

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

89

WARSZAWA - POZNAŃ 1989

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA — EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY — CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1989

Printed in Poland

ISBN 83-01-07072-2
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300+90 egz. Ark. wyd. 13,25. Ark. druk. 10,5. Papier offsetowy kl. IV, 71g.

B-1. Oddano do składania w kwietniu 1987 r. Podpisano do druku w marcu 1989 r.

Druk ukończono w grudniu 1989 r. Zam. 90/89 K-8/66

SKŁAD WYKONANO W ZAKŁADACH GRAFICZNYCH im. KEN W BYDGOSZCZY
DRUK ZAKŁAD POLIGRAFII WSP W ZIELONEJ GÓRZE

JÓZEF ŚMIGIELSKI

Gdańsk

Charakterystyka hydrodynamiczna elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*

W pracy wyprowadzono zależność siły hydrodynamicznej działającej na pływak przepływomierza elektromagnetycznego oraz spadku ciśnienia od natężenia przepływu. Ustalono również wielkość poprawek związanych z przepływem na zewnątrz pływaka oraz siłę wywołaną lepkością.

Przedstawiono wyniki pomiarów sił i straty ciśnienia, które weryfikują zależności ustalone teoretycznie, potwierdzając dopuszczalność poczynionych założeń upraszczających.

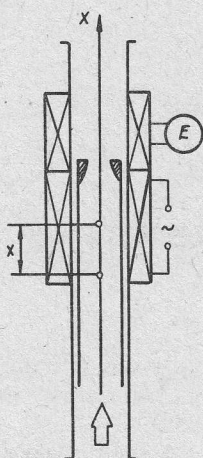
Rezultaty mogą być wykorzystane przy projektowaniu przepływomierzy elektromagnetycznych oraz innych urządzeń przepływowych o podobnej konfiguracji.

Wprowadzenie

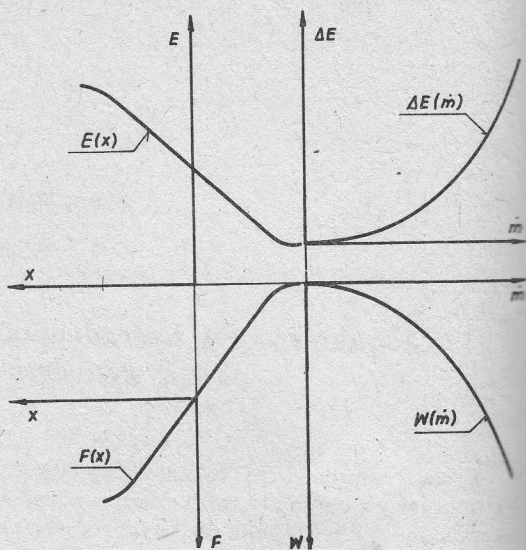
W elektromagnetycznym przepływomierzu pływakowym zasadniczy element stanowi zwężka pomiarowa w kołpaku pływaka, wykonanego w formie cienkościennej rurki z materiału ferromagnetycznego, zawieszonego w polu magnetycznym cewki (rys. 1). W czasie przepływu czynnika na zwężkę działa siła hydrodynamiczna W , która powoduje przemieszczenie pływaka do położenia, w którym wszystkie działające siły: hydrodynamiczna W , magnetyczna F i ciężkości G pozostają w równowadze [1]. Pływak stanowi rdzeń sprzęgający indukcyjnie uzwojenie zasilane prądem zmiennym, wytwarzające pole magnetyczne, z drugim uzwojeniem, w którym indukuje się siła elektromotoryczna E , zależna od położenia rdzenia, a zarazem stanowiąca miarę natężenia przepływu $\dot{m}$ ośrodka. Charakterystyka wyjściowa $\Delta E(\dot{m})$ przepływomierza wynika z nakładania się charakterystyk składowych: hydrodynamicznej $W(\dot{m})$, magnetycznej $F(x)$ i elektrycznej $E(x)$, przy czym x oznacza współrzędną położenia środka pływaka względem środka cewki wytwarzającej pole magnetyczne, a ΔE indukowaną siłę elektromotoryczną pomniejszoną o wartość początkową E_0 , odpowiadającą zerowemu natężeniu przepływu. Charakterystyki składowe i charakterystykę wyjściową przedstawia rysunek 2.

Charakterystyka hydrodynamiczna $W(\dot{m})$ wpływa w decydujący sposób na kształt charakterystyki wyjściowej przepływomierza $\Delta E(\dot{m})$. Znajomość jej ma więc istotne znaczenie przy doborze optymalnych proporcji, przewidywaniu zakresu pomiarowe-

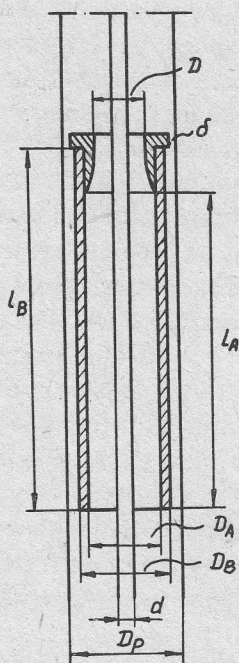
* Praca wykonana w ramach planu C1 (badania własne placówki).



Rys. 1. Pływakowy przepływomierz elektromagnetyczny



Rys. 2. Charakterystyki składowe i charakterystyka wyjściowa przepływomierza elektromagnetycznego



Rys. 3. Najważniejsze wymiary pływaka i kanału przepływowego

go projektowanego przepływomierza oraz dla analizy wpływu zmian warunków jego pracy (rodzaju przepływającego ośrodka i jego parametrów).

Na rysunku 3 przedstawiono kanał przepływowy w przepływomierzu utworzony przez przewód pomiarowy i znajdujący się wewnątrz pływak z kołpakiem oraz przyjęte oznaczenia najważniejszych wymiarów. Ze względu na możliwość stosowania odpowiednio ukształtowanego rdzenia zapewniającego linearyzację charakterystyki wyjściowej [1], oprócz zasadniczej konfiguracji kanału przepływowego rozważono jego wersję zmodyfikowaną z centralnym rdzeniem cylindrycznym o różnych średnicach, zmniejszającym efektywny przekrój przelotowy, który staje się pierścieniowym.

W rozpatrywanym układzie pływak spełnia funkcję ruchomej zwężki, a działająca na niego siła hydrodynamiczna W powstaje jako wypadkowa sumowania się sił składowych związanych ze zmianami przekrojów strumienia, a tym samym prędkości i ciśnień oraz sił stycznych wywołanych lepkością czynnika. Rozpatrywana konfiguracja kanału, zwłaszcza wobec nagłych zmian przekrojów, jest zbyt złożona na to, aby można wyznaczyć siłę działającą na pływak w sposób ścisły. Można natomiast określić ją w sposób przybliżony, przyjmując pewne założenia upraszczające i posługując się wynikami badań doświadczalnych odpowiednich przypadków prostszych, podawanymi w literaturze [2].

