ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: ENERGETYKA z. 82 Nr kol. 754

Bogusław HUPA, Jerzy ROKITA

OCENA NAPORU PROMIENIOWEGO W POMPIE O SWOBODNYM PRZEPŁYWIE NA PODSTAWIE POMIARU ROZKŁADU CIŚNIENIA NA ŚCIANCE WNĘKI WIRNIKA I KOMORY BEZŁOPATKOWEJ

Streszczenie. Wskazano przyczyny występowania naporu promieniowego w pompach o swobodnym przepływie. Ustalono jego związek z rozkładem ciśnienia na powierzchni cylindrycznej wnęki. Przedstawiono wyniki badań rozkładu ciśnienia na powierzchni wnęki cylindrycznej i przestrzeni bezłopatkowej. Określono i dokonano oceny wielkości naporu promieniowego działającego na wirnik pompy o swobodnym przepływie.

1. Wprowadzenie

Jedną z właściwości przypisywanych powszechnie pompom o swobodnym przepływie jest niewystępowanie naporu promieniowego działającego na wirnik. Uzasadnia to fakt, że wirnik umieszczony jest w koncentrycznej (osiowo-symetrycznej) wnęce, a więc pełna symetria jego usytuowania miałaby wyeliminować istnienie naporu promieniowego.

Założenie takie nie jest słuszne. Wirnik podlega oddziaływaniu pola ciśnień w komorze bezłopatkowej pompy, która w okolicy średnicy zewnętrznej wirnika ma kształt kanału zbiorczego o stałym przekroju ze stycznie usytuowanym króćcem tłocznym. W komorze z natury rzeczy rozkład ciśnienia wzdłuż obwodu jest zmienny. Zmienność tę potwierdzają wyniki badań w pracy [1]. Zmienność ciśnienia w komorze bezłopatkowej musi jednak powodować zmienność rozkładu ciśnienia na obwodzie wnęki cylindrycznej (rys. 1), w której usytuowany jest wirnik. Potwierdzenie tego faktu można znaleźć w pracy [2]. Zatem ogólnie biorąc musi istnieć wypadkowa siła (zwana w literaturze "promieniową") działająca w płaszczyźnie przechodzącej przez oś wirnika, a powodująca obciążenie łożysk pompy.

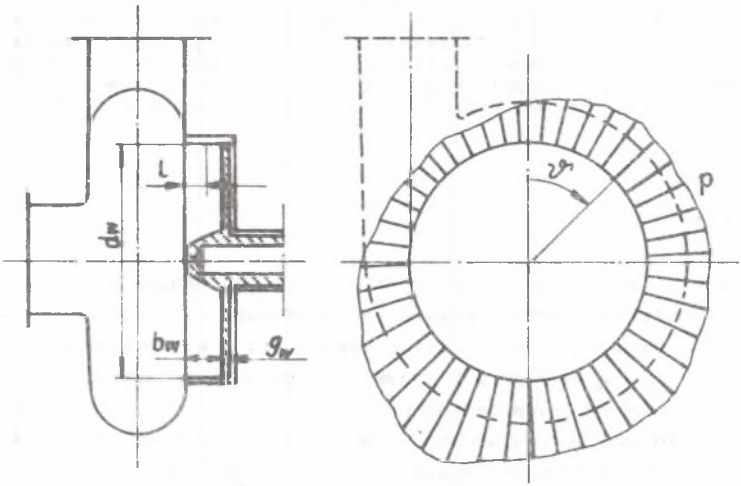
Literatura z dziedziny pomp krętnych odśrodkowych zawiera dość liczne pozycje poświęcone temu zagadnieniu. Natomiast brak jest danych odnoszących się do pomp o swobodnym przepływie. Skłoniło to do przeprowadzenia własnego pomiaru w tym zakresie.

