

BADANIE WYPŁYWU CIECZY ZE ZBIORNIKA

1. Wprowadzenie

Spośród zagadnień związanych z wypływem cieczy ze zbiornika do najważniejszych należą:

- obliczenie natężenia wypływu cieczy przez otwór w ścianie lub w dnie zbiornika
- wyznaczenie czasu opróżniania zbiornika

2. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest określenie współczynników α, β, μ , a następnie określenie czasu wypływu cieczy ze zbiornika

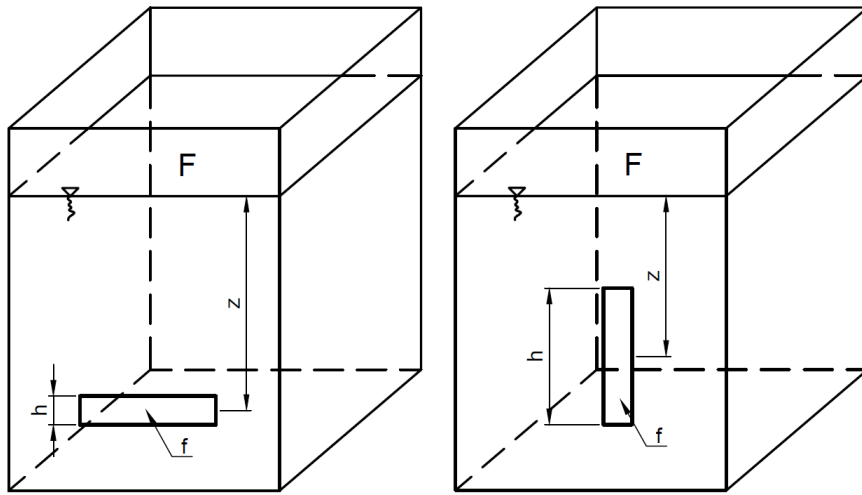
2. Wiadomości wstępne.

Wypływ cieczy ze zbiornika odbywa się przez tzw. otwór mały, otwór swobodny i jest wypływem ustalonym.

Wypływ ustalony, to taki gdy zwierciadło cieczy w zbiorniku pozostaje na niezmiennej wysokości $z = \text{const}$, a ciśnienie działające na powierzchnię swobodną zbiornika oraz na otwór jest takie samo. Zwierciadło cieczy w zbiorniku możemy utrzymać na tej samej wysokości, dostarczając do zbiornika tyleż samo cieczy ile w tym czasie z niego wypływa.

Otwór swobodny to otwór, przez który strumień cieczy wypływa w powietrze lub inny ośrodek gazowy.

Otwór mały to otwór, którego powierzchnia jest znacznie mniejsza od powierzchni zbiornika oraz wymiar pionowy jest znacznie mniejszy od odległości osi otworu od lustra cieczy.



$$F \gg f, \quad z \gg h$$

$$F \gg f, \quad z \not\gg h$$

Rys .1. Otwór mały

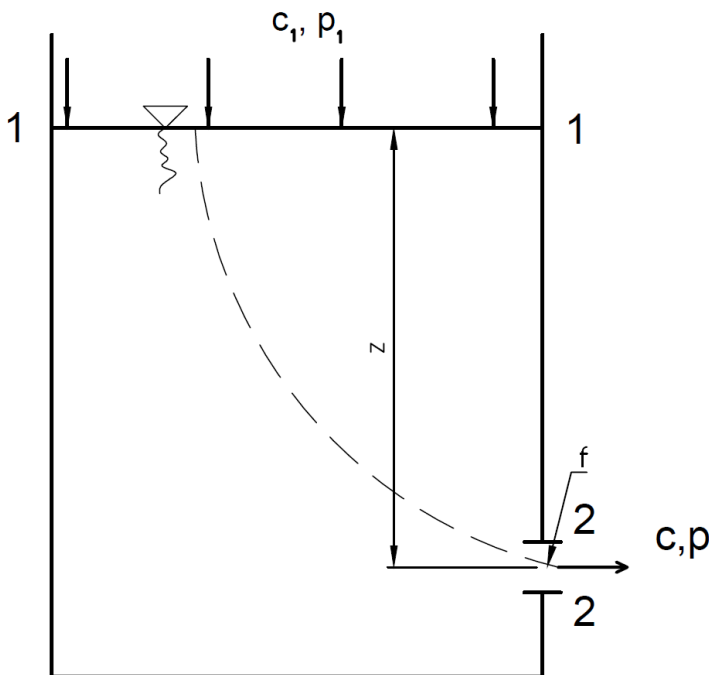
Jak powszechnie wiadomo strumień natężenia cieczy wyznaczamy jako iloczyn, pola powierzchni przekroju przewodu i prędkości średniej.

$$\dot{V} = f_o \cdot c_{\dot{s}r} \quad (1)$$

Podczas wypływu cieczy ze zbiornika przekrój (średnicę) otworu możemy w prosty sposób wyznaczyć .

