

Jerzy GRYCHOWSKI

OCENA NAPORU OSIOWEGO ZESPOŁU WIRUJĄCEGO  
NA PODSTAWIE POMIARU PROMIENIOWEGO ROZKŁADU CIŚNIENIA  
NA CYLINDRYCZNEJ OSŁONIE

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań naporu osiowego działającego na wirującą w osłonie cylindrycznej tarczę w zależności od parametrów ruchowych oraz cech konstrukcyjnych badanego układu. Porównano wyniki obliczeń naporu osiowego na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia na ścianie osłony cylindrycznej i przyjętych założeń upraszczających z wartością wyznaczoną bezpośrednio na wale. Wykazano, że napór osiowy zespołu wirującego można obliczyć mierząc promieniowy rozkład ciśnienia na ścianie kadłuba, jednak w przypadku przyjęcia ogólnie zakładanych założeń upraszczających, należy uwzględnić odpowiednią poprawkę.

### 1. Wstęp

Ważnym zagadnieniem konstrukcji maszyn hydraulicznych z zespołami wirującymi jest zagadnienie naporu osiowego działającego na łożyska zespołu wirującego. Obliczenie składowej naporu działającego w kierunku osi zespołu wirującego jest bardzo złożone ze względu na dużą liczbę zmiennych parametrów. Ponieważ w rzeczywistych konstrukcjach kształt i rozmiary komór utworzonych pomiędzy powierzchniami wirników i kadłuba są różne, utrudnione jest również uogólnienie wyników doświadczeń. Bezpośredni pomiar sił osiowych jest w rzeczywistych warunkach także nie zawsze możliwy. Dlatego badanie wartości naporu osiowego w zależności od wybranych cech konstrukcyjnych oraz parametrów ruchowych najlepiej przeprowadzić na uproszczonym modelu wirującej w osłonie cylindrycznej tarczy.

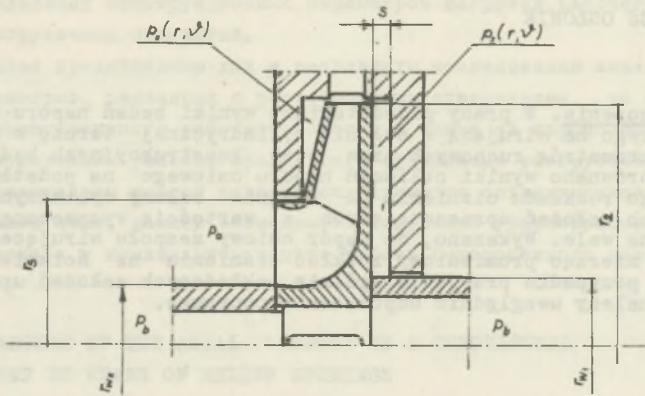
W ogólnym przypadku napór działający na wirnik zamknięty pracujący w kadłubie pompy można wyznaczyć z następującego wzoru [1] (rys. 1):

$$\sum F = \int_{r_{WI}}^{r_S^2} r \left[ \int_0^{2\pi} p_I(r, \vartheta) d\vartheta \right] dr - \int_{r_S}^{r_{wII}^2} r \left[ \int_0^{2\pi} p_{II}(r, \vartheta) d\vartheta \right] dr -$$

$$- \pi (r_S^2 - r_{wII}^2) p_o + \pi (r_{WI}^2 - r_{wII}^2) p_b - \frac{\gamma}{g} Q c_o \quad (1)$$

gdzie:

$r_{wI}, r_{wII}, r_s, r_2$	m	- promienie wału, szyi i zewnętrzny wirnika,
$P_I, P_{II}, P_o, P_b$	N/m <sup>2</sup>	- ciśnienia,
$\gamma$	N/m <sup>3</sup>	- ciężar właściwy cieczy,
$Q$	m <sup>3</sup> /s	- natężenie przepływu,
$c_o$	m/s	- prędkość przepływu cieczy w szyi wirnika.