2. Napór promieniowy i jego związek z rozkładem ciśnienia na powierzchni wnęki cylindrycznej kadłuba

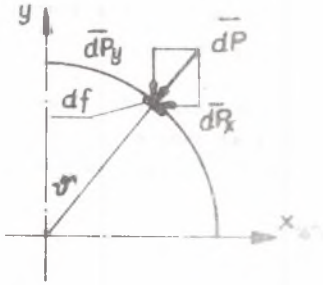
Ciśnienie na powierzchni wnęki cylindrycznej kadłuba jest przy danej wydajności pompy, ogólnie rzecz biorąc, funkcją dwóch współrzędnych

$$p = p(l, \vartheta), \tag{1}$$

przy czym wielkości l i ϑ zdefiniowano na rysunku 1.



Rys. 1. Charakter rozkładu ciśnienia wzdłuż obwodu cylindrycznej wnęki pompy o swobodnym przepływie



Rys. 2. Elementarny napór promieniowy działający na wirnik pompy

Napór promieniowy jest wynikiem geometrycznego sumowania się elementarnych naporów na powierzchnię cylindryczną o średnicy równej średnicy zewnętrznej wirnika i wysokości równej sumie szerokości łopatek wirnika oraz grubości jego tarczy.

Elementarny napór $\overline{dP}$ na powierzchnię df może być wyrażony:

$$\overline{dP} = \overline{n}\, p\, df, \tag{2}$$

gdzie:

$\overline{n}$ - jednostkowy wektor normalny do powierzchni.

Wartości składowych wektora dP wyniosą:

$$dP_x = - p\, df \cos(\bar{n}, \bar{x}) \tag{3a}$$

$$dP_y = - p\, df \cos(\bar{n}, \bar{y}) \tag{3b}$$

Uwzględniając, że

$$df = r_w\, dl\, d\vartheta , \tag{4}$$

gdzie:

r_w - promień zewnętrzny wirnika,

otrzymuje się:

$$P_x = - \int_0^{2\pi} \int_0^{b_w+g_w} r_w\, p(l,\vartheta) \cos(90 - \vartheta)\, dl\, d\vartheta \tag{5a}$$

$$P_y = - \int_0^{2\pi} \int_0^{b_w+g_w} r_w\, p(l,\vartheta) \cos\vartheta\, dl\, d\vartheta \tag{5b}$$

Wypadkowy napór promieniowy wynosi:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \tag{6}$$

Kąt nachylenia wypadkowego naporu promieniowego można wyznaczyć z zależności

$$\theta = \operatorname{arc\,tg} \frac{P_x}{P_y}. \tag{7}$$

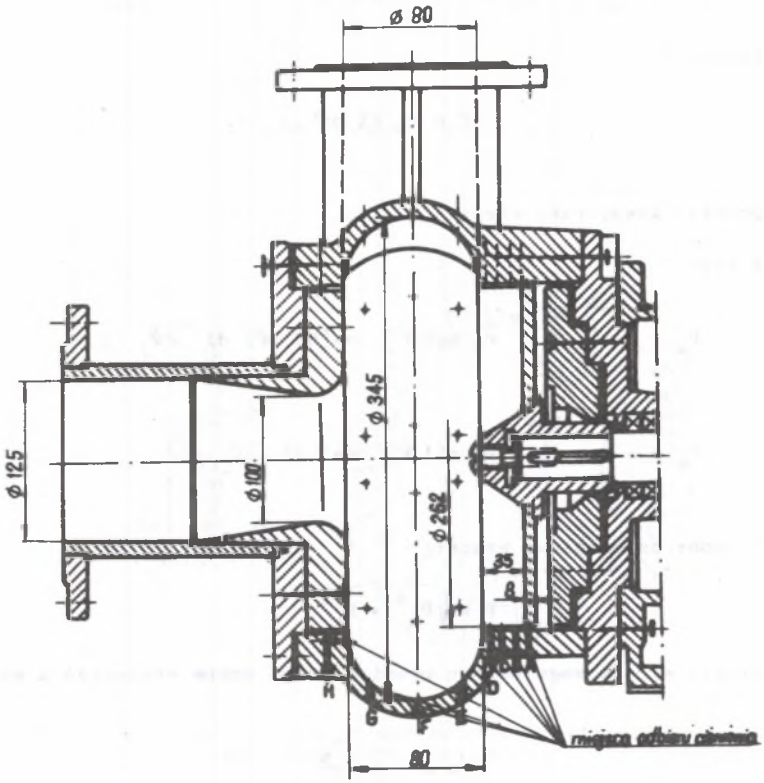
Zarówno P, jak i θ w ogólnym przypadku są funkcjami wydajności pompy.