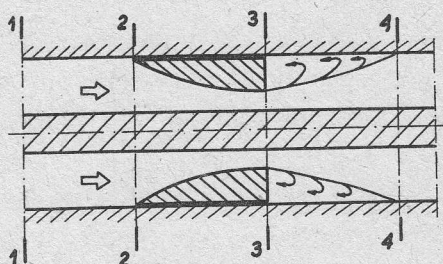
Zależności wyjściowe

Zasadniczy wpływ na powstającą siłę hydrodynamiczną W ma przepływ przez dyszę w kołpaku pływaka. Przyjmując założenia:

- jednowymiarowości przepływu,
- nieściśliwości ośrodka (co jest uzasadnione w przypadku gazów przy niezbyt wielkich zmianach prędkości),
- pomijalnego wpływu lepkości

oraz model przedstawiony na rysunku 4 (w którym pominięto wpływ szczeliny zewnętrznej), można pomiędzy przekrojem 2—3* zastosować następujące równania: zachowania masy

$$\rho u_2 A_2 = \rho u_3 A_3 = \dot{m}, \quad (1)$$



Rys. 4. Przyjęty podstawowy model obliczeniowy przepływomierza

* Numerację przekrojów przyjęto w taki sposób, aby nie powodować rozbieżności z rozpatrywanym w dalszych wywodach modelem uściślonym.

zachowania pędu

$$p_2 A_2 - p_3 A_3 - P = \dot{m}(u_3 - u_2), \quad (2)$$

zachowania energii

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \varrho (u_3^2 - u_2^2), \quad (3)$$

gdzie ϱ — gęstość czynnika, p — ciśnienie, u — prędkość przepływu, $\dot{m}$ — natężenie przepływu masy, P — składowa osiowa siły z jaką dysza działa na czynnik, A — przekrój kanału.

Siłę hydrodynamiczną W działającą na dyszę określa równanie

$$W = P - p_3(A_2 - A_3). \quad (4)$$

Po dokonaniu prostych przekształceń równań (1) ÷ (4) dochodzi się do zależności

$$W = \frac{\dot{m}^2}{2\varrho A_2} \left(\frac{A_2}{A_3} - 1 \right)^2. \quad (5)$$

Spadek ciśnienia Δp w dyszy wynika z równań (1) i (3) i określa go relacja

$$\Delta p = p_2 - p_3 = \frac{\dot{m}^2}{2\varrho A_2^2} \left[\left(\frac{A_2}{A_3} \right)^2 - 1 \right]. \quad (6)$$

Strata ciśnienia spowodowana przez dyszę jest mniejsza niż to wynika z (6), gdyż część energii kinetycznej strumienia jest odzyskiwana w pewnej odległości za dyszą (w przekroju 3 na rys. 4), co pociąga za sobą przyrost ciśnienia.

Stosując równanie zachowania pędu do płynu pomiędzy przekrojami 3–4, w odległości umożliwiającej ustalenie się warunków (wypełnienie przekroju kanału), można dla przepływu jednowymiarowego czynnika nieściśliwego napisać zależność

$$p_4 - p_3 = \varrho u_4(u_3 - u_4). \quad (7)$$

Po uwzględnieniu równania ciągłości (1) zależność (7) przybiera postać

$$p_4 - p_3 = \frac{\dot{m}^2}{\varrho A_4^2} \left(\frac{A_4}{A_3} - 1 \right), \quad (8)$$

przy czym w rozpatrywanym modelu (rys. 4)

$$A_4 = A_2, \quad (9)$$

natomiast A_3 oznacza efektywny przekrój otworu dyszy.

Stratę ciśnienia określa relacja

$$\Delta p_{\text{str}} = \Delta p - (p_4 - p_3), \quad (10)$$

która po podstawieniu (6) i (7) wyraża się w postaci

$$\Delta p_{\text{str}} = \frac{\dot{m}^2}{2\varrho A_2^2} \left(\frac{A_2}{A_3} - 1 \right)^2. \quad (11)$$

Uwzględniając ten związek i biorąc pod uwagę (5) dochodzi się do prostej formuły

$$\frac{W}{\Delta p_{\text{str}}} = A_2. \quad (12)$$

W rozpatrywanym modelu kanału o przekroju kołowym (rys. 4), przekroje A można wyznaczyć z relacji

$$A_2 = A_4 = \frac{\pi}{4}(D_p^2 - d^2), \quad (13)$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2). \quad (14)$$

Biorąc pod uwagę rzeczywisty kształt kanału przepływowego (rys. 3), zwłaszcza gdy wzrasta średnica d rdzenia, trzeba liczyć się z pogarszaniem się zgodności przyjętego modelu z rzeczywistością ze względu na:

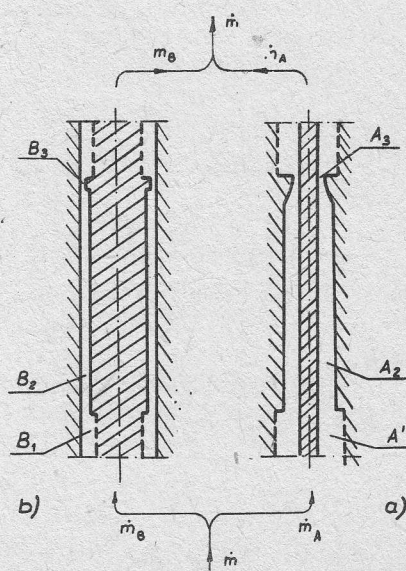
- wpływ lepkości, objawiający się działaniem naprężeń τ stycznych do powierzchni pływaka i powodujących dodatkowo spadek ciśnienia,
- rozgałęzianie się strumienia czynnika, którego część przepływa na zewnątrz, a jego udział wzrasta przy zmniejszaniu się efektywnego przekroju dyszy pomiarowej.

Model jednowymiarowy dwustrefowy

Rozpatrywany przypadek można rozłożyć na przypadki prostsze, co uwidacznia rysunek 5. Strumień masy $\dot{m}$ rozdziela się na dwie części: wewnętrzną $\dot{m}_A$ i zewnętrzną $\dot{m}_B$, przy czym

$$\dot{m} = \dot{m}_A + \dot{m}_B. \quad (15)$$

Z porównania sumy spadków ciśnienia w obu odgałęzieniach — zewnętrznym



Rys. 5. Wyróżnione w przepływomierzu proste przypadki przewężeń kanału i oznaczenia przekrojów

wewnętrzny (rys. 5) — wynika równanie:

$$(\Delta p)_A + (\Delta p_\mu)_A = (\Delta p)_B + (\Delta p_\mu)_B \quad (16)$$

przy oznaczeniach: Δp — spadki ciśnienia spowodowane zmianami przekrojów, Δp_μ — spadki ciśnienia spowodowane lepkością. Spadki ciśnienia wywołane lepkością i wzrostem energii kinetycznej związanym z formowaniem się paraboloidalnego rozkładu prędkości przy przepływie laminarnym w wąskich kanałach określa formuła [1]

$$\Delta p_\mu = a \frac{\dot{m} l}{\varrho \delta^3} + b \left(\frac{\dot{m}}{\varrho \delta} \right)^2, \quad (17)$$

przy oznaczeniach

$$a = \frac{12\mu}{\pi D}, \quad (18)$$

$$b = \frac{0,8\varrho}{\pi^2 D^2}. \quad (19)$$

W relacjach tych oznaczono: l — długość kanału, δ — szerokość kanału, D — średnicę zewnętrzną kanału, μ — współczynnik lepkości.

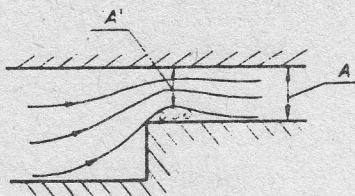
Relację (17) można też wyrazić w formie

$$\Delta p_\mu = \frac{12\mu l}{\varrho \delta^2 A} \dot{m} + \frac{0,8}{\varrho A^2} \dot{m}^2, \quad (20)$$

gdzie A jest to przekrój szczeliny ($A \cong \pi D \delta$).