Ile wynosi prędkość średnia w otworze ?

Rozważając przepływ cieczy między przekrojami 1-1 - w płaszczyźnie swobodnej zbiornika oraz 2-2 - w otworze wylotowym, możemy dla tych dwóch przekrojów napisać równanie Bernoulliego i wyznaczyć prędkość wypływu w otworze.



$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z = \frac{c^2}{2g} + \frac{p}{\rho g}$$

$$\text{jeżeli } z = \text{const} \text{ to } c_1 = 0$$

$$p_1 = p$$

więc

$$c = \sqrt{2gh}$$

Rys.2.

Otrzymaliśmy znaną z fizyki postać prawa Torricelliego. Wyrażenie to jest analogiczne do wyrażenia na prędkość spadania ciała w próżni: prędkość wypływu w atmosferę cieczy ze zbiornika otwartego jest równa prędkości spadku ciała z wysokości h w polu grawitacji ziemskiej. Ze wzoru wynika, że prędkość wypływu na różnych poziomach otworu jest różna; w szczególności na górnej krawędzi otworu jest mniejsza niż na dolnej, stąd rozpatrujemy otwór mały, w którym przyjmuje się stałą wartość prędkości w całym przekroju. A zatem możemy napisać że:

$$\dot{V} = f_0 \sqrt{2gz} \quad (2)$$

Jak widać powyżej do wyznaczenia prędkości wypływu cieczy ze zbiornika stosowaliśmy równanie Bernoulliego dla cieczy doskonałej, zaniedbując tym opory w cieczy lepkiej, a w szczególności straty przy wypływie cieczy w otworze. Rzeczywista prędkość wypływu c_r , jest jednak nieco mniejsza (z powodów wyżej wymienionych) od teoretycznej o około 3%. W związku z tym wprowadzono do wzoru (1) współczynnik poprawkowy $\alpha < 1$, który nazywamy współczynnikiem prędkości. Wartość jego zależy głównie od lepkości wypływającej cieczy, a ponadto od wielkości otworu i wysokości napełnienia zbiornika.

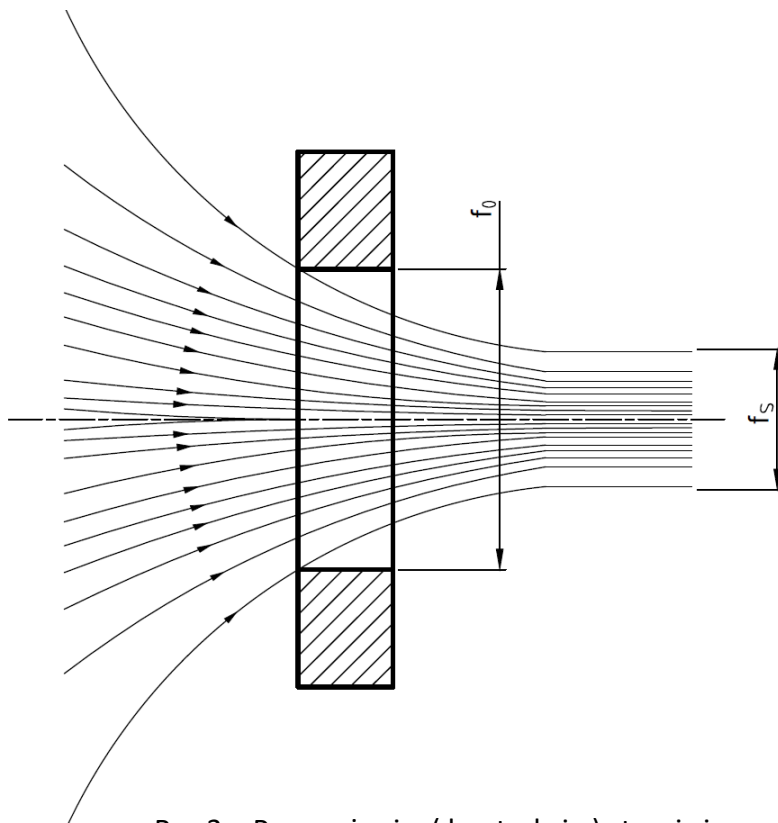
α - dla wody i innych cieczy o tej samej lepkości wynosi $0.97 \div 0.98$ wynika z tego, że nie ma dużych rozbieżności między prędkością rzeczywistą i teoretyczną. W praktyce do obliczeń α przyjmuje się na poziomie 0.98.