3. Rozkład ciśnienia na powierzchni wnęki cylindrycznej kadłuba i komory bezłopatkowej

Aby ocenić wielkość naporu promieniowego realnie występującego w pompie o swobodnym przepływie, przeprowadzono pomiar [3] rozkładu ciśnienia na powierzchni wnęki cylindrycznej kadłuba oraz dodatkowo na powierzchniach komory bezłopatkowej.

Do badań dostosowano eksperymentalną pompę o swobodnym przepływie, której przekrój (wraz z naniesionymi głównymi wymiarami) przedstawiono na rysunku 3, natomiast widok pompy na stanowisku badawczym przedstawiono na

rysunku 4. Badania przeprowadzono przy prędkości obrotowej wału pompy n = = 1450 obr/min, stosując jako ciecz roboczą wodę czystą o temperaturze otoczenia.



Rys. 3. Część przepływowa eksperymentalnej pompy o swobodnym przepływie (przekrój)

Rozkład ciśnienia na powierzchni wnęki cylindrycznej kadłuba oraz komory bezłopatkowej określano w wybranych punktach, odbierając ciśnienia z odpowiednio wykonanych otworków impulsowych (o średnicy 1 mm).. Rozmieszczenie otworków impulsowych na powierzchni wnęki cylindrycznej i komory bezłopatkowej przedstawiono na rysunku 5. W płaszczyznach prostopadłych do osi wału (A,B,...H) otworki rozmieszczone są w identycznych położeniach wzdłuż obwodu (I,II,...VII).

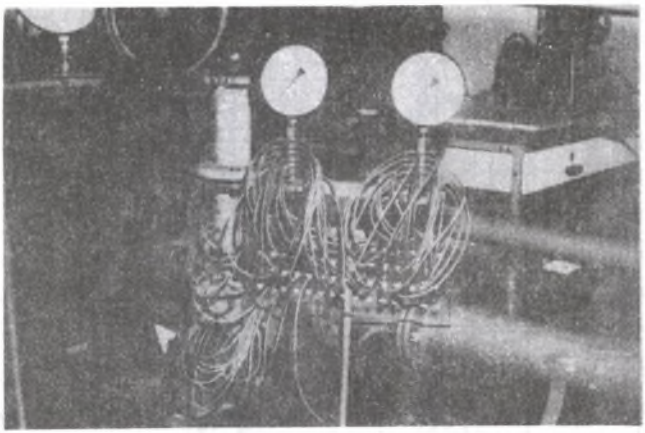
Wartości ciśnień zmierzone w poszczególnych punktach odbioru przeliczono i wyrażono w formie nadwyżek ciśnienia ponad wartość ciśnienia w króćcu ssawnym pompy według relacji