Strumień przepływający przez kanał z przewężeniem przy skokowo zmniejszającym się przekroju podlega kontrakcji (rys. 6). Współczynnik kontrakcji α wyraża stosunek przekroju przewężonego do pełnego

$$\alpha = \frac{A'}{A}. \quad (21)$$



Rys. 6. Powstawanie kontrakcji strumienia w przewężeniu

W obszarze kontrakcji powstają zaburzenia powodujące stratę ciśnienia, którą określa ogólne wyrażenie [2]

$$\Delta p_{\text{str}} = \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \frac{1}{2\varrho} \frac{\dot{m}^2}{A^2}. \quad (22)$$

Całkowity spadek ciśnienia przy przepływie przez kanał wewnętrzny z przewężeniami

przedstawiony na rysunku 5a, określa zależność

$$\Delta p_A = p_1 - p_3 = \frac{\dot{m}_A^2}{2\rho A_3^2} \left[1 - \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Podobnie można ustalić spadek ciśnienia dla kanału zewnętrznego, przedstawionego na rysunku 5b, który odwzorowuje następstwo przekrojów na zewnątrz pływaka przepływomierza (rys. 3). Określa go zależność

$$\Delta p_B = p_1 - p_3 = \frac{\dot{m}_B^2}{2\rho B_3^2} \left[1 - \left(\frac{B_3}{B_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \left(\frac{B_3}{B_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \right]. \quad (24)$$

Dla odróżnienia przekrój zewnętrzny kanału oznaczono literą B . Uwzględniając (16) i (17) dochodzi się ostatecznie do zależności

$$\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} - 1 \right)^2 = \left(\frac{B_3}{A_3} \right)^2 \frac{1 - \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 + \frac{2\rho A_3^2}{\dot{m}_A^2} (\Delta p_\mu)_A}{1 - \left(\frac{B_3}{B_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \left(\frac{B_3}{B_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 + \frac{2\rho B_3^2}{\dot{m}_B^2} (\Delta p_\mu)_B}. \quad (25)$$

Równanie to ma charakter przybliżony, gdyż:

- pominięto stratę ciśnienia, spowodowaną lepkością w kanale pomiędzy przekrojami B_2 i B_3 , ze względu na małą długość,
- przyjęto, że ciśnienie p_1 w przekroju A_1 i B_1 na wlocie do przewężenia jest takie samo, jak w większej odległości ze względu na małe, wchodzące w grę zmiany prędkości, przy niewielkiej grubości ścianki pływaka (rys. 5),
- pominięto stratę spowodowaną lepkością i możliwość występowania kontrakcji w przewężeniu o ciągłej zmianie przekrojów od A_2 do A_3 (rys. 5),
- przyjęto równomierny rozkład prędkości w przekrojach początkowych A_1 i B_1 ($u_{A_1} = u_{B_1}$).

Biorąc pod uwagę wartości i proporcje odnoszące się do rozpatrywanego przepływomierza oraz przypadek, gdy przekrój B_3 jest porównywalny co do wielkości z przekrojem A_3 i zanedbując składniki osiągające pomijalne wartości w stosunku do innych, można równanie (25) sprowadzić do postaci przybliżonej

$$\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} - 1 \right)^2 \cong \left(\frac{B_3}{A_3} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 - \left(\frac{B_3}{B_1} \right)^2 \right]^{-2}. \quad (26)$$

Przekrój B_1 nie jest dany bezpośrednio, ale przy założeniu równomiernego rozkładu prędkości przepływu w przekroju początkowym A_0 określonym równaniem (13) oraz biorąc pod uwagę zależność

$$A_0 = A_1 + B_1 \quad (27)$$

równanie ciągłości, można trzeci składnik w nawiasie kwadratowym równania (26) wyrazić w postaci

$$\left(\frac{B_3}{B_1} \right)^2 = \left(\frac{B_3}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}} \right)^{-2}. \quad (28)$$

Podstawiając to wyrażenie do równania (26) dochodzi się po prostych przekształceniach do zależności kwadratowej

$$\left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}}\right)^2 \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \right] - \left(\frac{B_3}{A_3} \right)^2 \right\} - 2 \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}} \right) \left[1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \right] + \left[1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 - \left(\frac{B_3}{A_0} \right)^2 \right] = 0. \quad (29)$$

W równaniach (23), (24) i (25) nie rozróżniono współczynników kontrakcji α dla różnych przekrojów, gdyż w literaturze [2] podawane są jedynie wartości orientacyjne, niezależnie od stosunku przekrojów. Dla przekrojów zmieniających się skokowo z ostrymi krawędziami przyjmuje się [2]

$$\alpha = 0,61 - 0,64. \quad (30)$$

Takie wartości α odpowiadają według [3] stosunkowi przekrojów zawierającemu się w przedziale $0 \leq A'/A \leq 0,3$. W [4] podano zależność współczynnika kontrakcji α od liczby Reynoldsa. Zależność (29) ma charakter przybliżony, ale pozwala oszacować zmniejszanie się natężenia przepływu wewnątrz pływak $\dot{m}_A$ w stosunku do globalnego natężenia przepływu $\dot{m}$, wskutek przepływu zewnętrznego $\dot{m}_B$.

Wartość siły hydrodynamicznej W działającej na pływak obliczona z (5) z uwzględnieniem skorygowanego natężenia przepływu $\dot{m}_A < \dot{m}$ stanowi drugie przybliżenie. Dalsze uściślenie wymagałoby uwzględnienia wpływu różnych wartości ciśnień działających na poszczególne powierzchnie czołowe pływaka o zmieniających się przekrojach, a także dodatkowej siły ΔW spowodowanej naprężeniem stycznym τ_0 działającym na ścianki pływaka.

Opis dwuwymiarowy

Na krótkim odcinku przewodu, jaki stanowi pływak przepływomierza, rozkład prędkości w przekroju poprzecznym jest prawie równomierny, a siły oporu ujawniają się tylko w cienkiej warstwie przyściennej. Naprężenie styczne na ścianie określa zależność

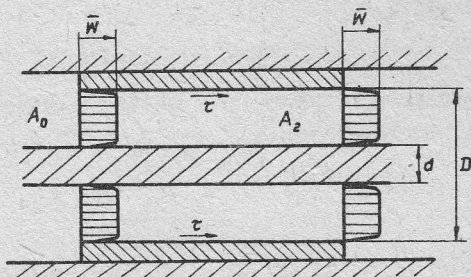
$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_0, \quad (31)$$

przy oznaczeniach: y — odległość od ścianki, $(du/dy)_0$ — gradient normalny prędkości na ścianie.

Siłę tarcia działającą na ścianie odcinka przewodu o średnicy D i długości l można wyznaczyć z zależności

$$\Delta W = \pi D \mu \int_0^l \left(\frac{du}{dy} \right)_0 dx. \quad (32)$$

Dla prostego przewodu o stałym przekroju i przepływu bez gradientu ciśnienia, wobec braku lepszych możliwości, uzasadnione jest przyjęcie rozkładu prędkości w warstwie przyściennej takiego, jaki został ustalony dla płaskiej płytki.



Rys. 7. Schemat obrazujący działanie na pływak siły wywołanej napięciami stycznymi

Za najbardziej wiarygodne dane można uznać wyniki analizy Blasiusa uściślone przez Howartha [5], odnoszące się do przepływu laminarnego, nieściśliwego i zweryfikowane eksperymentalnie. Na ich podstawie można dla gradientu normalnego prędkości na ścianie płytki ustalić zależność

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_0 = 0,332\bar{u} \sqrt{\frac{\bar{u}\rho}{\mu x}}, \quad (33)$$

gdzie x — odległość od krawędzi płytki.

Biorąc ją pod uwagę można siłę działającą na ściankę przewodu wyrazić w postaci relacji [6]

$$\Delta W = 2\pi c\mu D\bar{u} \frac{(l/D)^{1/2}}{(1-d/D)^{1/2}} Re_{D_h}^{1/2}, \quad (34)$$

gdzie Re_{D_h} oznacza liczbę Reynoldsa odniesioną do średnicy hydraulicznej przewodu, a c — stały współczynnik występujący w równaniu (33).