Okazuje się jednak, że w wypadku obliczania natężenia przepływu cieczy za pomocą wzoru

$$\dot{V} = \alpha \sqrt{2gz} f_0 \quad (3)$$

gdzie: f_0 - powierzchnia otworu

otrzymuje się wartości znacznie większe (średnio o 40%) od wartości rzeczywistych (zmierzonych). Przyczyną tego jest zjawisko zwężenia strugi (kontrakcji), towarzyszące przepływom cieczy przez otwory ostro krawędziowe. Wywołane ono jest niemożnością nagłej zmiany kierunku przepływu cząstek, poruszających się wzdłuż ścian zbiornika przez otwór oraz dławieniem strumienia wzdłuż krawędzi otworu. Cząsteczki doptywające wzdłuż ścian są odchylane na skutek sił bezwładności tworząc strugę przewężoną o polu f_s .



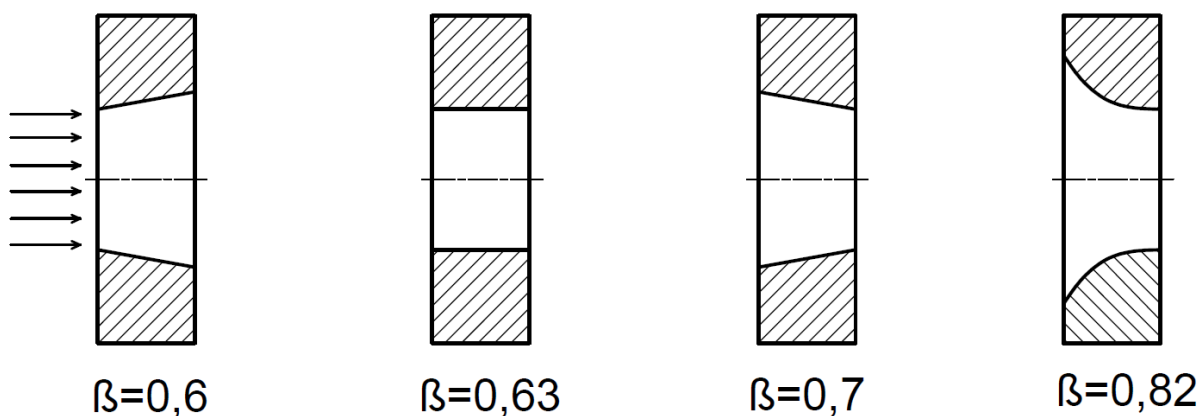
Rys.3. Przewężenie (kontrakcja) strugi cieczy.

Zjawisko kontrakcji określa bezwymiarowy współczynnik kontrakcji (przewężenia) β , który jest stosunkiem najmniejszego przekroju strugi f_s do przekroju otworu f_0 :

$$\beta = \frac{f_s}{f_0} = \frac{\frac{\pi d_s^2}{4}}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \frac{d_s^2}{d_0^2}$$

Wg. danych doświadczalnych wartość współczynnika kontrakcji β mieści się w granicach 0.6 – 0.82 i zależy od: -kształtu otworu, grubości ścianki zbiornika, stanu (ostrości) krawędzi, wysokości napełnienia zbiornika, zawiesistości cieczy.

Należy podkreślić, że nawet małe stępienie lub zaokrąglenie krawędzi powoduje wzrost wartości współczynnika β .



Rys. 4. Wpływ kształtu otworu na wartość współczynnika kontrakcji.

Uwzględniając α i β można więc napisać, że rzeczywisty wydatek podczas wypływu cieczy ze zbiornika wynosi :

$$\dot{V}_{rz} = \alpha \beta f_0 \sqrt{2gz} \quad (4)$$

iloczyn $\alpha \beta$ ozn. μ i nazwano współczynnikiem wydatku

$$\mu = \alpha \cdot \beta \quad (4a)$$

$$\dot{V}_{rz} = \mu f_0 \sqrt{2gz} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\dot{V}_{rz}}{f_0 \sqrt{2gz}} \quad f_0 \sqrt{2gz} = \dot{V}_{ter}$$

$$\mu = \frac{\dot{V}_{rz}}{\dot{V}_{ter}} \quad (6)$$

Wpisz tutaj równanie.

Wartość współczynnika wydatku μ dla swobodnych otworów ostro brzeżnych zależy od zawiesistości cieczy, wysokości napełnienia i przekroju swobodnego otworu wypływowego.

