A_1 + A_2 + A_b} \rho \vec{v} \cdot \vec{v}_n dA = \vec{P}' \quad (3.4.3)$$

czyli

$$\int_{A_1} \rho_{A_1} \vec{v}_{A_1} \cdot \vec{v}_{A_1n} dA_1 + \int_{A_2} \rho_{A_2} \vec{v}_{A_2} \cdot \vec{v}_{A_2n} dA_2 + \int_{A_b} \rho_{A_b} \vec{v}_{A_b} \cdot \vec{v}_{A_bn} dA_b = \vec{P}' \quad (3.4.4)$$

Przyjmując, że ciecz nie wypływa przez powierzchnię boczną z uwagi na fakt, że tworzą ją linie prądu, mamy:

$$v_n A_1 = -v_{A_1} ; v_n A_2 = v_{A_2} ; v_n A_b = 0$$

zatem:

$$\vec{P}' = \rho_{A_2} \int_{A_2} \vec{v}_{A_2} v_{A_2} dA_{A_2} - \rho_{A_1} \int_{A_1} \vec{v}_{A_1} v_{A_1} dA_1 \quad (3.4.5)$$

Przy ruchu ustalonym  $V_{A_1} = \text{const.}$  i  $V_{A_2} = \text{const.}$  to z równania ciągłości wynika zależność:

$$\rho_{A_1} V_1 A_1 = \rho_{A_2} V_{A_2} A_2 = \rho \dot{V} \quad (3.4.6)$$

Korzystając z dwóch ostatnich zależności otrzymuje się wzór opisujący wektor sił zewnętrznych w postaci:

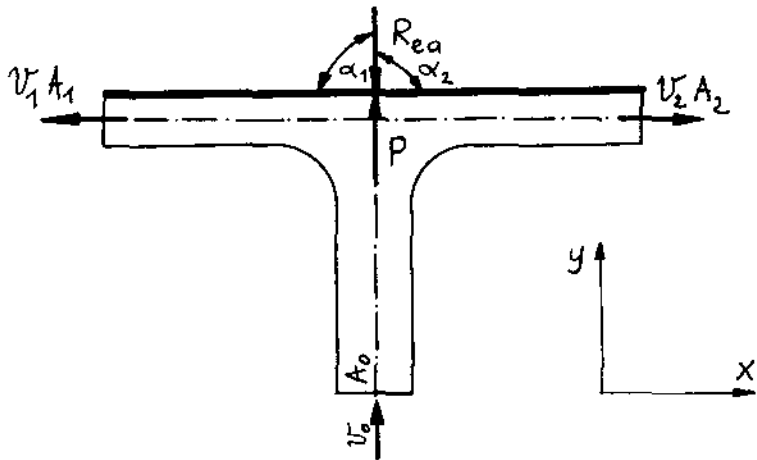
$$\vec{P} = \rho \dot{V} (\vec{V}_{A_2} - \vec{V}_{A_1}) \quad (3.4.7)$$

Przyjmując do dalszych rozważań, założenia:

1. strumień porusza się w ośrodku, nie wywierającym wyczuwalnego wpływu na przebieg zjawiska,
  2. napór wywierany jest przez swobodny strumień cieczy doskonałej,
  3. rozkład prędkości w przekroju poprzecznym strumienia jest równomierny,
  4. ruch cieczy jest ustalony,
  5. powierzchnia przegrody jest doskonale gładka,
  6. powierzchnie przegród są daleko większe od przekroju strumienia zasilającego.
- Uwzględniając powyższe założenia wzór 3.4.7 można wykorzystać do obliczenia naporu hydrodynamicznego (reakcji hydrodynamicznej) strumienia cieczy na przeszkodę.