Rys. 1. Składowe wypadkowe naporu cieczy działającego na zespół wirujący w kierunku jego osi

Zakładając osiową symetrię rozkładu ciśnienia np. w pompach z kierownicami łopatkowymi oraz wprowadzając pojęcie średniej prędkości wirowania cieczy w osłonie, można siłę wynikającą z dwu pierwszych członów równania (1) wyznaczyć ze wzoru:

$$F_1 = \pi \gamma \left[ H_p (r_s^2 - r_{wI}^2) + \frac{\Omega_{II}^2 \cdot \omega_t^2}{4g} (r_2^2 - r_s^2)^2 - \frac{\Omega_I^2 \cdot \omega_t^2}{4g} (r_2^2 - r_{wI}^2)^2 \right], \quad (2)$$

gdzie:

- $H_p$  m - wysokość ciśnienia statycznego na obwodzie zewnętrznym wirnika,
- $\Omega$  - stosunek prędkości wirowania "rdzenia" cieczy do prędkości wirowania wirnika,
- $\omega_t$  s<sup>-1</sup> - prędkość wirowania tarczy,

W praktyce przyjmuje się zwykle, że  $\Omega_I = \Omega_{II} = 0,5$  i dla tego przypadku otrzymuje się wzory znane z literatury [2, 3]. W rzeczywistości napór osiowy zależy od szeregu parametrów i bardziej dokładne wyznaczenie jego wartości wymaga uzmiennienia  $\Omega$ . Badania wykazują, że stosunek średniej prędkości wirowania "rdzenia" cieczy do prędkości wirowania tarczy zależy głównie od następujących parametrów [4, 5, 6]:

- wyróżnika wydajności

$$\varphi = \frac{Q_f}{\nu \cdot r_2} \quad (3)$$

- zredukowanej szczeliny promieniowej

$$\zeta = \frac{s}{r_2} \quad (4)$$

- liczby Reynoldsa

$$R = \frac{\omega_t \cdot r_2^2}{\nu} \quad (5)$$

- zredukowanej średnicy wału

$$Q = \frac{r_w}{r_2} \quad (6)$$

- współczynnika chropowatości powierzchni

$$\xi = \frac{r_{aw}}{r_{ak}} \quad (7)$$

We wzorach powyższych zastosowano następujące oznaczenia:

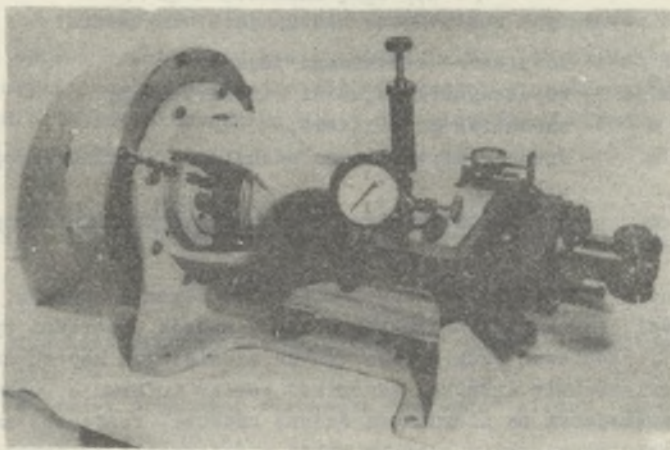
$Q_f$	$m^3/s$	- natężenie dodatkowego przepływu,
$\nu$	$m^2/s$	- współczynnik lepkości kinematycznej,
$s$	$m$	- szczelina promieniowa,
$r_{aw}$	$m$	- średnie arytmetyczne odchylenia profilu chropowatości wirnika,
$r_{ak}$	$m$	- średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości kadłuba.

Mierząc promieniowy rozkład ciśnienia na ścianie kadłuba w zależności od wartości powyższych parametrów można w sposób pośredni wyznaczyć siłę osiową [7]. Ponieważ siła osiowa wynika z działania naporu cieczy na wirującą powierzchnię wirnika, natomiast pomiar informuje zazwyczaj o ciśnieniu działającym na nieruchomą ścianę kadłuba, konieczne są badania mające na celu wyznaczenie zakresu błędów w zależności od przyjętego sposobu interpretacji wyników pomiaru. Poniżej w pracy przedstawiono wyniki badań naporu osiowego działającego na wirującą w osłonie cylindrycznej tarczę. Wyniki otrzymane przez bezpośredni pomiar na wale urządzenia porównano z wynikami obliczeń naporu osiowego. Napór osiowy wyznaczono zakładając ogólnie przyjmowane założenia upraszczające tj. wprowadzając pojęcie średniej prędkości wirowania cieczy w osłonie oraz promieniowy rozkład ciśnienia wzdłuż promienia według krzywej drugiego stopnia.