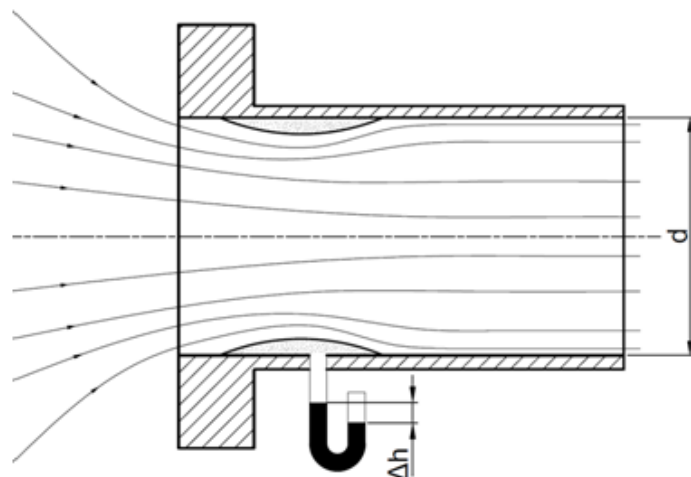
4. PRZYSTAWKI

Przewężenie strugi, jako czynnik zmniejszający natężenie wypływu cieczy jest na ogół zjawiskiem niepożądanym. Dlatego dla wyeliminowania go, stosowane są przystawki.

Przystawką nazywamy krótką rurę o dowolnych kształtach, stanowiącą obramowanie otworu. Przystawki mogą być walcowe (zewnętrzne i wewnętrzne), stożkowe (zbieżne i rozbieżne) oraz konoidalne. Długość przystawek powinna być 3 ÷ 5 razy większa od jej wewnętrznej średnicy, aby nastąpił wypływ cieczy z przystawki pełnym przekrojem. Umieszczone mogą być w dnie lub ściankach bocznych zbiornika lub u wylotu przewodu.

Współczynnik kontrakcji dla przystawek przyjmujemy zawsze równy 1.

$$\beta = \frac{f_s}{f_0} = 1$$



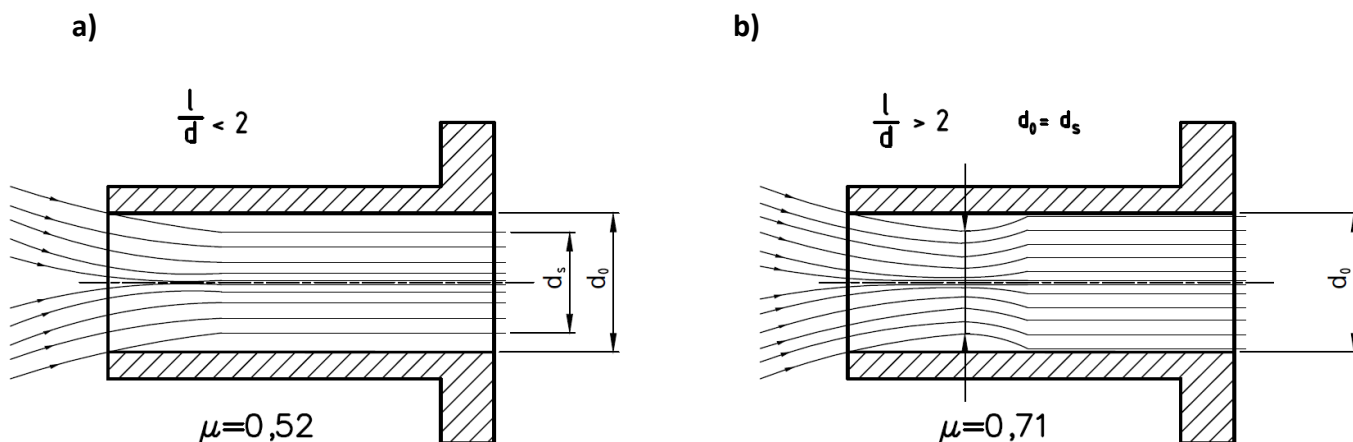
Rys.5. Przystawka walcowa.

W przekroju przewężenia obserwujemy spadek ciśnienia poniżej ciśnienia atmosferycznego – powoduje on ssanie cieczy ze zbiornika, wskutek czego natężenie wypływu przez przystawkę jest większe niż przez otwór o tym samym przekroju. Podciśnienie w obszarze gdzie struga jest przewężona powoduje, że przystawka działa jak mini pompa, co skutkuje wzrostem natężenia wypływu. Wypełniając przekrój wylotowy przystawki uzyskuje się współczynnik kontrakcji (teoretycznie) $\beta = 1$ czyli $\mu = \alpha$. Wniosek stąd, że przystawka znacznie wpływa na wzrost wydajności. Wg. danych doświadczalnych μ dla otworu walcowego z przystawką wynosi 0.82 , a dla otworu bez przystawki 0.62, czyli notujemy wzrost wydajności o ok. 30%.