Uwzględniając zależność

$$\bar{u} = \frac{\dot{m}}{\rho A}, \quad (35)$$

gdzie $\dot{m}$ — masowe natężenie przepływu, A — przekrój przewodu, oraz sprowadzając (34) do postaci bezwymiarowej, dochodzi się do relacji

$$\frac{\rho D \Delta W}{\mu \dot{m}} = \frac{8c}{1-(d/D)^2} \frac{(l/D)^{1/2}}{(1-d/D)^{1/2}} Re_{D_h}^{1/2}. \quad (36)$$

Z warunku równowagi sił działających na element płynu można określić spadek ciśnienia Δp_μ spowodowany lepkością. Określa go wyrażenie, które po sprowadzeniu do postaci bezwymiarowej przybiera postać

$$\frac{\Delta p_\mu}{\rho \bar{u}^2} = 8c \left(\frac{l/D}{1-d/D} \right)^{1/2} \cdot Re_{D_h}^{-1/2}. \quad (37)$$

Założenie przepływu laminarnego przy ścianie przewodu jest uzasadnione, gdyż na krótkim początkowym odcinku warstwa przyścienna ma zawsze taki charakter ze względu na bardzo dużą wartość oporów spowodowanych lepkością, niezależnie od stopnia turbulencji poza tym obszarem [3]. Dopiero po przekroczeniu krytycznej wartości liczby Reynoldsa (odniesionej do odległości x od krawędzi), która dla płytki

wynosi

$$(Re_x)_{kr} = 3 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^5, \quad (38)$$

warstwa przyścienna zmienia charakter na turbulentny. Odpowiada to długości od-cinka przewodu

$$l/D = (1 - d/D)^{-1} \frac{(Re_x)_{kr}}{Re_{D_h}}. \quad (39)$$

Stosunek siły dodatkowej spowodowanej lepkością ΔW od siły W wynikającej ze spadku ciśnienia w przewężeniu pływaka (5) określa zależność

$$\frac{\Delta W}{W} \cong 16c(l/D)^{1/2} [(D/d)^2 - 1]^{-2} Re_D^{-1/2}. \quad (40)$$

Nie uwzględnia ona obecności rdzenia centralnego i przyjęto w niej oznaczenia: D — średnica przewodu, d — średnica dyszy w pływaku, pomijając różnicę średnic pływaka i przewodu, wskutek czego ma ona charakter przybliżony.

Dla układów podobnych geometrycznie i różnych czynników, np. powietrza i wody, stosunek sił (40) określa relacja

$$\frac{(\Delta W/W)_p}{(\Delta W/W)_w} = \left[\frac{(Re_D)_w}{(Re_D)_p} \right]^{1/2}. \quad (41)$$

Po uwzględnieniu (18) oraz warunku

$$\frac{(\dot{m}_{\max})_w}{(\dot{m}_{\max})_p} = \left(\frac{\varrho_w}{\varrho_p} \right)^{1/2}, \quad (42)$$

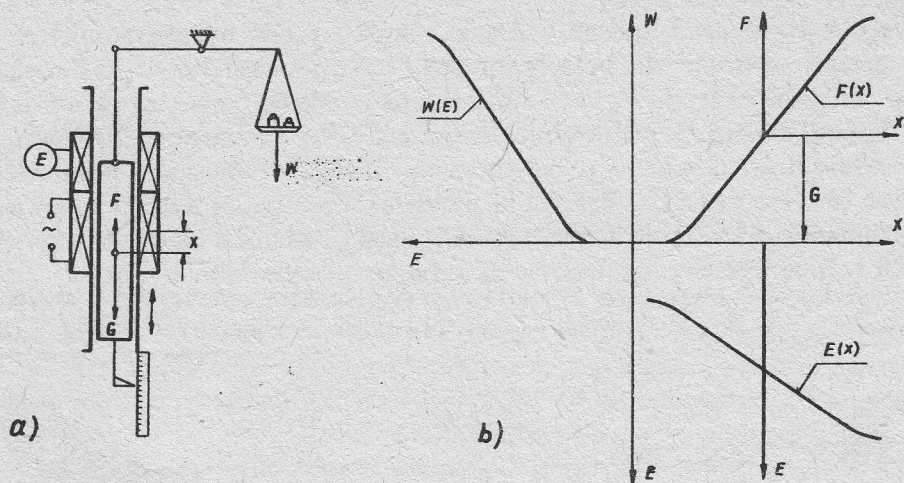
wynikającego z równości maksymalnych wartości sił hydrodynamicznych działających na pływak, zależność (41) przybiera postać

$$\frac{(\Delta W/W)_p}{(\Delta W/W)_w} = \left(\frac{\varrho_w}{\varrho_p} \right)^{1/4} \left(\frac{\mu_p}{\mu_w} \right)^{1/2}. \quad (43)$$

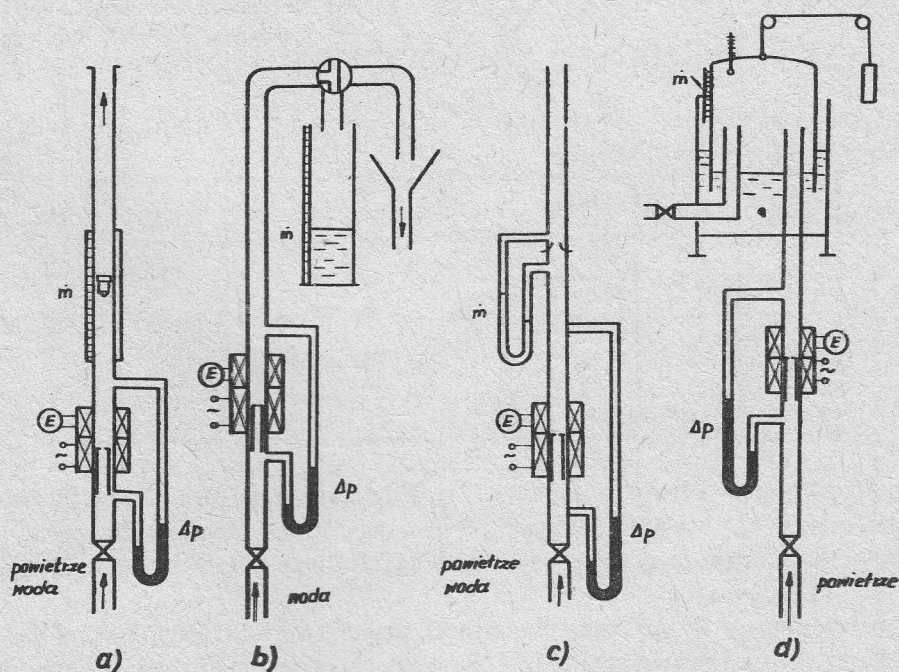
Badania doświadczalne

Siła magnetyczna działająca na pływak zależy jednoznacznie od jego położenia x względem cewki (rys. 1), które z kolei determinuje wartość siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu pomiarowym. Można więc, posługując się wagą i supor-tem przesuwym ze skalą (rys. 8a), wyznaczyć zależność siły W wywieranej na pływak od indukowanej siły elektromotorycznej E ($W = W(E)$, rys. 8b).

Instalując tak wyskalowany przepływomierz w układzie umożliwiającym kontrolę natężenia przepływu $\dot{m}$ cieczy albo gazu można ustalić zależność siły hydrodynamicznej W od wydatku $W = W(\dot{m})$. Na rysunku 9a, b, c, d przedstawiono 4 warianty użytej do tego celu instalacji pomiarowej z dzwonem wodnym (dla gazów), pomiarem objętościowym (dla cieczy) oraz z wyskalowanym rotametrem, a także ze zwężką (dla cieczy albo gazów).