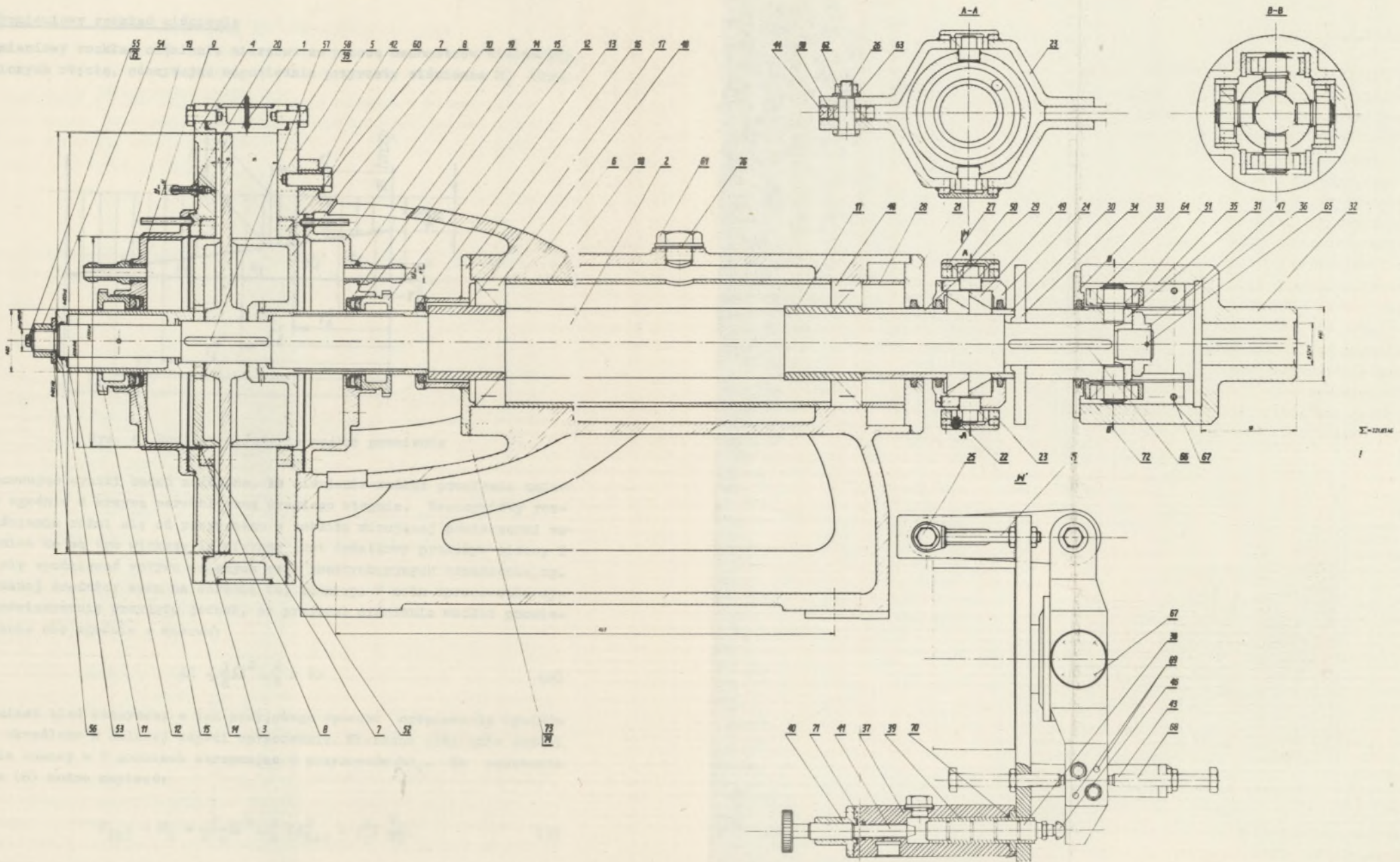
## 2. Badania doświadczalne

Dla realizacji założonego programu badań skonstruowano specjalne urządzenie badawcze przedstawione na rysunkach 2 i 3 [8]. Urządzenie składa się z cylindrycznej osłony, w której wiruje tarcza oraz układu napędowego z układem dźwigni do bezpośredniego pomiaru siły osiowej. Zespół wirujący został osadzony w łożyskach i sprzęgle w ten sposób, że możliwy jest swobodny jego przesuw. Ciecz doprowadzona jest do urządzenia dwoma równoległymi przewodami, a następnie z komory szczeliną cylindryczną (imitującą warunki przepływu przez uszczelnienia w pompach) do wnętrza osłony. Odprowadzenie cieczy po drugiej stronie tarczy przewidziano poprzez szczelinę o identycznym przekroju. Jak już podano, możliwy jest bezpośredni pomiar wypadkowego naporu osiowego przy  $\varphi_0 = \varphi_d$  za pomocą układu dźwigni z trzema punktami obrotu i siłownika hydraulicznego. Ciśnienie oleju sprężanego przez tłoczek siłownika jest proporcjonalne do naporu osiowego działającego na tarczę. Warunkiem poprawnego pomiaru naporu osiowego jest zachowanie całkowitej symetrii geometrycznej elementów i przestrzeni po stronie doprowadzenia i odprowadzenia cieczy w urządzeniu pomiarowym. Badania przeprowadzono przy stałej wartości liczby Reynoldsa  $R = 5,3198 \cdot 10^6$  i stałej wartości zredukowanej średnicy wału  $q = 0,2$ .



Rys. 3. Widok urządzenia badawczego