$$\mu = 0.63 \cdot 0.98 \cong 0.62 \quad \text{otwór bez przystawki}$$

$$\mu = „ 1.0 \cdot 0.98 \cong 0.82 ” \quad \text{otwór z przystawką - wart. } \mu = 0.82 \text{ wynika z doświadcz.}$$

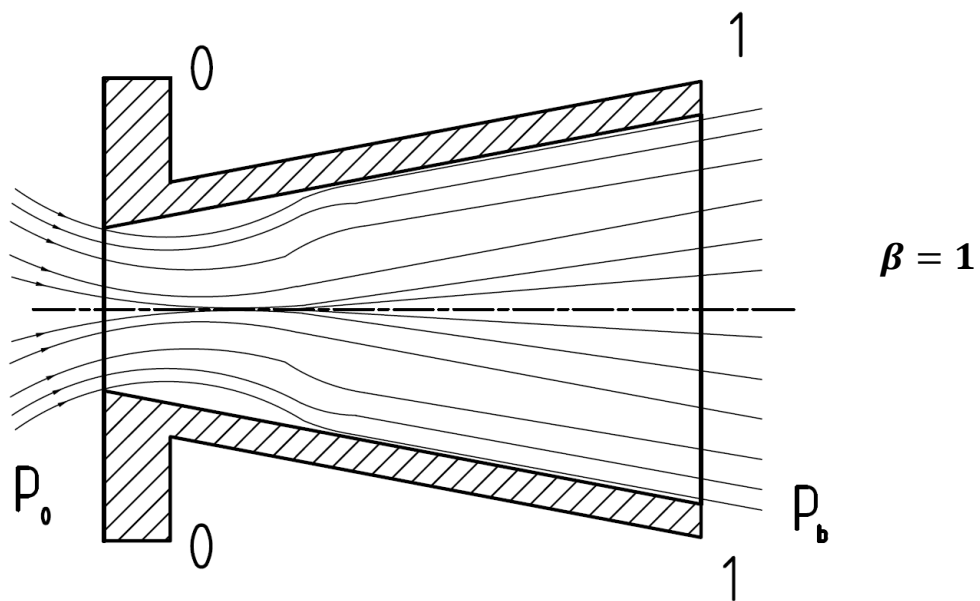
W zależności od wartości stosunku l/d strumień albo nie dotyka wewnętrznych ścian przystawki i wypływa swobodnie w powietrz, albo też rozszerza się wypełniając całkowicie przekrój poprzeczny przystawki.



Rys.6 Przystawki walcowe wewnętrzne.

W przystawkach walcowych wewnętrznych zachodzą analogiczne zjawiska, jak w przystawkach zewnętrznych. W przystawce wewnętrznej zachodzi tylko większe dławienie strumienia, co wpływa na wzrost oporów wewnętrznych co z kolei obniża współczynnik wydatku rys.6. b $\mu = 0.71$. W sytuacji kiedy nie zachowany jest wymagany stosunek l/d rys.6.a, współczynnik μ diametralnie spada i jest niższy niż dla otworu bez przystawki.

5. PRYZYSTAWKA STOŻKOWA.



Rys.7

Przy przepływie przez taką przystawkę strumień cieczy bardziej się rozszerza niż przy wypływie przez przystawkę cylindryczną. W tego rodzaju przystawkach przyjmuje się, że $\beta = 1$ (choć z rysunku wynika coś innego) czyli $\alpha = \mu$. W przewężeniu panuje podciśnienie, które można wyliczyć z r. Bernoulliego i równania ciągłości strugi :