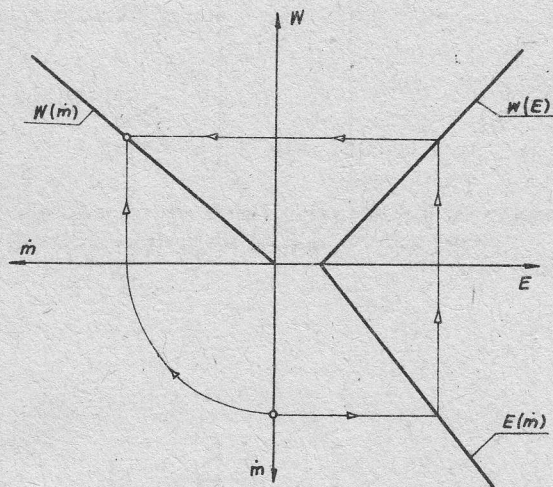


Rys. 8. a) Układ pomiarowy do wyznaczania zależności siły W działającej na pływak od jego położenia.
b) Sposób wyznaczania zależności indukowanej siły elektromotorycznej E od siły hydrodynamicznej W wywieranej na pływak



Rys. 9. Zastosowane układy pomiarowe do wyznaczania charakterystyki hydrodynamicznej przepływomierza i straty ciśnienia

Rysunek 10 wyjaśnia sposób ustalenia charakterystyki hydrodynamicznej. Pomiary przeprowadzono* dla przepływomierzy elektromagnetycznych o dwóch różnych średnicach przewodu $D_p = 10$ mm i $D_p = 16$ mm, dla powietrza (w warunkach normalnych) i dla cieczy, przy stałych średnicach dyszy pomiarowej, które wynosiły odpowiednio $D = 6$ mm i $D = 10$ mm, oraz przy różnych średnicach d rdzeni zmniejszających efektywny przekrój dyszy. Luz promieniowy δ (rys. 3) wynosił odpowiednio $\delta = 0,05$ mm i $\delta = 0,25$ mm. Najważniejsze wymiary badanych obiektów zestawiono w tabeli 1. Inne wymiary, zaznaczone na rysunku 3, zestawiono w tabeli 2.



Rys. 10. Sposób wyznaczania zależności siły hydrodynamicznej W od natężenia przepływu

Tabela 1

D_p [mm]	D [mm]	Ośrodek	d [mm]	δ [mm]
10	6	woda	0 2,2 3,0 3,9 4,6	0,05
		powietrze		
16	10	woda	0 3,0 5,0 6,9 9,0	0,25*
		powietrze		
Uwaga: * dla $D_p = 16$ mm i wody także $\delta = 0,05$ mm				

Wyniki pomiarów siły hydrodynamicznej W działającej na pływak przedstawiono na rysunku 11 w funkcji natężenia przepływu masy $\dot{m}$ przykładowo dla jednej serii pomiarów. W układzie ze skalą $\dot{m}^2$ na osi odciętych punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostych.

Wyniki pomiarów W uzyskane dla różnych czynników i wymiarów w funkcji wyrażenia stanowiącego prawą stronę równania (5), zgodnie z oczekiwaniem, skupiają się wzdłuż prostej. Uzyskany rezultat obrazuje rysunek 12a, b. Zaznaczono na nim

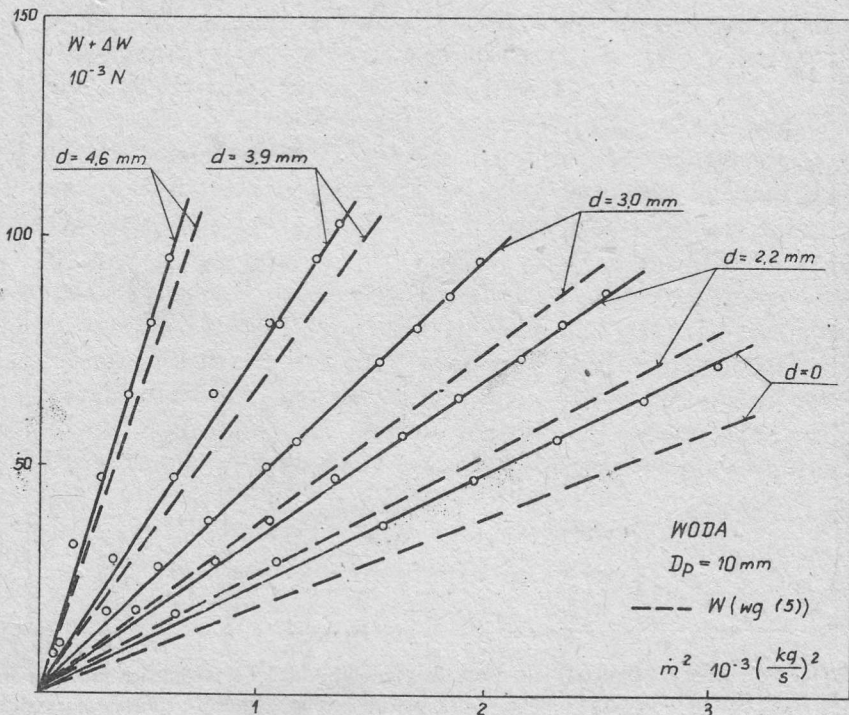
* Pomiary zostały wykonane przez dr inż. S. Ginala.