Rozpatrzmy przypadki najczęściej spotykane i objęte badaniami:

1. Płaska przegroda ustawiona jest prostopadle do osi strumienia rys. 3.4.2. W tym przypadku otrzymamy:

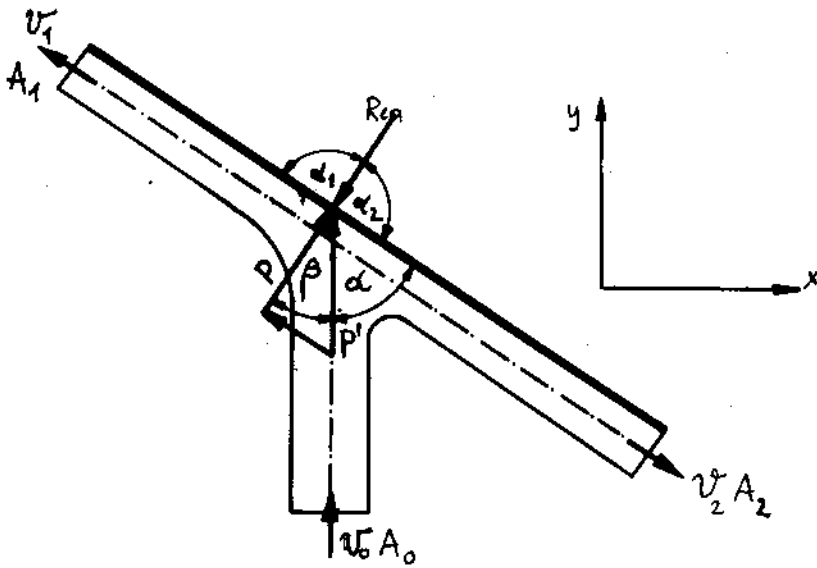


Rys. 3.4.2.

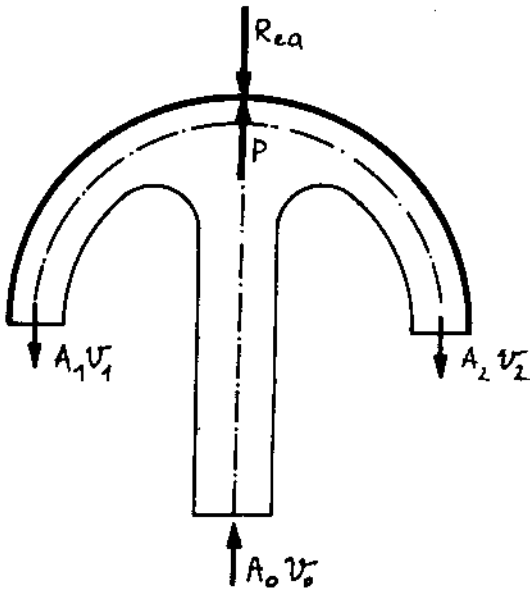
$$P = \rho v_0^2 A_0 = \rho \dot{V}_0 \cdot v_0 = \rho \frac{\dot{V}_0^2}{A_0} \quad (3.4.8)$$

2. Płaska przegroda nachylona jest do osi strumienia pod kątem  $45^\circ$  rys. 3.4.3.

$$P = P' \sin \alpha = \rho \dot{V} V_0 \sin \alpha = \rho \frac{\dot{V}_0^2}{A_0} \sin \alpha \quad (3.4.9)$$



Rys. 3.4.3.



Rys. 3.4.4.

3. Czasza półkolistą wklęsłą rys.3.4.4.

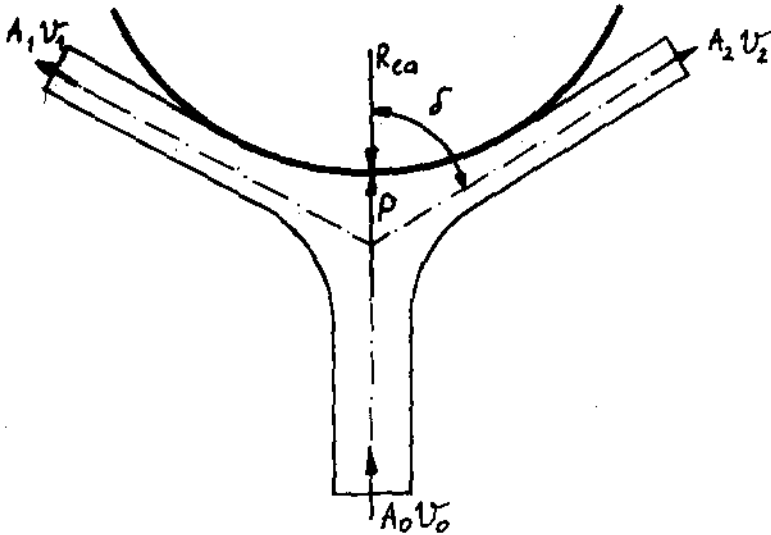
$$\alpha_1 = \alpha_2 = 180^\circ \quad \beta = 0$$

zatem

$$P = 2 \rho V_0^2 A_0 = 2 \rho \frac{\dot{V}_0^2}{A_0} V_0 = 2 \rho \frac{\dot{V}_0^2}{A_0} \quad (3.4.10)$$