$$\frac{c_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g}$$

$$c_0 f_0 = c_1 f_1$$

$$p_1 = p_b, \quad f_1 = f_0$$

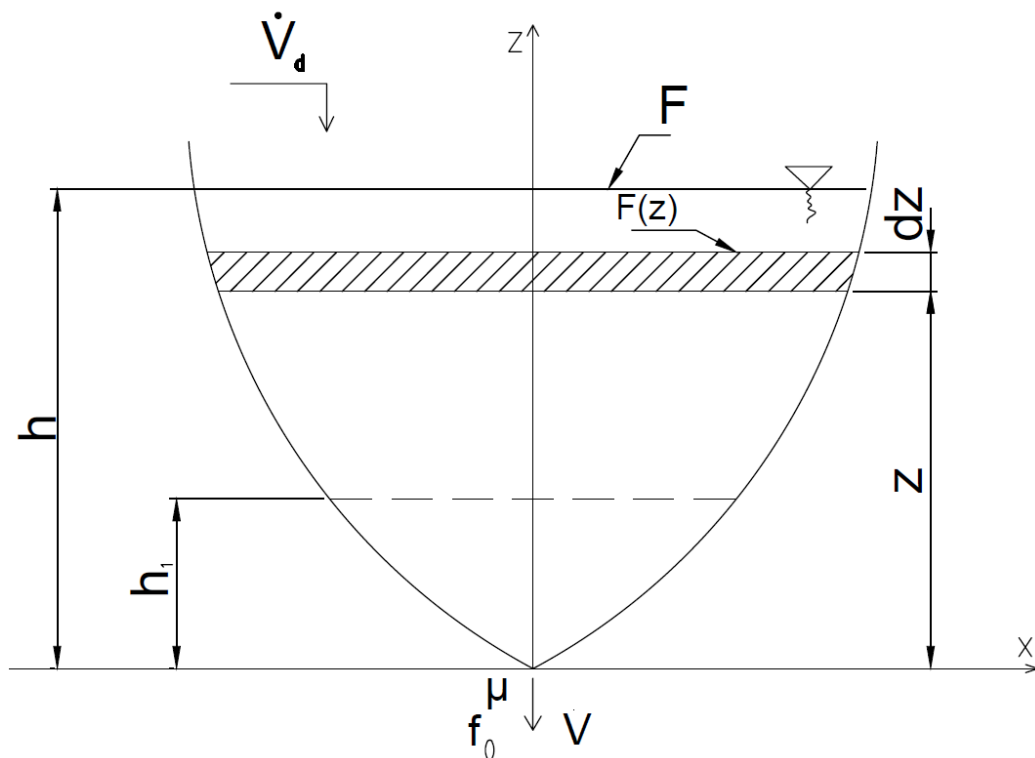
$$p_0 = p_b - \frac{\rho c_1^2}{2} \left[\left(\frac{f_1}{f_0} \right)^2 - 1 \right]$$

Ponieważ drugi wyraz prawej strony równania jest dodatni, to $p_0 < p_b$ a więc w przewężeniu strumienia panuje ciśnienie mniejsze od atmosferycznego. Gdy ciśnienie p_0

obniżyć się do ciśnienia wrzenia cieczy w danej temperaturze wówczas w obszarze przewężenia strumienia nastąpi burzliwe parowanie (wrzenie cieczy) i wytwarzanie się pęcherzyków wypełnionych parą. Pęcherzyki pary porywane są przez przepływającą ciecz i przenoszone do obszaru wyższego ciśnienia gdzie następuje gwałtowne skraplanie – implozja. Na miejsce „puste” napływa z dużą energią woda powodując lokalny wzrost ciśnienia nawet do 5000 bar.. Jeśli zanik bombła parowo gazowego ma miejsce w sąsiedztwie ścianki, woda z ogromną siłą uderza o nią, powodując nadzarcia w miejscach najmniej odpornych. Cały proces związany z powstawaniem i zanikiem bąbli parowo – gazowych (zamiarą fazową) nazywamy kawitacją. Kawitacja występuje najczęściej w pompach oraz turbinach wodnych na śrubach okrętowych w rurociągach itp.

Aby wypływający strumień cieczy przez przystawkę rozbieżną mógł wypełnić ją na całej długości, ustalono kąt rozwarcia $\Theta = 5^{\circ} - 7^{\circ}$.

6. CZAS OPRÓŻNIANIA ZBIORNIKA PRZEZ MAŁY OTWÓR.



Rys. 8. Nieustalony wypływ cieczy ze zbiornika

Rysunek 8 ilustruje ogólny przypadek nieustalonego wypływu cieczy ze zbiornika przez mały otwór przy jednoczesnym zasilaniu zbiornika na dopływie. Założenie, że $\dot{V}_d < \dot{V}$ prowadzi do następującego wywodu :

Jeżeli w chwili początkowej opróżniania zwierciadło cieczy znajdowało się na wysokości „ h ” nad otworem, to po upływie czasu t opadnie ono do wysokości „ z ”, pole jego powierzchni wyniesie $F(z)$, zaś prędkość wypływu będzie równa $\sqrt{2gz}$. A zatem w czasie dt przez otwór lub przez przystawkę wypłynie ciecz w ilości

$$\mu f_0 \sqrt{2gz} dt,$$

Zaś zwierciadło cieczy obniży się o dz .