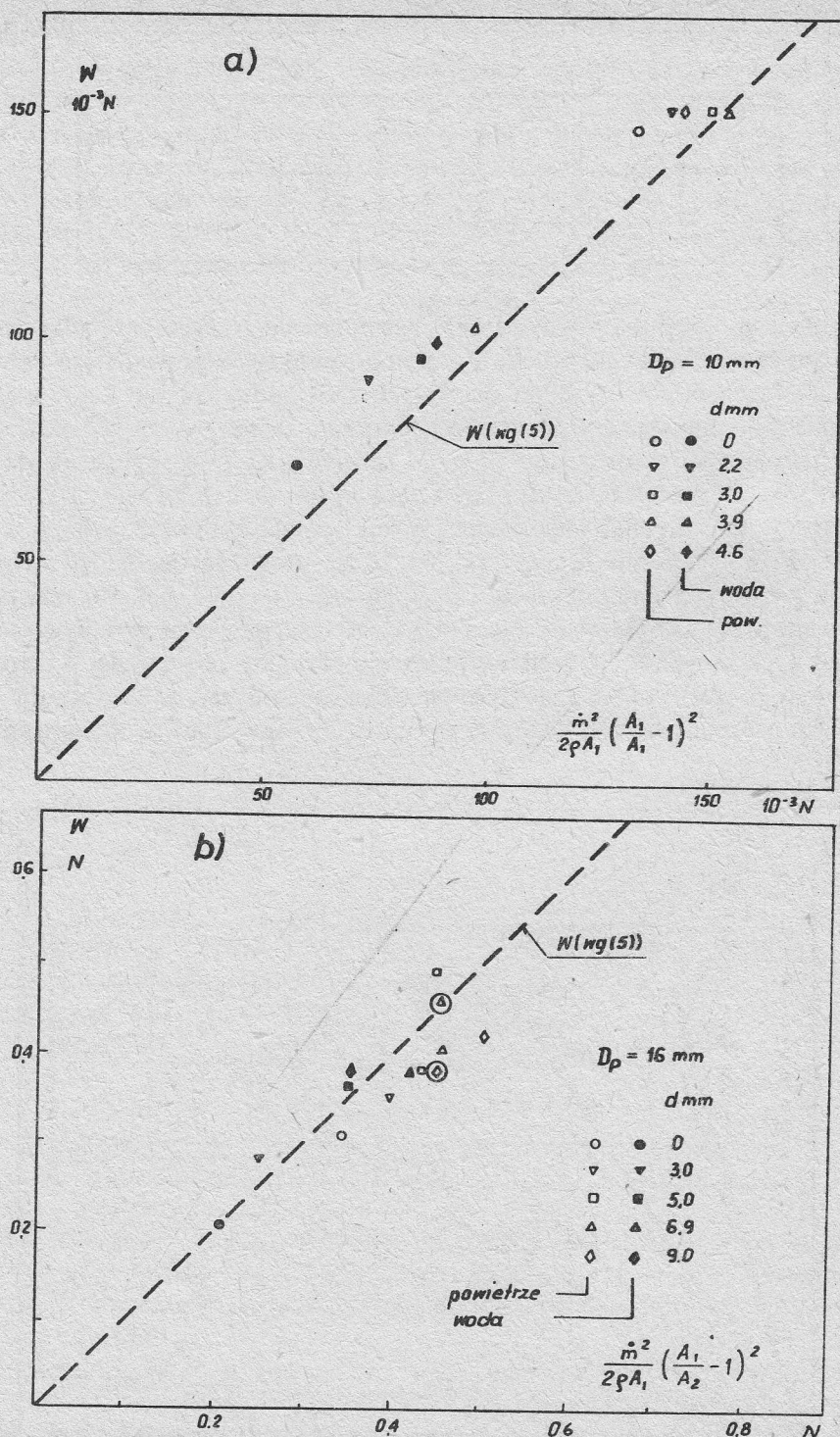
Tabela 2

D_p	D_A	D_B	D	δ	L_B	L_A
10	8,6	9,4	6	0,05	50	46
16	13	14,4	10	0,25 0,05	80	74

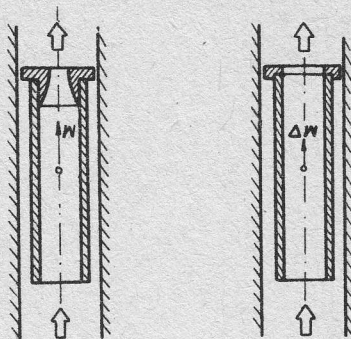
Uwaga: wymiary w mm

linię teoretyczną określoną równaniem (5), natomiast poszczególnym badanym przypadkom przyporządkowano jedynie pojedyncze punkty, odpowiadające liniom na rysunku 11 (i ich odpowiednikom dla innych serii pomiarowych) i odnoszące się do osiągniętych maksymalnych wartości natężenia przepływu $\dot{m}$. Ze względu na znacznie różniące się wartości siły W , które zmieniają się proporcjonalnie do 3-ciej potęgi współczynnika skali, wyniki odnoszące się do dwóch badanych średnic D_p przedstawiono na odrębnych wykresach. Wyniki pomiarów przedstawiono w układzie o współrzędnej zredukowanej (rys. 12a, b) nie uwzględniając wpływu lepkości. Położenie punktów pomiarowych dla $D_p = 16$ mm i $d = 5,0, 6,9, 9,0$ mm zostało skorygowane przez uwzględnienie rzeczywistej wartości natężenia przepływu $\dot{m}$ przez dyszę. Dla tych przypadków wielkość przekroju szczeliny zewnętrznej o szerokości $\delta = 0,25$ była porównywalna z efektywnym przekrojem dyszy, co powodowało znaczący udział natężenia przepływu $\dot{m}_B$ na zewnątrz pływaka. Wartość $\dot{m}_A/\dot{m}$ wyznaczono

Rys. 11. Wyniki pomiarów siły hydrodynamicznej W uzyskane w jednej z serii badań



Rys. 12. Wyniki pomiarów siły hydrodynamicznej dla przepływomierzy o średnicach przewodu a) $D_p = 10 \text{ mm}$ i b) $D_p = 16 \text{ mm}$ oraz dla powietrza i wody przedstawione w funkcji współrzędnej zredukowanej



Rys. 13. Konfiguracje przepływomierza zastosowane przy pomiarze siły hydrodynamicznej W oraz siły składowej ΔW wywołanej wpływem lepkości (nie uwidoczniiono rdzenia centralnego)

no na podstawie zależności (29). W celu eksperymentalnego sprawdzenia słuszności przewidywań przeprowadzono pomiar siły hydrodynamicznej W w powietrzu dla średnicy przewodu $D_p = 16$ mm z rdzeniem o średnicy $d = 9$ mm i $d = 6,9$ mm dla kołpaka z dyszą o średnicy $D = 10$ mm, tworzącego szczelinę $\delta = 0,05$ mm. Zgodnie z oczekiwaniem, wartość zmierzonej siły hydrodynamicznej W odpowiadała w przybliżeniu określonej równaniem (5) (odpowiedni punkt pomiarowy na rys. 12 zaznaczono obwódką). Wyniki pomiarów siły hydrodynamicznej W działającej na pływak, wykazując rozrzut spowodowany przypadkowymi błędami, skupiają się powyżej linii teoretycznej odpowiadającej równaniu (5) i leżącym u jego podstaw założeniom. Stwierdzone odchyłki są niewielkie (rys. 12a, b), co potwierdza poprawność przyjętego modelu obliczeniowego.

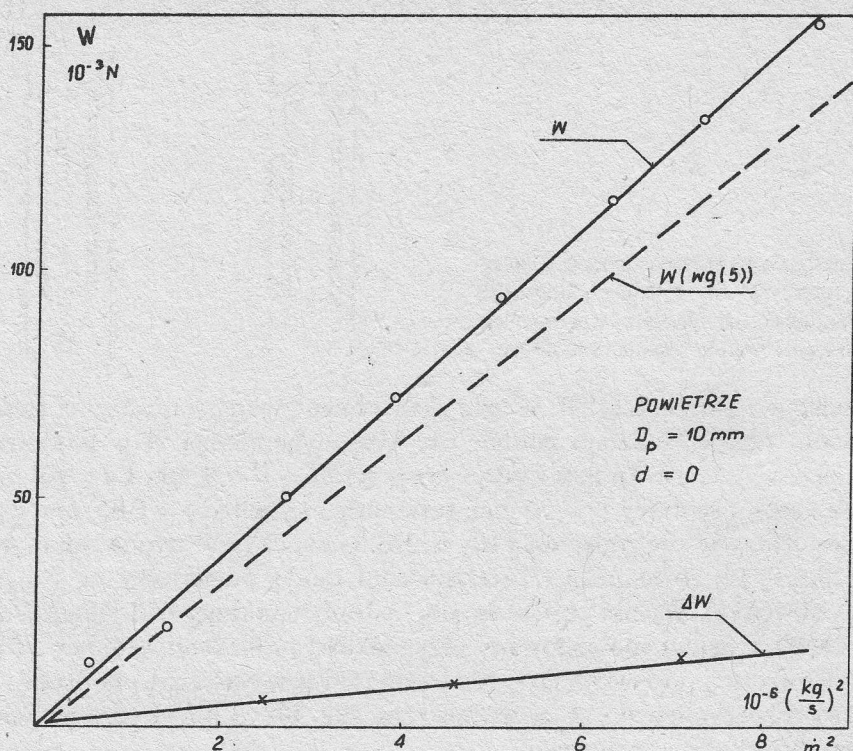
Wartość siły dodatkowej ΔW spowodowanej wpływem lepkości i działającej na pływak w konfiguracji z rysunku 3 określa równanie (36). Jak wykazują obliczenia udział tej siły $\Delta W/W$ wynosi dla wody około 10%.

W celu sprawdzenia doświadczalnego zależności (39) przeprowadzone zostały pomiary siły ΔW działającej na pływak bez dyszy pomiarowej (spiętrzającej) w kołpaku. Pływak posiadał jedynie obrzeże centrujące i stanowiące zarazem dławnicę dla przepływu zewnętrznego (rys. 13). W tabeli 3 zestawiono dane dotyczące warunków pomiaru siły ΔW .