4. Czasza półkulista wypukła rys. 3.4.5.

$$P = \rho \dot{V}_0 V_0 (1 - \cos \delta) = \rho \frac{\dot{V}_0^2}{A_0} (1 - \cos \delta) \quad (3.4.11)$$



Rys. 3.4.5.

Poczynione założenia, przy wyprowadzeniach sprawiają, że rzeczywiste wartości naporu będą na ogół mniejsze od obliczonych o około 4 do 8%.

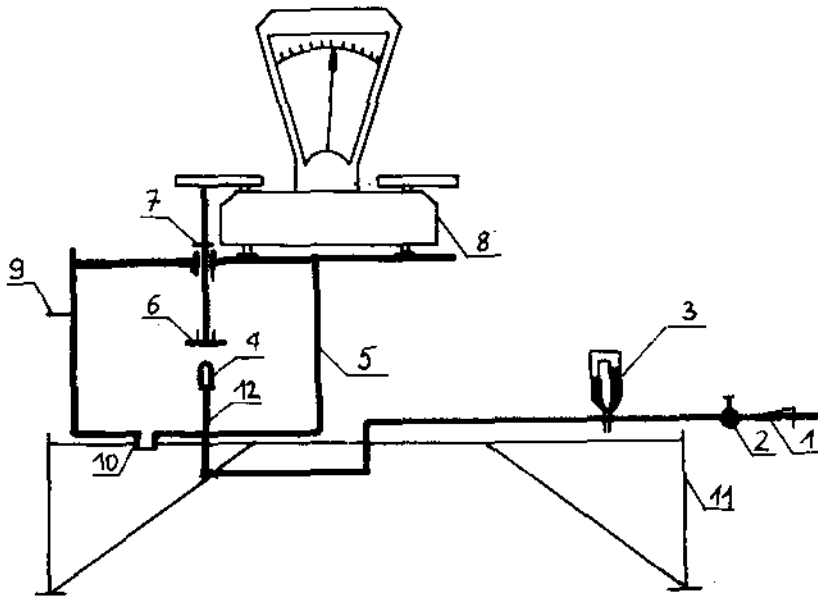
### 3.3.3. Schemat i opis stanowiska

Schemat i opis stanowiska przedstawiono na rys. 3.4.6.

Doprowadzenie wody do stanowiska z instalacji odbywa się przewodem (1). Zawór (2) służy do regulacji i odcinania dopływu wody. Przewodem doprowadzającym (1) woda płynie poprzez urządzenie pomiarowe, którym jest kryza, a następnie do dyszy (4).

W badaniach stosuje się dysze wylotowe o różnych średnicach  $d$ . Wyptywający z dyszy strumień cieczy działa na przeszkodę, która stanowi element wymienny stanowiska (6). Napór hydrodynamiczny jest przekazywany przez wodzik prowadnicy (7) do wagi (8), której wskazówka sygnalizuje wartość wytworzonego nacisku. Układ pomiarowy przegroda – dysza jest zamknięty w osłonie z pleksiglasu (5). Odpływ wody z urządzenia do kanalizacji odbywa się przez otwór (10). Całość jest zamocowana na sztywno do konstrukcji (11). Wymianę dyszy i przegrody dokonuje się przez wysuwane zamknięcie (9).





Rys. 3.4.6.

### 3.4.4. Sposób wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie rozpoczynamy od wypoziomowania wagi (8), następnie pomierzenia średnicy otworu wypływowego dyszy (4), która ma być użyta w badaniach. Po zmierzeniu średnicy dyszy, nakręcamy przy pomocy klucza na końcówkę wylotu (12).

Ważymy na wadze (8) badaną przegrodę (6) wraz z wodzikim (7). Zważoną przegrodę i wodzik montujemy na stanowisku zachowując kolejność – wodzik, a następnie przegrodę przykręcamy do wadzika (7).