$$p = p_{sv} + p_m, \tag{8}$$

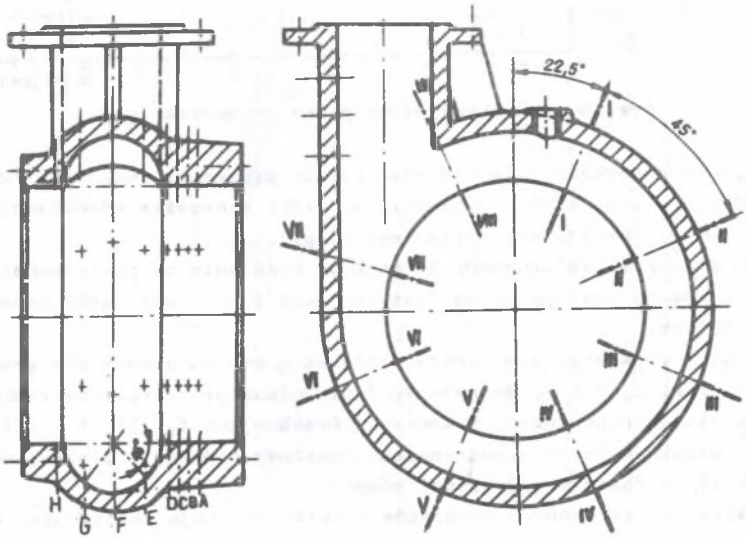
gdzie:

p_{sv} - podciśnienie w króćcu ssawnym pompy,

p_m - ciśnienie manometryczne w miejscu pomiaru.

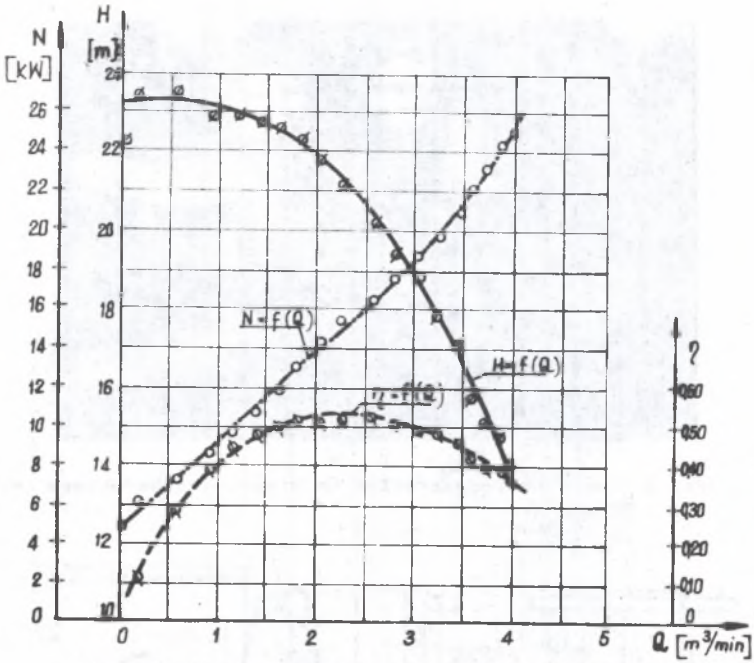


Rys. 4. Pompa eksperymentalna na stanowisku badawczym (widok)



Rys. 5. Rozmieszczenie otworków impulsowych

Kompletną charakterystykę pompy, (krzywe: przepływu H = f(Q), mocy N=f(Q) i sprawności η = f(Q)) przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Charakterystyki pompy eksperymentalnej