Jeżeli więc natężenie zasilania wyniesie \dot{V}_d to w czasie „ dt ” ze zbiornika ubywa cieczy w ilości

$$\dot{V}_d dt - F(z) dz.$$

Bilans masowy przedstawia równanie

$$\dot{V}_d dt - F(z) dz = \mu f_0 \sqrt{2gz} dt.$$

Podczas opróżniania zbiornika między dowolnymi poziomami wysokość „ z ” zmienia się od „ h ” do „ h_1 ”. A zatem czas opróżniania części zbiornika oblicz się jako całkę

$$t_0 = \int_h^{h_1} \frac{F(z) dz}{\dot{V}_d - \mu f_0 \sqrt{2gz}}$$

W przypadku gdy nie ma zasilania zbiornika ($\dot{V}_d = 0$) oraz gdy przekrój zbiornika jest stały ($F = const$) wzór (6) przyjmuje postać :

$$t_0 = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{F}{f_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot (\sqrt{h} - \sqrt{h_1}) \quad (7)$$

gdzie :

F – powierzchnia swobodna zbiornika

f_0 – pole przekroju otworu

μ – współczynnik wydatku

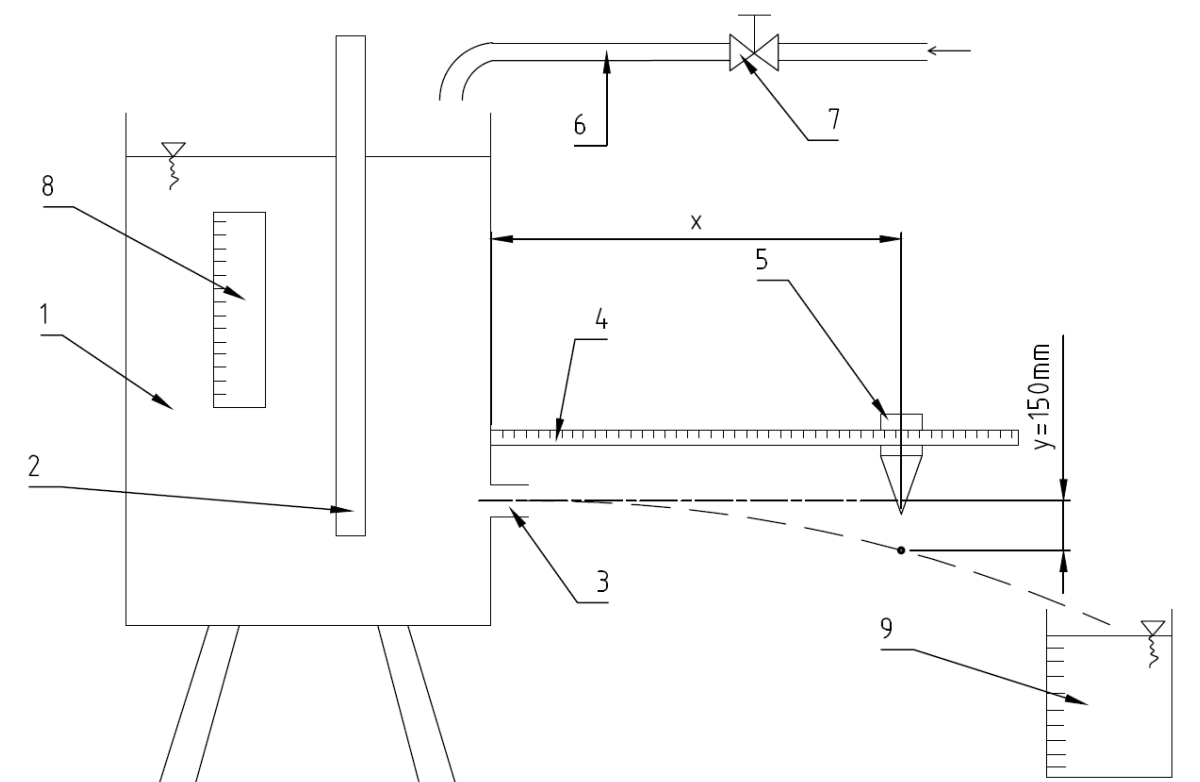
h – poziom początkowy (górne położenie zwierciadła)

h_1 – poziom końcowy (dolne położenie zwierciadła)

g – przyspieszenie ziemskie

7. PRZEBIEG ĆWICZENIA.

7.1 OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO.



Rys.9 STANOWISKO POMIAROWE – pomiar współrzędnych x i y .

Stanowisko składa się ze zbiornika (1) o prostokątnym przekroju poprzecznym z ruchomą przegrodą (2) służącą do ustalania przepływu cieczy. Wyływ odbywa się przez otwór lub przystawkę (3). Pozioma listwa (4) z naniesioną podziałką milimetrową oraz wskaźnik (5) pozwalają określić współrzędne odpowiedniego punktu strumienia. Woda doprowadzona jest do zbiornika przewodem (6) poprzez zawór regulacyjny (7). Wodowskaz służy do określenia poziomu wody w zbiorniku. Do wyznaczenia wydatku rzeczywistego należy użyć zlewki (9).