Wykonanie pojedynczego pomiaru na tak przygotowanym stanowisku polega na odczycie wskazań spadku ciśnienia (3) oraz odczycie wychylenia wskazówki wagi i pomiaru temperatury cieczy w otworze odpływowym (10).

Pomiary i obliczenia powtórzyć 5-krotnie dla każdej z przegród, przy zachowaniu różnych prędkości wypływu wody, regulowanego zaworem (1).

Odczytów dokonywać przy utrzymanym stałym przepływie wody. Badania przeprowadzić dla (4) rodzajów przegród, będących na wyposażeniu stanowiska.

### 3.4.5. Opracowanie wyników

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabelicy 3.4.1 i porównać je z wynikami uzyskanymi z odpowiednich wzorów oraz przedstawić w sposób graficzny  $R_p = f(R)$ . Obliczyć również procentowy błąd pomiaru:

$$\delta = \frac{R - R_p}{R_0} 100 \%$$

gdzie:

R – wartość obliczona z odpowiedniego wzoru dla danej przegrody,

$R_p$  – wartość otrzymana z pomiaru dla danej przegrody.

Tablica 3.4.1

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń wartości reakcji dla badanej przegrody

Nr	Rodzaj przegrody, cieżar i średnica dyszy	Wartość reakcji z pomiarów $R_p$	t (°C)	$\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	$m = d A \sqrt{\rho \Delta P}$	$v = \frac{4m}{\pi t d^2}$ ( $\frac{g}{s}$ )	$R_{ob}$ ze wzoru dla odpowiedniej przegrody	Procentowy błąd pomiaru $\delta$ [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	L							
2.	G =							
3.								
4.	d =							
5.								

### 3.4.6. Własne uwagi i spostrzeżenia

Omówić przyczyny ewentualnego błędu pomiaru  $\delta$  oraz zależności jego wartości od wartości reakcji.

Podać jak zmienia się reakcja podczas działania strumienia na przeszkody ruchome. Oprócz wyżej wymienionych sposobów omówić jeszcze inne, za pomocą których można byłoby pomierzyć wartość reakcji.

Podać własne uwagi i spostrzeżenia dotyczące badanego problemu.

## 3.5. Ruch nieustalony w przewodach pod ciśnieniem

### 3.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest sporządzenie wykresów zmian poziomów wody w komorze wyrównawczej przy natychmiastowym zamknięciu i natychmiastowym zwiększeniu odpływu w oparciu o wyniki badań.

### 3.5.2. Wprowadzenie

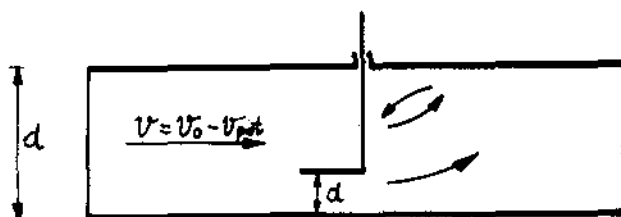
Ruchem nieustalonym nazywamy taki ruch, w którym elementy ruchu, takie jak: prędkość, przyspieszenie, ciśnienie i gęstość zależą od czasu.

W układach przepływowych z ruchem nieustalonym spotykamy się wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia ze zmianą przepływu mniej lub bardziej gwałtowną.

Taka szybka zmiana przepływu w przewodach pod ciśnieniem, spowodowana zmianą prędkości prowadzi do powstania zjawiska tzw. uderzenia hydraulicznego.

Uderzeniem hydraulicznym nazywana jest szybka zmiana ciśnienia w przewodach, spowodowana zmianą prędkości przepływającej cieczy.

Podwyższenie ciśnienia przy występowaniu uderzenia hydraulicznego może okazać się tak znaczne, że doprowadzić może do rozerwania przewodu, lub zerwania połączenia. Przy szybkim zamykaniu zaworu lub zasuwy na przewodzie, prędkość przepływu wody w nim zmniejsza się bardzo szybko do zera i następuje zmiana energii kinetycznej strumienia w potencjalną, co prowadzi do podwyższenia ciśnienia rys. 3.5.1.



Rys. 3.5.1.

gdzie:

- $v$  – prędkość przy danym stopniu otwarcia zasuwy,
- $v_0$  – prędkość początkowa przed zamknięciem zasuwy,
- $v_{pot}$  – prędkość przy częściowym otwarciu zasuwy.