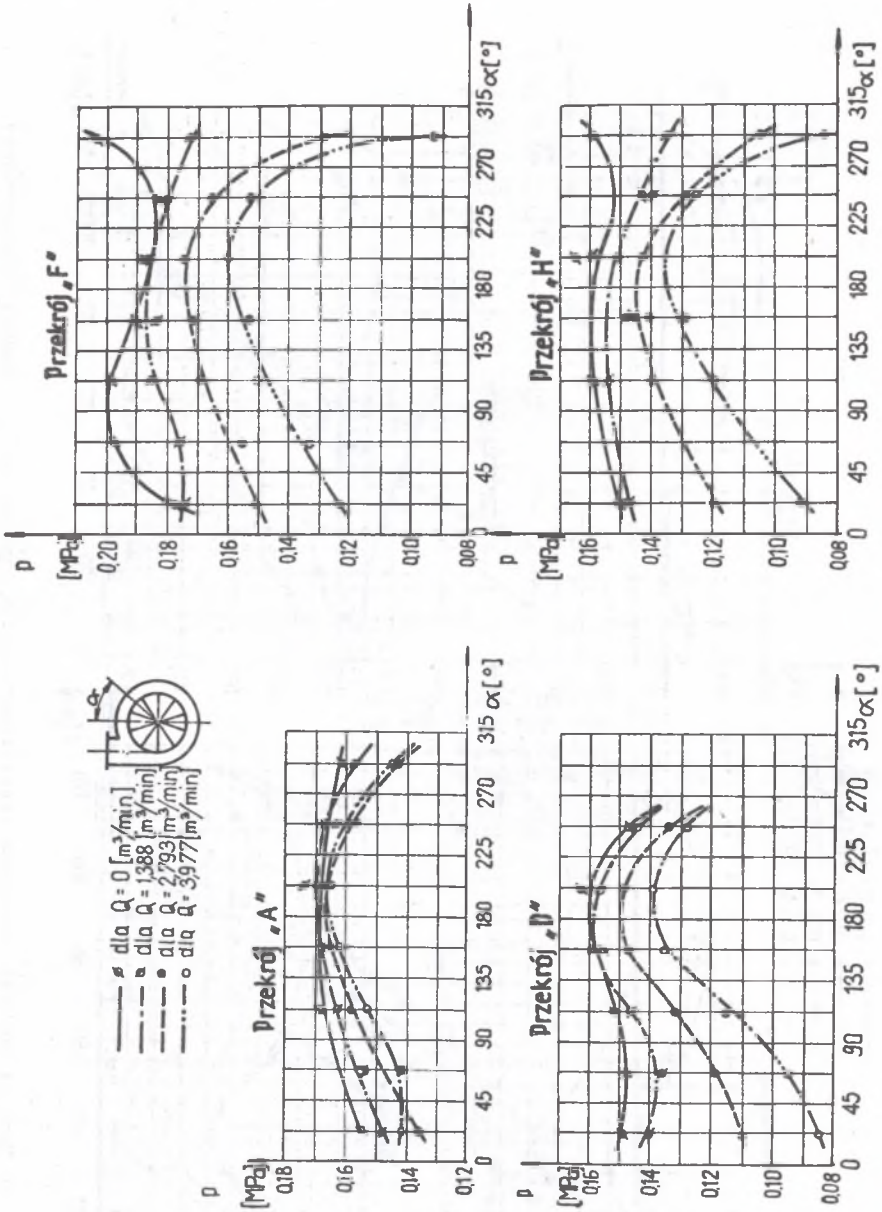
Wyniki pomiaru rozkładu ciśnień zdecydowano przeanalizować przy wydajnościach Q = 0; 1,39; 2,79 i 3,98 m^3/min, które stanowiły odpowiednio 0; 0,5; 1,0 i 1,4 Q_{opt} (wydajności optymalnej pompy).

W wyniku pomiarów stwierdzono, że rozkład ciśnienia na powierzchni wnęki kadłuba i komory bezłopatkowej jest (zgodnie z wcześniejszymi przewidywaniami) złożony.