Zmieniano natomiast szczelinę promieniową oraz natężenie dodatkowego przepływu cieczy przez urządzenie. Dodatkowy przepływ cieczy otwarcza przepływ cieczy występujący w stopniu pompy na skutek przecieków przez szczeliny pomiędzy tulejami kadłuba, a powierzchniami szyi wirnika i wału. W doświadczeniu użyto wody czystej o temperaturze od  $t = 291,16^\circ\text{K}$  ( $18^\circ\text{C}$ ) do  $t = 293,16^\circ\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ).

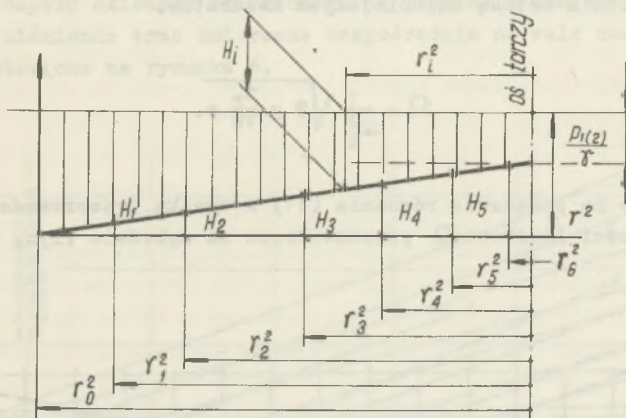


Rys. 2. Konstrukcja urządzenia badawczego



### 2.1. Promieniowy rozkład ciśnienia

Promieniowy rozkład ciśnienia mierzono za pomocą manometrów cieczowych wypełnionych rtęcią, odczytując odpowiednie przyrosty ciśnienia  $H_i$  (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład ciśnienia wzdłuż promienia

Opracowując wyniki badań założono, że ciśnienie wzdłuż promienia zmienia się zgodnie z krzywą paraboliczną drugiego stopnia. Rzeczywisty rozkład ciśnienia różni się od przyjętego w pobliżu wirującej powierzchni wału. Różnice te są tym większe, im większy jest dodatkowy przepływ cieczy i należy się spodziewać wpływu dalszych cech konstrukcyjnych urządzenia, np. zredukowanej średnicy wału na wartość tej różnicy. W celu opracowania wyników doświadczenia przyjęto jednak, że przyrost ciśnienia wzdłuż promienia zmienia się zgodnie z wzorem:

$$dH = \frac{1}{g} \Omega^2 \omega_t^2 r dr \quad (8)$$

Natomiast błąd otrzymany z tak przyjętego sposobu opracowania wyników pomiaru określono w dalszej części opracowania. Mierzono ciśnienie wzdłuż promienia komory w 7 punktach otrzymując 6 przyrostów  $\Delta H_i$ . Na podstawie równania (8) można napisać:

$$H_{i+1} - H_i = \frac{1}{2g} \Omega^2 \omega_t^2 (r_{i+1}^2 - r_i^2) \frac{\gamma_w}{\gamma_r} \quad (9)$$