Otwierając, a następnie zamykając zawór czerpialny instalacji wodociągowej jesteśmy sprawcami ruchu nieustalonego. Czynność zamykania i otwierania zaworu choć prowadzi do wywołania zjawiska uderzenia hydraulicznego na ogół nie prowadzi do uszkodzeń instalacji. Dzieje się, tak dlatego, że czas zamykania, średnica przewodu, konstrukcja zaworu i ciśnienie w instalacji nie są w stanie wywołać dużych przyrostów ciśnień.

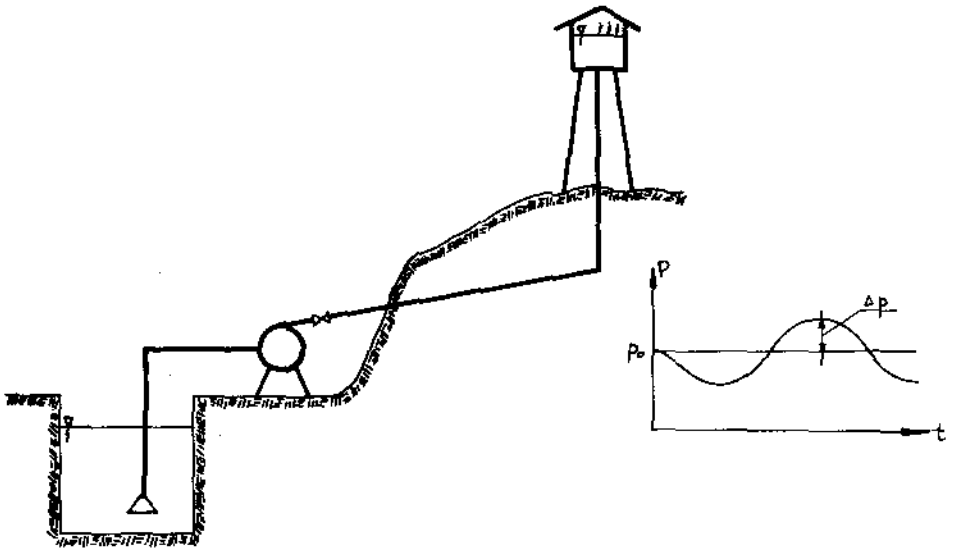
Ruch nieustalony powstanie również gdy nastąpi przerwa w dopływie energii elektrycznej do stacji podwyższania ciśnienia – stacji pomp.

W tym przypadku możemy mieć do czynienia z niemal natychmiastowym odcięciem przepływu i wystąpieniem zjawiska uderzenia hydraulicznego groźnego w skutkach dla układów hydraulicznych jak pokazano na rys. 3.5.2.

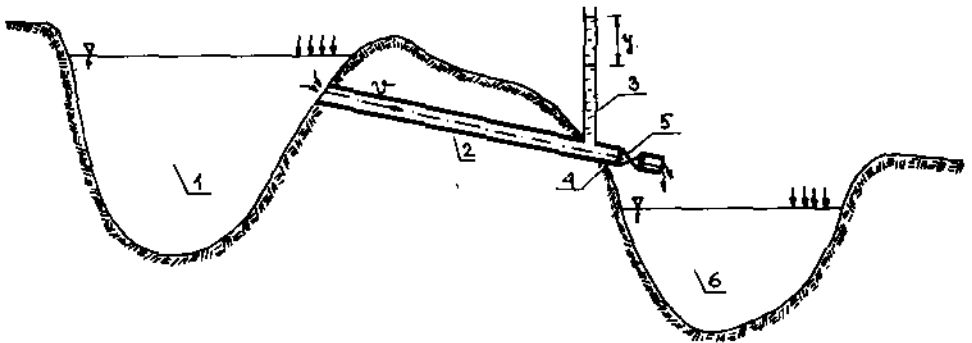
Podobna sytuacja może wystąpić w przepływie cieczy w syfonach, przez które przepływa woda ze zbiornika A do B przez przeszkodę lub pod przeszkodą dzielącą dwa zbiorniki rys. 3.5.3 gdy spowodujemy natychmiastowe zamknięcie przepływu.