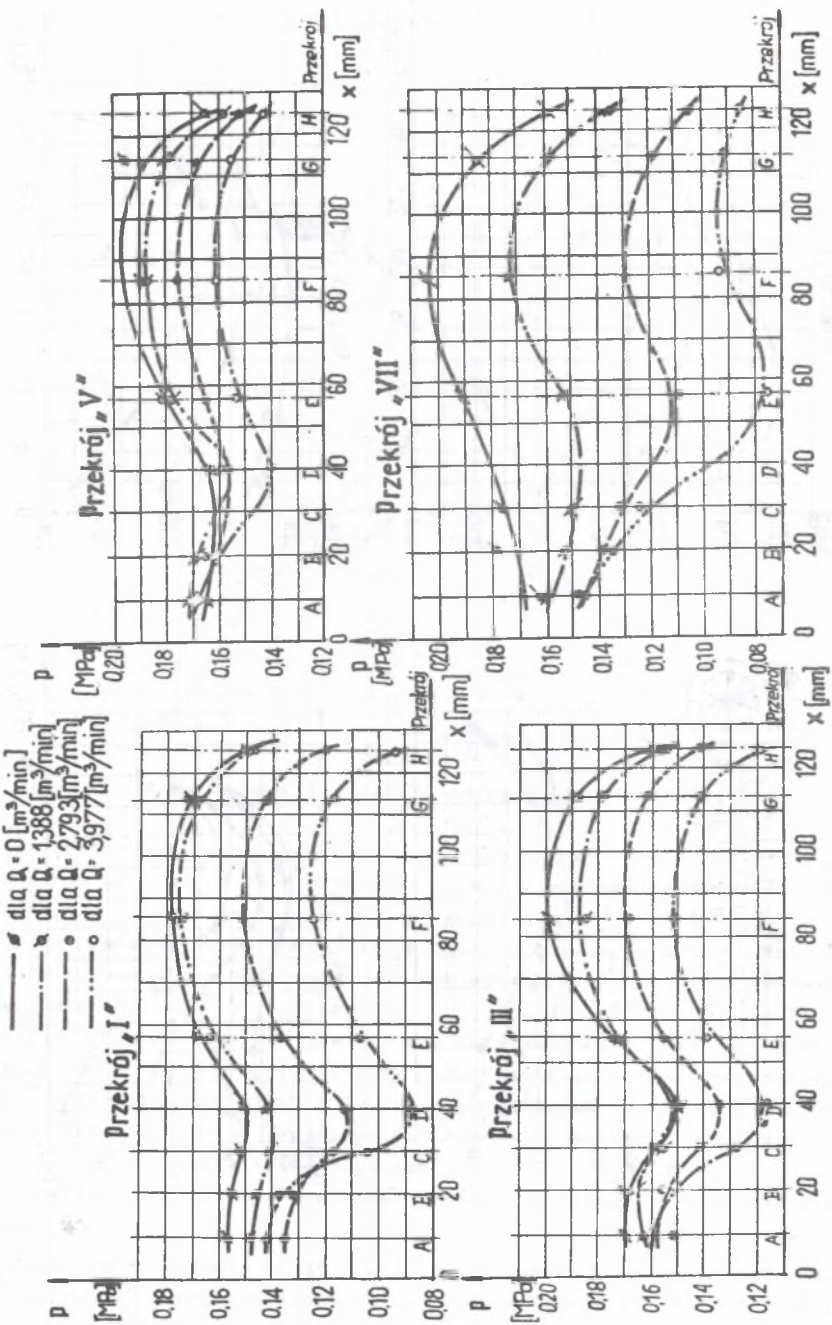
Na rysunku 7 przedstawiono rozkład ciśnienia wzdłuż obwodu dla przekrojów pomiarowych A, D, F i H. Na rysunku 8 natomiast przedstawiono rozkład ciśnienia wzdłuż konturu wnęki i komory w przekrojach I, III, V i VII. Dodatkowo na rysunkach 9a-9d przedstawiono rozkłady ciśnień w przekrojach I, III, V i VII w funkcji wydajności pompy.

Z analizy przytoczonych rozkładów ciśnień wynikają następujące stwierdzenia:

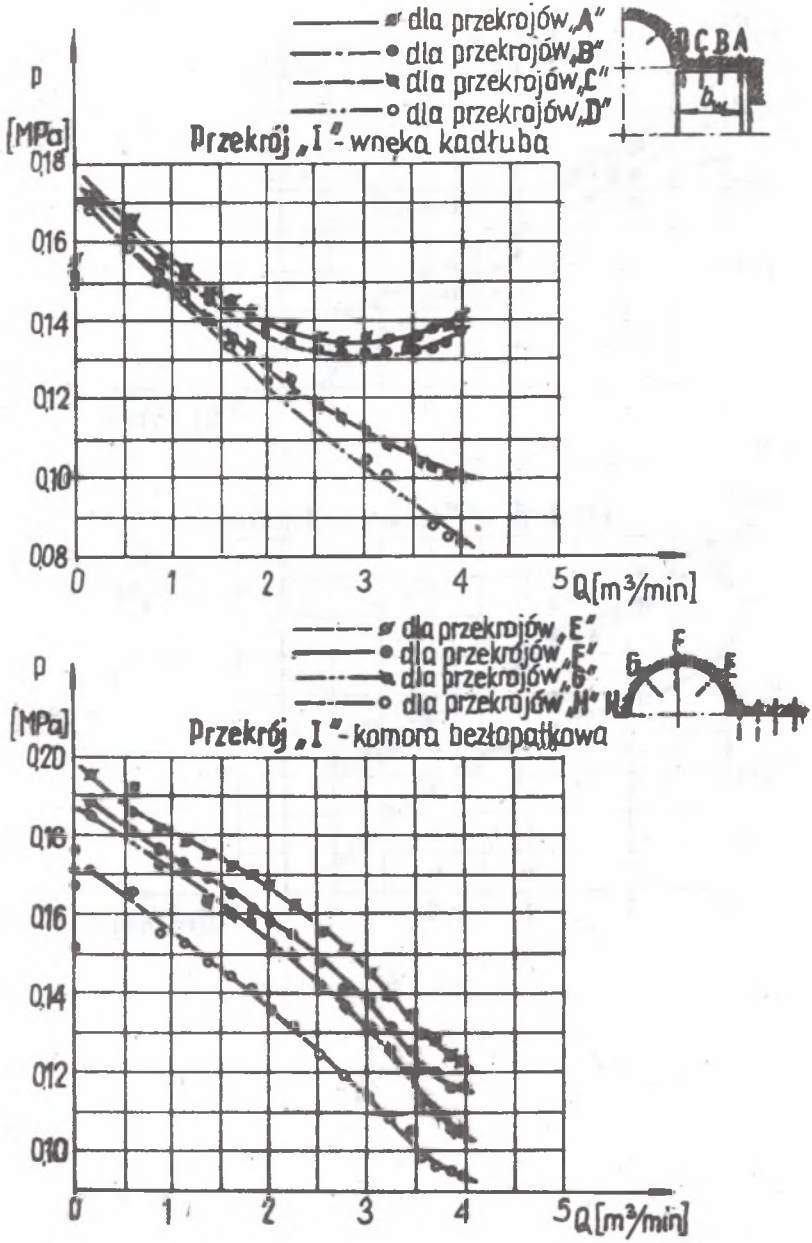
- wzdłuż obwodu zarówno wnęki jak i komory rozkład ciśnienia jest zmienny, zaobserwować można występowanie maksimum w przedziale 160-200 deg (a więc w dolnej części obwodu), które szczególnie wyraźnie występują przy wy-



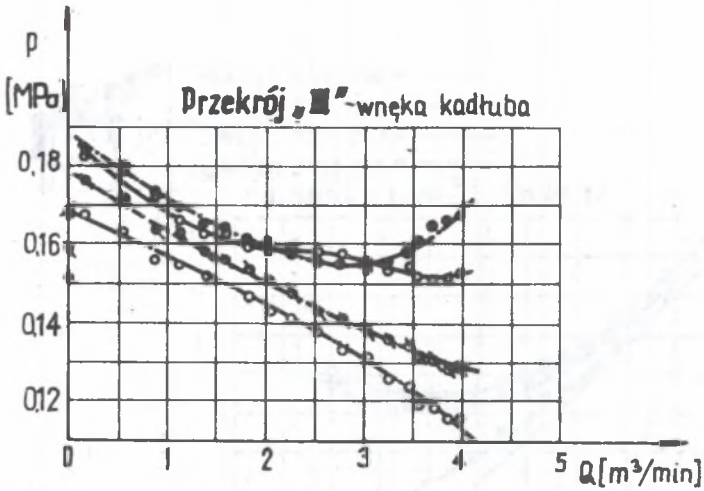
Rys. 7. Rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż obwodu wnęki i komory bezłopatkowej