Ponieważ

$$H_i = H_0 + a r_i^2, \quad (10)$$

gdzie:

$H_0$  m - wysokość ciśnienia w osi urządzenia,

$H_1$  m - wysokość ciśnienia na promieniu  $r_1$ ,

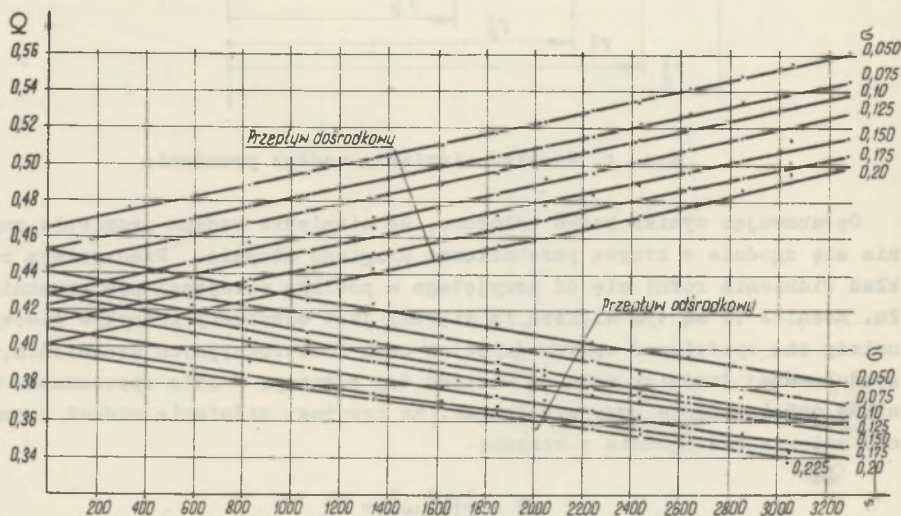
$a$  - współczynnik kierunkowy prostej z rys. 3.

Współczynnik kierunkowy prostej został obliczony z wyznaczonych przyrostów ciśnienia metodą najmniejszych kwadratów.

Stąd

$$\Omega = \frac{1}{\epsilon^2} \sqrt{2 g \frac{r}{JW} a}. \quad (11)$$

Otrzymane na podstawie równania (11) w wyniku przeprowadzonego doświadczenia wartości liczbowe  $\Omega$  przedstawiono na wykresie (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ wartości wyróżnika wydajności i szerokości szczeliny osiowej na średnią prędkość wirowania cieczy ( $R = 5,3198 \cdot 10^6$ ,  $q = 0,20$ )

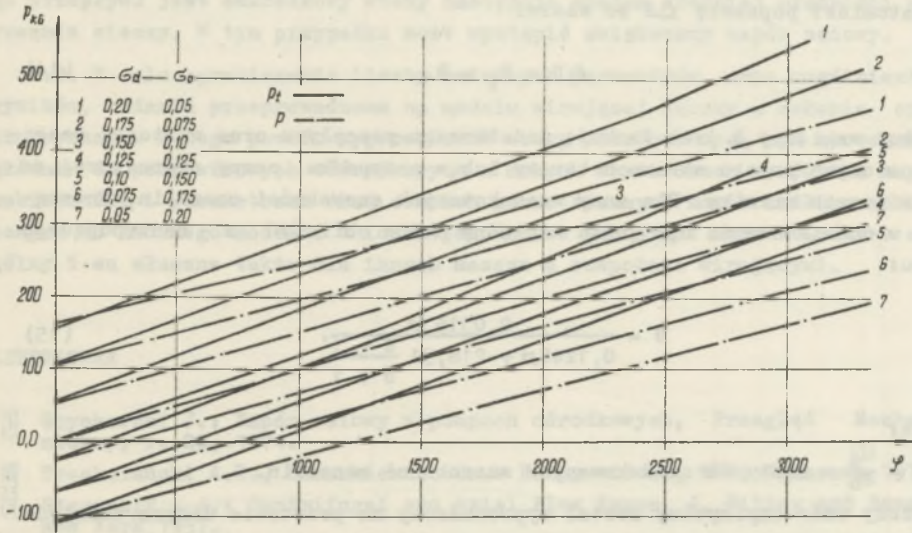
## 2.2. Pomiar naperu osiowego

Siłę osiową działającą na zespół wirujący mierzono bezpośrednio na wale urządzenia. Obliczając rzeczywistą wartość siły osiowej uwzględniono poprawkę wynikającą z różnicy ciśnień pomiędzy stroną dopływową i wypływową urządzenia. Następnie obliczono również siłę osiową na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia mierzonego na nieruchomej ścianie osłony ze wzoru:

$$P_t = \pi \frac{\gamma_w}{g} \omega_t^2 \frac{r_2^4 - r_1^4}{4} (\Omega_o^2 - \Omega_d^2), \quad (12)$$

gdzie: indeks "o" oznacza komorę po stronie odprowadzenia wody, indeks "d" po stronie doprowadzenia wody.

Wartości naporu osiowego, obliczonego na podstawie pomiaru promieniowego rozkładu ciśnienia oraz zmierzone bezpośrednio na wale zespołu wirującego, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wpływ szczelin osiowych oraz dodatkowego przepływu na wartość siły osiowej ( $R = 5,3198 \cdot 10^6$ ,  $\varphi = 0,20$ )

Z rysunku wynika, że obliczenie naporu osiowego w podany powyżej sposób na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia mierzonego na osłonie daje zgodne wyniki, w przypadku gdy nie ma dodatkowego przepływu cieczy. W miarę wzrostu natężenia przepływu cieczy wzrastają różnice pomiędzy wartościami naporu obliczonymi i zmierzonymi doświadczalnie. W zakresie zmiany wartości parametrów przyjętych w badaniach obliczony napór osiowy na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia na ścianie osłony był wyższy o około 25%, a w skrajnych przypadkach o 50% w stosunku do naporu zmierzonego. Pomimo wspomnianych różnic, charakter zmian ilościowych ze względu na cechy geometryczne układu i parametry ruchowe jest w obu przypadkach identyczny.



### 2.3. Wyznaczenie poprawki $\Delta P$

W związku z różnicami występującymi w obliczeniu naporu osiowego na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia na osłonie i wartością wyznaczoną z bezpośredniego pomiaru na wale, należy uwzględnić poprawkę  $\Delta P$ :

$$P = P_t - \Delta P, \quad (13)$$

gdzie:

$P$  - rzeczywista wartość naporu osiowego.

Natomiast poprawkę  $\Delta P$  ze wzoru:

$$\Delta P = P_t \cdot B. \quad (14)$$

Błąd względny  $B$  jest funkcją dodatkowego przepływu oraz wartości szczylin osiowych po obu stronach tarczy lub, w przypadku pompy odśrodkowej, po obu stronach wirnika. Dla sumy zredukowanych szerokości szczelin, wynoszących w doświadczeniu 0,25, błąd względny można obliczyć z następującego wzoru:

$$B = \frac{0,0315 \varnothing}{0,1248\varnothing + 218,31 \frac{\bar{s} - 1}{\bar{s} + 1}}, \quad (15)$$

gdzie:

$\frac{\bar{s} - 1}{\bar{s} + 1} = \frac{\sigma_d}{\sigma_c}$  - stosunek zredukowanych szerokości szczelin.

Powyższy wzór empiryczny został wyprowadzony na podstawie danych doświadczalnych i obowiązuje w zakresie podanych na początku rozdziału parametrów doświadczenia. W przypadku gdyby suma zredukowanych szerokości szczelin była większa od 0,25, wówczas należy się spodziewać mniejszych wartości błędu względnego i odwrotnie, gdy suma ta jest mniejsza.

### 3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można podać następujące wnioski:

3.1. Napór osiowy można obliczyć na podstawie promieniowego rozkładu ciśnienia na ścianie kadłuba pompy, całkując graficznie zmierzony rozkład ciśnienia. Metoda ta daje wyniki na ogół porównywalne z rzeczywistymi naporami osiowymi. W przeprowadzonych badaniach obliczenia dały wyniki zawyżone o około 10%. Natomiast stosując w celu uogólnienia wyników metodę opisaną w pracy otrzymuje się wartości zgodne ze zmierzonymi jedynie w przypadku, gdy nie występuje dodatkowy przepływ cieczy przez uszczelnienia szyi lub dławnicę pompy. W przeciwnym razie należy uwzględnić odpo-

wiednią poprawkę na podstawie obliczonego ze wzoru (15) błędu względnego. Wartość poprawki jest większa dla większych natężeń dodatkowego przepływu.