Na rysunku 14 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych dla powietrza przy $D_p = 10$ mm i $d = 0$. Jak można się przekonać ΔW rośnie proporcjonalnie do $\dot{m}^2$, co, biorąc pod uwagę małą liczbę pomiarów i duży błąd pomiaru niewielkich sił, jest w przybliżeniu zgodne z zależnością (36) przewidującą wzrost ΔW proporcjonalnie do $\dot{m}^{3/2}$. Zmierzone bezpośrednio wartości ΔW są też zgodne z różnicą pomiędzy wartościami zmierzonymi siły hydrodynamicznej W oraz obliczonymi z zależności (5).

Tabela 3

	D_p [mm]	d [mm]
woda	10	0
	10	3
powietrze	10	0
	16	0



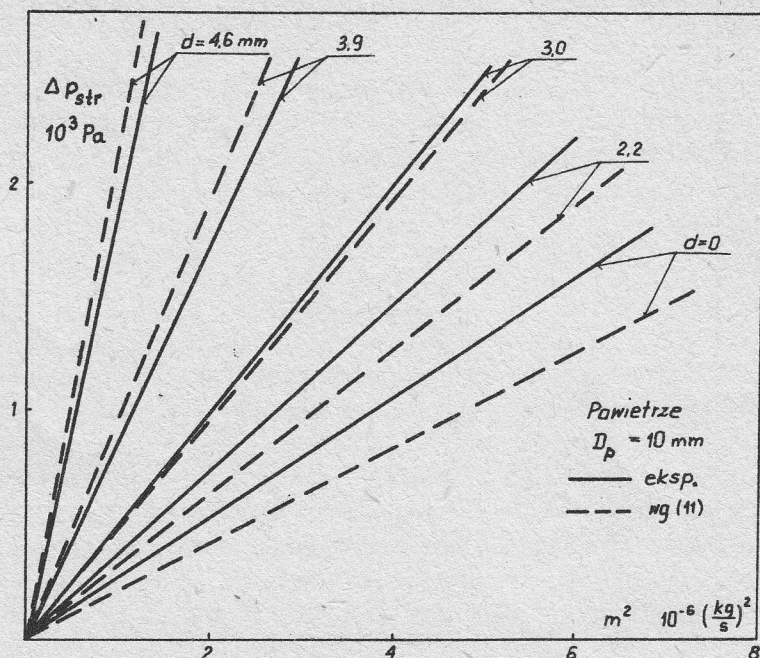
Rys. 14. Ustalane eksperymentalnie zależności działającej na pływak siły składowej ΔW wywołanej lepkością od natężenia przepływu $\dot{m}$; linią kreskowaną zaznaczono zależność wynikającą z (5), nie uwzględniającą wpływu lepkości, a linią ciągłą zależność sumarycznej siły W

Ze względu na kształt kanału przepływowego, przedstawionego na rysunkach 3, 7 i 13, przy pomiarze siły dodatkowej ΔW uwzględnia się nie tylko tarcie o ściankę, ale także wpływ różnicy ciśnień powstającej wskutek oporów. Uwzględniając rdzeń o średnicy d można siłę dodatkową ΔW działającą na pływak wyznaczyć z relacji (rys. 7)

$$\Delta W = \Delta W_t \left[\left(\frac{A_0}{A} - 1 \right) \left(1 + \frac{d}{D} \right) + 1 \right], \quad (44)$$

jeśli ΔW_t oznacza siłę spowodowaną lepkością, działającą na zewnętrzną powierzchnię kanału pierścieniowego.

Wielkością, której znajomość ma istotne znaczenie w przypadku stosowania elektromagnetycznego pływakowego przetwornika natężenia przepływu jest powstająca strata ciśnienia Δp_{str} . Nie chodzi tu o spadek ciśnienia Δp na zwężce, określony zależnością (6), ale o rzeczywistą stratę uwzględniającą częściowe odzyskiwanie energii kinetycznej, określoną relacją (11). Dokładny, bezpośredni pomiar straty ciśnienia okazuje się trudny, gdyż wymagałby odpowiedniego przystosowania przepływomierza przez nawiercenie otworów pomiarowych na końcach odcinka przewodu pomiarowego i wykonania odpowiednich odprowadzeń. Poza tym prawidłowy pomiar



Rys. 15. Wyniki jednej serii pomiarów straty ciśnienia

wymaga ustalenia się warunków przepływu, co na krótkich odcinkach za pływakiem może być nieosiągalne. Z tego względu zdecydowano się na dokonanie pomiaru pośredniego i wyznaczenie poszukiwanej wartości straty ciśnienia z relacji

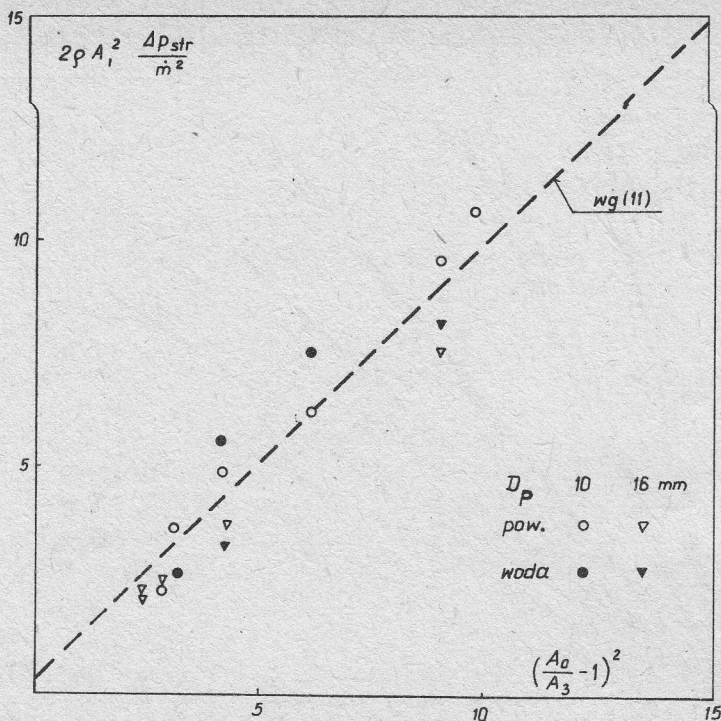
$$\Delta p_{str} = \Delta p_{pr} - \Delta p_{bpr}, \quad (45)$$

gdzie oznaczono: p_{pr} — spadek ciśnienia na długim odcinku przewodu, w którym umieszczony jest przepływomierz, p_{bpr} — spadek ciśnienia na długim odcinku przewodu z przepływomierzem, ale po usunięciu pływaka.

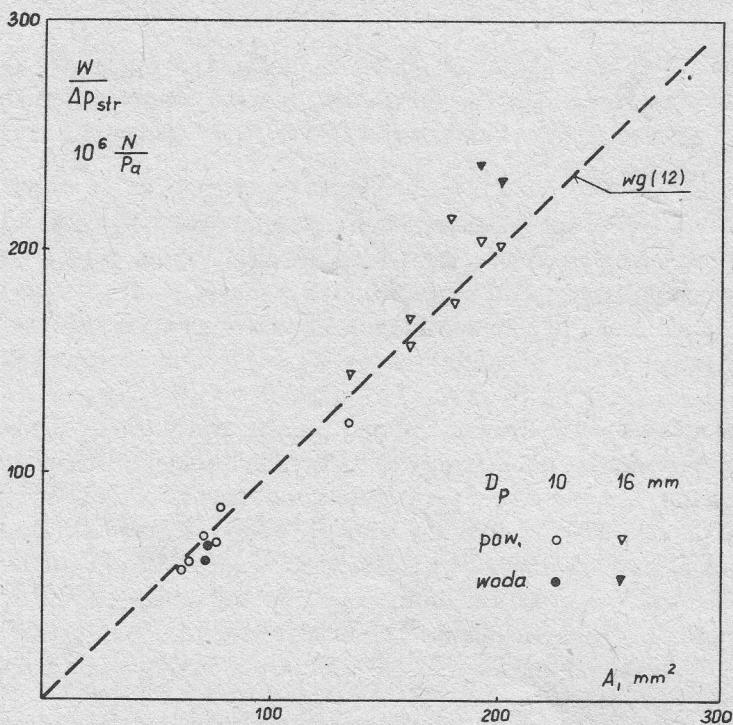
Pomiary te nie mogą być zbyt dokładne, ale ich wyniki umożliwiają weryfikację założeń leżących u podstaw zależności (5), (6) i (11) oraz porównanie z formułą kontrolną (12).