Podwyższenie ciśnienia przy występowaniu zjawiska uderzenia hydraulicznego może zostać wykorzystane w celach użytecznych np. dla podnoszenia wody za pomocą tarana hydraulicznego.

Tarany hydrauliczne mogą podnosić wodę na wysokość do 60 m, przy wydajności 2,0 do 2,2  $\text{dm}^3/\text{min}$ . Takie parametry pracy wskazują na możliwość ich stosowania w wodociągach wiejskich i przemysłowych jako urządzeń do napełniania zbiorników wodą. Ponadto cechuje ich duża bezawaryjność i prostota obsługi. Osłabienie uderzenia



Rys. 3.5.2.



Rys. 3.5.3.

hydraulicznego w układzie przepływowym może być spowodowane za pomocą różnych środków. Do najczęściej stosowanych należy zaliczyć: powolne zamykanie lub otwieranie zaworów – zasuw, zmniejszanie długości przewodu, stosowanie zbiorników powietrznych, zaworów bezpieczeństwa, komór wyrównawczych.

W dalszych rozważaniach ograniczymy się do przeanalizowania przypadku jak pokazano na rysunku 3.5.3., gdzie dla osłabienia uderzenia hydraulicznego wybudowano komorę wyrównawczą.

Układ pomiarowy pokazano na rysunku 3.5.3 składa się ze zbiornika (1), sytonu (2) komory wyrównawczej (3), odcinka przewodu łączącego komorę z zaworem (4), zaworu (5) i odbiornika (6).

Zamykając w sposób natychmiastowy zawór (5) wywołamy w przewodzie łączącym zbiorniki 1 i 2 ruch nieustalony. Istniejąca przed zamknięciem różnica poziomów wody w komorze wyrównawczej i zbiorniku (1) spowoduje dalszy przepływ na odcinku zbiornik komora wyrównawcza, co w konsekwencji prowadzi do podniesienia się wody w komorze wyrównawczej. Woda w komorze wyrównawczej zostanie podniesiona na taką wysokość, aż wytworzone nadciśnienie w komorze nie spowoduje zahamowania przepływu na odcinku zbiornik (1) – komora (3).

Po osiągnięciu takiego stanu, na skutek sił bezwładności rozpocznie się przepływ wody w kierunku odwrotnym. Zwierciadło wody w komorze wyrównawczej zacznie opadać do jakiegoś innego stanu, by następnie podnieść się ponownie na pewną, lecz już mniejszą w stosunku do pierwotnej wysokość.

W ten sposób w komorze wyrównawczej powstanie wahadłowy ruch poziomu wody, którego amplituda będzie malała na skutek oporów hydraulicznych na długości i miejscowych.

Podany przebieg zjawiska  ruchu nieustalonego możemy opisać równaniami podanymi w [2].

$$\frac{d v}{d \tau} = \frac{g}{l} \left( y - \frac{l v^2}{c^2 R_h} \right) \quad (3.5.1)$$

oraz

$$\frac{d y}{d \tau} = \frac{\dot{V} - v A}{A_{\text{komory}}} \quad (3.5.2)$$

gdzie:

$v$  – chwilowa prędkość wody w rurociągu łączącym zbiornik z komorą wyrównawczą,

$\tau$  – czas,

$l$  – długość całkowita (tj. długość powiększona o długość wynikającą z oporów miejscowych),

$y$  – algebraiczna suma oporów i siły bezwładności (wysokość słupa cieczy odpowiadająca sile bezwładności).