3.2. Z jakościowej analizy danych wynika, że powiększanie szczeliny promieniowej powoduje zmniejszenie średniej prędkości wirowania cieczy, a tym samym może być przyczyną wzrostu naporu cieczy znajdującej się w tej komorze. Bardzo wyraźny wpływ na wartość naporu osiowego ma dodatkowy przepływ cieczy. Wzrost natężenia dodatkowego przepływu imitującego przepływu przez uszczelnienia, np. szyi wirnika w kierunku dośrodkowym, powoduje wzrost średniej prędkości wirowania cieczy. Natomiast, gdy kierunek tego przepływu jest odśrodkowy wtedy następuje spadek średniej prędkości wirowania cieczy. W tym przypadku może wystąpić zwiększony napór osiowy.

3.3. W celu ograniczenia liczby zmiennych parametrów oraz uogólnienia wyników, badania przeprowadzono na modelu wirującej tarczy w osłonie cylindrycznej. Z tego powodu wyprowadzone wzory liczbowe mogą być stosowane głównie do pomp wirowych odśrodkowych o małych wartościach wyróżnika szybkoobrotowości i parametrach oraz cechach geometrycznych komór kadłuba zbliżonych do badanego modelu. Wnioski jakościowe natomiast mają charakter ogólny i są słuszne także dla innych maszyn z zespołami wirującymi.

#### LITERATURA

- [1] Grychowski J.: Napór osiowy w pompach osrodkowych, Przegląd Mechaniczny, z. 22, 1974.
- [2] Troskoleński A.T., Łazarkiewicz Sz.: Pompy wirowe, WNT, Warszawa 1973.
- [3] Stepanoff A.J.: Centrifugal and Axial Flow Pumps, J. Willey and Sons, New York 1957.
- [4] Grychowski J.: Średnia prędkość wirowania cieczy w osłonie cylindrycznej ograniczonej wirującą tarczą z dodatkowym przepływem cieczy, Prace Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, z. 67-68, 1975.
- [5] Dally J.W., Nece R.E.: Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks, Journal of Basic Engineering, nr 1, 1960.
- [6] Altmann D.: Einflussgrößen auf die axialkraft bei radialen Kreiselpumpen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke, nr 8, 1970.
- [7] Due H.F.: An empirical method for calculating radial pressure distribution an rotating disks. Journal of Engineering for Power, April 1966.
- [8] Jarosz M. Zajęc J.: Praca dyplomowa inżynierska nr 1542/73/74, wykonana pod kierunkiem dr inż. J. Grychowskiego, 1974.



ОЦЕНКА НАПОРА ОСЕВОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КОМПЛЕКСА  
НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ  
НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОЖУХЕ

Р е з ю м е

В работе представлено результаты исследований осевого напора, действующего на вращающийся в цилиндрическом кожухе диск, в зависимости от динамических параметров и конструктивных свойств исследуемой системы.

Были проведены сравнения результатов расчётов осевого напора на основе радиального распределения давления на стенке цилиндрического кожуха с его величиной обозначенной непосредственно на вале. Показано, что оценку напора осевого вращающегося комплекса можно провести на основе радиального измерения распределения давления на стенке корпуса, учитывая соответствующую поправку.

EVALUATION OF AXIAL PRESSURE HEAD OF WHIRLING UNIT BASED  
ON MEASUREMENTS OF RADIAL PRESSURE DISTRIBUTION  
ON CYLINDRICAL CASING

S u m m a r y

The paper presents the results of studies on axial pressure head acting on a disk whirling in a cylindrical casing, carried out, in units of different constructional characteristics and motion parameters. The results of axial pressure head calculations achieved on the basis of radial pressure distribution on a cylindrical casing and the results obtained directly on a shaft have been compared. It has been proved that the evaluation of axial pressure head of a whirling unit can be done by measuring radial pressure distribution on a cylindrical casing if a given allowance is made.