Na rysunkach 9 a, b, c, d uwzględniono pomiar straty ciśnienia spowodowanej przez przepływomierz elektromagnetyczny. Wyniki pomiaru przedstawiono przykładowo dla jednej serii na rysunku 15. Punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostych jeśli na osi odciętej przyjmuje się skalę odpowiadającą kwadratowi natężenia przepływu $\dot{m}^2$, co wynika z postaci zależności (11). Wyniki pomiarów można przedstawić na jednym wykresie, odmierzając na osi odciętych wartość czynnika określonego prawą stroną równania (11). Otrzymany rezultat obrazuje wykres na rysunku 16. Pozwala on na stwierdzenie wielkości rozrzutu i odchyłek od linii teoretycznej określonej równaniem (11).

Przy średnicy przewodu $D_p = 16$ mm i największych średnicach d rdzenia, wobec porównywalnej wielkości szczeliny zewnętrznej o szerokości $\sigma = 0,25$ mm i efekty-



Rys. 16. Zależność zmierzonej straty ciśnienia odniesionej do energii kinetycznej strumienia na wlocie od parametru przewężenia kanału występującego w równaniu (11), które odwzorowuje linia przerywana



Rys. 17. Zależność obliczonych wartości określonych równaniem (12) od przekroju kanału wlotowego przepływomierza; linia przerywana odwzorowuje równanie (12)

wnego przekroju dyszy, natężenie przepływu zostało skorygowane przez uwzględnienie zależności (29).

Zależność (12) umożliwia sprawdzenie wyników pomiarów W i Δp_{str} przeprowadzonych niezależnie. Jak to wynika z wykresu na rysunku 17 obliczone wartości ilorazu $W/\Delta p_{\text{str}}$ tworzą punkty układające się wzdłuż linii teoretycznej odpowiadającej wartościom przekroju kanału A_0 . Na wykresie tym przyjęto wartości $A_0 \cong \cong A_2$ określone zależnością (13).

Podsumowanie

Podsumowując można stwierdzić, że wyprowadzona zależność ogólna (5) określająca charakterystykę hydrodynamiczną przepływomierza jako funkcję natężenia przepływu $\dot{m}$ i wymiarów geometrycznych, a także zależność od tych parametrów straty ciśnienia (11) oraz ich wzajemna relacja (12), dają wyniki zgodne z doświadczeniem. Świadczy to o dopuszczalności poczynionych założeń upraszczających, a zarazem zapewnia możliwość uogólnienia wyników badań doświadczalnych. Ustalone zależności umożliwiają przedstawienie rezultatów pomiarów w sposób uogólniony, co pozwala na niezawodne wykrycie wszelkich przypadkowych błędów. Relacja (12) pozwala na weryfikację niezależnie mierzonych wielkości przez sprowadzenie ich do wielkości geometrycznej.

Zależność (34) umożliwia ocenę wpływu lepkości, pomijanego w pierwszym przybliżeniu przy ustalaniu (5).

Tak zweryfikowane zależności mogą służyć za podstawę przy optymalnym projektowaniu przepływomierzy elektromagnetycznych oraz pozwalają na uwzględnienie na drodze obliczeniowej wszelkich zmian warunków pracy albo geometrii, bez konieczności każdorazowego skalowania.

Badania przepływu przez dyszę o przekroju pierścieniowym wykazały brak wpływu zmiany kształtu przekroju i potwierdziły stosowność zależności ogólnych także do tych przypadków. Ma to istotne znaczenie ze względu na możliwość linearyzacji charakterystyki przepływomierzy elektromagnetycznych przez stosowanie odpowiednio ukształtowanych rdzeni przysłaniających otwór przelotowy dyszy pomiarowej [1].

Zastosowana metoda pomiarowa, polegająca na określeniu siły działającej na ruchomą zwężkę albo odcinek przewodu, stwarza nową możliwość pomiaru oporów przepływu w krótkich kanałach o różnych konfiguracjach, których znajomość ma duże znaczenie także w technice strumieniowej.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1984 r.

Literatura

- [1] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczne pływakowe przetworniki wydatku i ciśnienia*. PWN, Warszawa—Poznań 1980.
- [2] E. Eck, *Technische Strömungslehre*. Springer, Berlin 1968.
- [3] L. E. Sissom, D. B. Pitts, *Elements of Transport Phenomena*. Mc Graw Hill, New York 1972.

- [4] B. N. Siow, *Istieczene zidkosti czeriez nasadki w sriedy z przeciwodawleniem*. Izd. Maszynostrojanie, Moskwa 1968.
- [5] H. Schlichting, *Grenzschichttheorie*. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1958.
- [6] J. Śmigiełski, *Opory przepływu krótkich odcinków przewodów o stałym przekroju*. Prace IMP, z. 89, 1989.
- [7] J. Śmigiełski, *Wyznaczanie charakterystycznych parametrów pływakowego przepływomierza elektromagnetycznego na zasadzie podobieństwa*. Prace IMP, z. 88, 1985.

Гидродинамическая характеристика электромагнитного поплавкового расходомера

Резюме

Выведена зависимость гидродинамической силы, перепада давления и потерь давления от интенсивности течения и геометрических пропорций сопла в поплавке электромагнитного расходомера. Учтено влияние окружного зазора вне поплавка, а также долю силы вызванной вязкостью агента.

Зависимости, определенные при упрощающих предположениях, проверялись экспериментально. Полученные результаты совпадали с расчетными в пределах обусловленных точностью измерений. Относится это как к соплу кругового поперечного сечения так и к кольцевому соплу в случае присутствия центрального стержня. Измерения проведены при использовании типичной системы применяемой в расходомере, позволяющей определить силу действующую на сопло. Такая система позволяет измерять потери давления в коротких участках провода со сужениями.

Выведенные и проверенные обобщенные гидродинамические зависимости могут найти практическое применение в оптимизации электромагнитных поплавковых расходомеров и поплавковых элементов со сужениями, применяемых в струйной технике, а также для определения влияния изменений условий работы.

Примененный измерительный метод может быть использован для экспериментального определения зависимостей описывающих сопротивление течения в коротких каналах.

Hydrodynamic Characteristic of the Electromagnetic Float Flowmeter

Summary

Relations describing the dependence of the pressure drop and hydrodynamic force exerted on the float on the flow rate and geometrical proportions have been derived. The influence of leakage causing flow outside the float as well as the component force due to the viscosity have been taken into consideration. The relations derived have been verified experimentally. The results agree with calculations within reasonable limits of accuracy for circular and annular nozzles.

The hydrodynamic force and the pressure drop have been given in the form of generalized formulas. The self-consistency of the relations derived has been checked by comparison with independent results.

The results presented may be applied for design calculations of electromagnetic float flowmeters and other devices utilizing channels of similar configuration. They also allow to evaluate the influence of variations of working conditions.

The applied system of coils with movable core enables direct measurement of the resistance of short-length pipes and channels of abruptly varying cross-sections.