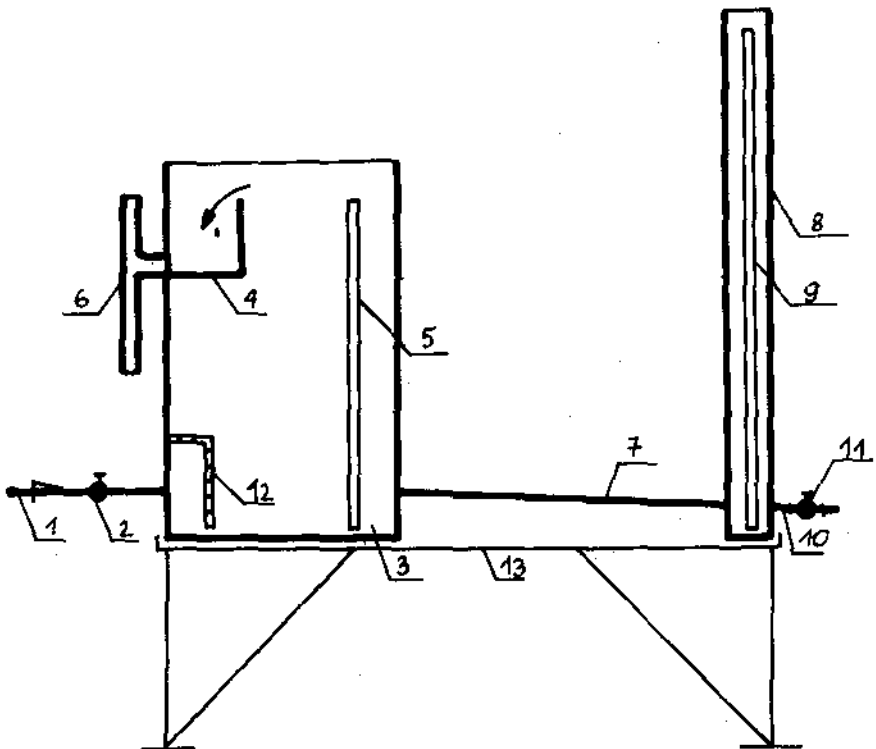
$\frac{d y}{d \tau}$  – elementarna zmiana poziomu wody w komorze w czasie  $d\tau$ ,

- $V$  – chwilowe natężenie odpływu wody z komory przez rurociąg,  
 $A_{\text{komory}}$  – pole powierzchni przekroju komory,  
 $A$  – pole przekroju rurociągu łączącego zbiornik z komorą.

W oparciu o powyższe równania możemy wyznaczyć przebieg zmian poziomu wody w komorze wyrównawczej w sposób analityczny. Szczegółowe zasady sporządzania wykresu metodą graficzną zainteresowanych czytelników odsyła się do pozycji literaturowych [2, 9, 11].

### 3.5.3. Schemat i opis stanowiska

Na rysunku 3.5.4 przedstawiono schemat instalacji pomiarowej. Model do sporządzania wykresów zmian poziomów wody w komorze wyrównawczej składa się z: przewodu doprowadzającego wodę z instalacji (1), zaworu odcinającego przepływ (2), zbiornika (3) zaopatrzonego w przelew (4) i poziomowskazu (5), rury przelewowej (6) oraz siatki tłumiącej wypływ (12).



Rys. 3.5.4.

Ze zbiornika (3) wyprowadzono przewód (7) o średnicy  $d$  i pochyleniu w kierunku szybu (8) spełniającego rolę komory wyrównawczej, którą wyposażono w piezometr (9). W dolnej części komory wyrównawczej (8) wykonano wyprowadzenie rurociągu (10) pochylonego w kierunku odpływu i zaopatrzonego na końcu w zawór (11) do natychmiastowej zmiany odpływu. Całość została ustawiona na konstrukcji mocującej (13)

#### 3.5.4. Sposób wykonania ćwiczenia

Przy realizacji doświadczeń należy pamiętać aby utrzymać stały poziom wody w zbiorniku (3). Jest to możliwe gdy pomiary będą prowadzone pod stałą kontrolą. Niezbędnych zmian dopływu wody do modelu możemy dokonać za pomocą zaworu (2).

W obydwu wariantach doświadczenia pomiar czasów powinien być wykonywany za pomocą zestawu stoperów jednocześnie włączonych i kolejno wyłączanych. Czynności pomiaru czasu i zamykania – otwierania zaworu wykonywać należy bardzo szybko.

##### 5.5.4.1. Sporządzanie wykresu wahań poziomu wody w komorze wyrównawczej przy natychmiastowym zamknięciu przepływu

Przebieg pomiarów jest następujący: po otwarciu zaworu (2) czekamy aż model wypełni się całkowicie wodą. Następnie otwieramy zawór (11) i czekamy tak długo aż nastąpi ustalenie się przepływu wody. Ustalenie się przepływu poznamy po tym, że nie będziemy obserwować wahań poziomów w rurkach piezometrycznych (5) i (8).