7.2 METODYKA OBLICZEŃ.

Współczynnik wydatku μ wyznaczamy na podstawie wzoru (5) i wynosi on:

$$\mu = \frac{\dot{V}_{rz}}{f_0 \sqrt{2gz}}$$

gdzie:

$$\dot{V}_{rz} = \frac{m}{t\rho}$$

m- masa wody

t – założony czas wypływu wody ze zbiornika,

ρ - gęstość wody

Współczynnik prędkości α określa się w oparciu o wzory :

$$x = c \cdot t = \alpha \sqrt{2gz} \cdot t \quad \text{oraz} \quad y = g \frac{t^2}{2} \rightarrow t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

stąd

$$x = \alpha \sqrt{2gz} \sqrt{\frac{2y}{g}} = 2\alpha \sqrt{yz}$$

ostatecznie

$$\alpha = \frac{x}{2\sqrt{yz}}$$

Mając wyznaczone α i μ , korzystając z równania (4a) należy obliczyć współczynnik kontrakcji β .

$$\beta = \frac{\mu}{\alpha}$$

Dla wyznaczenia czasu opróżniania zbiornika między wskazanymi poziomami ,należy: zamknąć dopływ wody i przy otwartym badanym otworze ,włączyć stoper przy górnym położeniu zwierciadła. Po osiągnięciu przez zwierciadło dolnego poziomu należy stoper zatrzymać i odczytać rzeczywisty czas opróżniania zbiornika t_{rz} . Teoretyczny czas opróżniania zbiornika między tymi samymi poziomami, należy obliczyć z zależności (7).

$$t_0 = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{F}{f_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot (\sqrt{h} - \sqrt{h_1})$$

7.3 METRODYKA POMIARÓW

Za pomocą przegrody (2) w zbiorniku (1) należy ustalić wskazany poziom, a następnie zaworem (7) włączyć dopływ wody . Po ustaleniu się poziomu wody w części pomiarowej zbiornika można odstąpić odpowiedni otwór lub przystawkę (3); przesuwając wskaźnik (5) po listwie (4) do punktu w którym włos wskaźnika przecnie oś wypływającego strumienia odczytuje się wartość współrzędnej „ x ” (współrzędna „y” ma wartość stałą równą 150 mm) .

- wydatek rzeczywisty \dot{V}_{rz} wyznacza się metodą objętościową, przy pomocy naczynia i stopera .

- dla wyznaczenia czasu opróżniania zbiornika między obranymi poziomami należy zamknąć dopływ wody przy górnym położeniu zwierciadła cieczy i jednocześnie włączyć stoper . Po osiągnięciu dolnego obranego poziomu należy zatrzymać stoper i odczytać rzeczywisty czas opróżniania zbiornika t_{rz} .

- błąd względny określenia czasu opróżniania zbiornika należy wyznaczyć przy pomocy wzoru :

$$\varepsilon = \frac{|t_0 - t_{rz}|}{t_0} \cdot 100 [\%]$$

W sprawozdaniu należy zamieścić dwie tabele - pomiarową oraz tabelę z wartościami obliczonymi wg. wzoru. W tabeli pomiarowej podano dane, potrzebne do wykonania ćwiczenia.

Przykład.

Obliczyć wartości współczynników α , β i μ dla otworu wykonanego w dnie zbiornika, przez który wypłynęło 10l wody, w czasie $t = 32 s$. Wysokość napełnienia zbiornika wynosiła $H = 2 m$, średnica otworu $d_o = 10 mm$ a struga uległa przewężeniu do $d_s = 8 mm$.

L.p.	Wielkości dane i zmierzone						Wielkości obliczone			
	F	f ₀	μ	h	h ₁	t _{rz}	h	h ₁	t	ε
	m ²	m ²	-	mm	mm	s	m	m	s	-
1	0,113									
2										
3										

Typ otworu Lub przystawki						średnica otworu d_0 6 [mm]						
						przekrój otworu f_0[mm ²]						
L.p.	Wielkości zmierzone					Wielkości obliczone						
	x	y	z	V	t	\dot{V}	x	y	z	α	β	μ
	mm	mm	mm	dm ³	S	m ³ /s	m	m	m	-	-	-
1		150										
2												
3												
								średnio:				

Opracował : **Wojciech Knapczyk**

Literatura:

1. Instrukcja – Badanie wypływu cieczy ze zbiornika. Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych A G H.
2. Troskoleński A.T. Hydromechanika Techniczna.
3. Walden H. Mechanika Cieczy i Gazów.

Zagadnienia

- Otwór mały, otwór swobodny, wypływ ustalony.
- Rzeczywista prędkość wypływu, wydajność rzeczywista.
- Kontrakcja strugi: co ją powoduje, jak ją określamy, od czego zależy oraz ile wynosi.
- Przystawki: rodzaje , zasada działania, wymiary.
- Przystawki stożkowe – zjawisko kawitacji.
- Metodyka obliczeń współczynników α, β i μ .