Utrzymanie stałego poziomu wody w zbiorniku (3) gwarantuje przelew (4) przez który powinien przelewać się nadmiar wody dopływającej z instalacji.

Pojedynczy pomiar polega na spowodowaniu natychmiastowego przerwania przepływu za pomocą zaworu (1) i odnotowaniu wahań zwierciadła wody w komorze wyrównawczej. Zapis wahań polega na notowaniu charakterystycznych (ekstremalnych) rzędnych zwierciadła wody w komorze i odpowiadających im przedziałów czasowych jakie upłynęły od chwili, w której zamknięto przepływ. Dla wyznaczenia przebiegu krzywej wykres wahań dla każdego punktu pomiarowego, pomiar powtórzyć należy co najmniej trzykrotnie.

##### 3.5.4.2. Sporządzenie wykresu zmian poziomów wody w komorze wyrównawczej przy bardzo szybkim wzroście przepływu

Doświadczenie rozpoczynamy od napełnienia modelu wodą przy zamkniętym zaworze (11). Po ustaleniu się poziomów wody w komorze wyrównawczej i stwierdzeniu przelewania się wody przez przelew możemy przystąpić do pomiarów.

W tym celu otwieramy w sposób natychmiastowy zawór (11) i notujemy czasy „przechodzenia” opadającego zwierciadła wody w komorze wyrównawczej przez ustalone uprzednio rzędne. Do wykreślenia krzywej opadania wymagane jest aby ona była przeprowadzona przez co najmniej 5 punktów, a każdy punkt był średnią z trzech pomiarów.

### 3.5.5. Opracowanie wyników

#### 3.5.5.1. Sporządzenie wykresów wahań poziomów wody w komorze wyrównawczej

Na podstawie otrzymanych z notowań punktów, należy sporządzić wykres w układzie współrzędnych  $(y, \tau)$ . Następnie sporządzić wykres oparty o metodę rachunkowo — wykreślną dla zadanych warunków i porównać otrzymane wykresy ze sobą, a następnie je omówić.

#### 3.5.5.2. Sporządzenie wykresu zmian poziomów wody w komorze przy szybkim zwiększeniu wypływu

Na podstawie otrzymanych z notowań wielkości sporządzić wykres opadania poziomu zwierciadła wody w komorze wyrównawczej  $y = y(\tau)$  i porównać z wykresem otrzymanym w wyniku odpowiednich obliczeń teoretycznych.

### 3.5.6. Własne uwagi i spostrzeżenia

Podać uwagi na temat przebiegu krzywych teoretycznych i otrzymanych na podstawie wyników z badań. Wyjaśnić dlaczego wskazane byłoby przed wykonaniem pomiarów przeciwłożyć czynności pomiarowe w zespole. Podać ewentualnie inne uwagi i spostrzeżenia.

## 3.6. Ruch cieczy w korytach otwartych

### 3.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie parametrów przepływu krytycznego wody w korycie otwartym oraz zapoznanie się ze zmianą rodzaju ruchu na drodze wizualizacji przepływu.

### 3.6.2. Wprowadzenie

Pod pojęciem koryta otwartego rozumiemy w hydraulice każdy przewód, w którym istnieje swobodne zwierciadło cieczy. Wynika stąd, że warunkiem przepływu w korycie otwartym jest pochylenie dna koryta w kierunku mającego odbywać się przepływu, inaczej mówiąc jest ułożenie go z pewnym spadkiem.

Swobodne zwierciadło oznacza, że ciecz może nie przylegać do ścian ze wszystkich stron.

Korytem otwartym jest więc kanał żeglugi, rzeka a także przewód o zamkniętym przekroju poprzecznym, lecz nie całkowicie wypełniony cieczą.

W tych wszystkich przypadkach mamy do czynienia z bezciśnieniowym przepływem wody. Dlatego też obok nazwy koryta otwartego stosuje się bardzo często określenie przewodu bezciśnieniowego.

Obserwując przepływ wody przez koryto otwarte dochodzimy do wniosku, że mamy do czynienia z przepływami spokojnymi — nadkrytycznymi i rwącymi — podkrytycznymi. Umowne kryterium podziału przepływów stanowią tzw. parametry krytyczne  $h_{kr}$ ,  $v_{kr}$ ,  $l_{kr}$ , przy których energia strumienia osiąga wartość minimalną. Energię rozporzą-