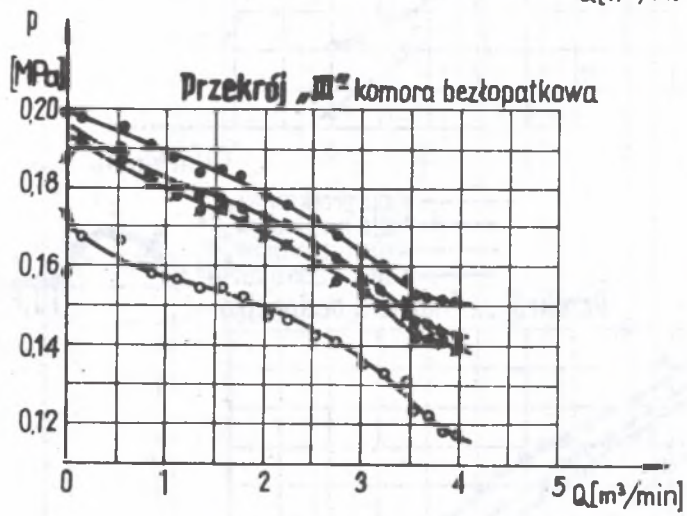


Rys. 8. Rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż konturu wnęki i komory bezłopatkowej

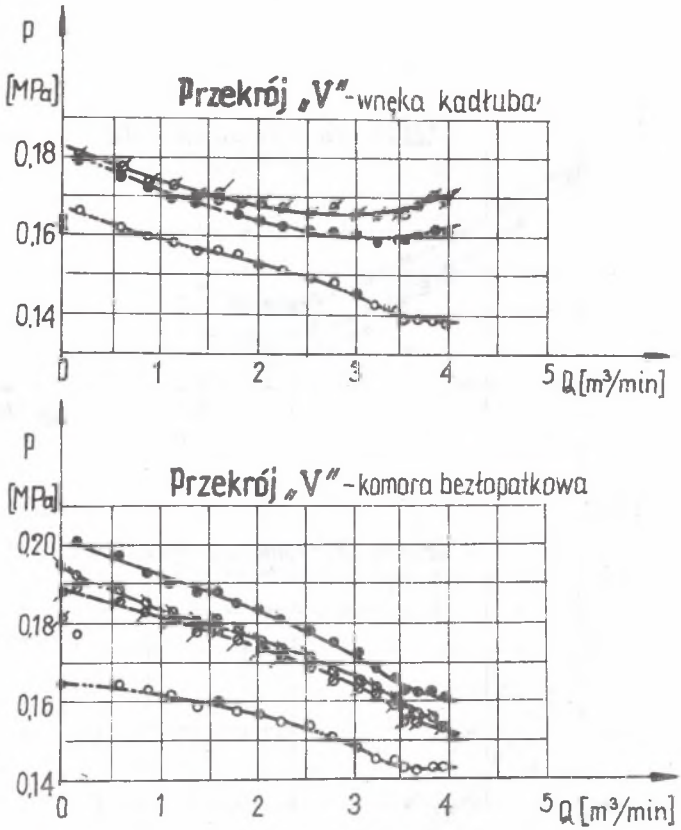

dla przekrojów „A"
dla przekrojów „B"
dla przekrojów „C"
dla przekrojów „D"
D C B A
p
[MPa]
Przekrój „I" - wnęka kadłuba
0,18
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0
1
2
3
4
5
Q[m³/min]
dla przekrojów „E"
dla przekrojów „F"
dla przekrojów „G"
dla przekrojów „H"
F
G
E
H
p
[MPa]
Przekrój „I" - komora bezłopatkowa
0,20
0,18
0,16
0,14
0,12
0,10
0
1
2
3
4
5
Q[m³/min]

Rys. 9a

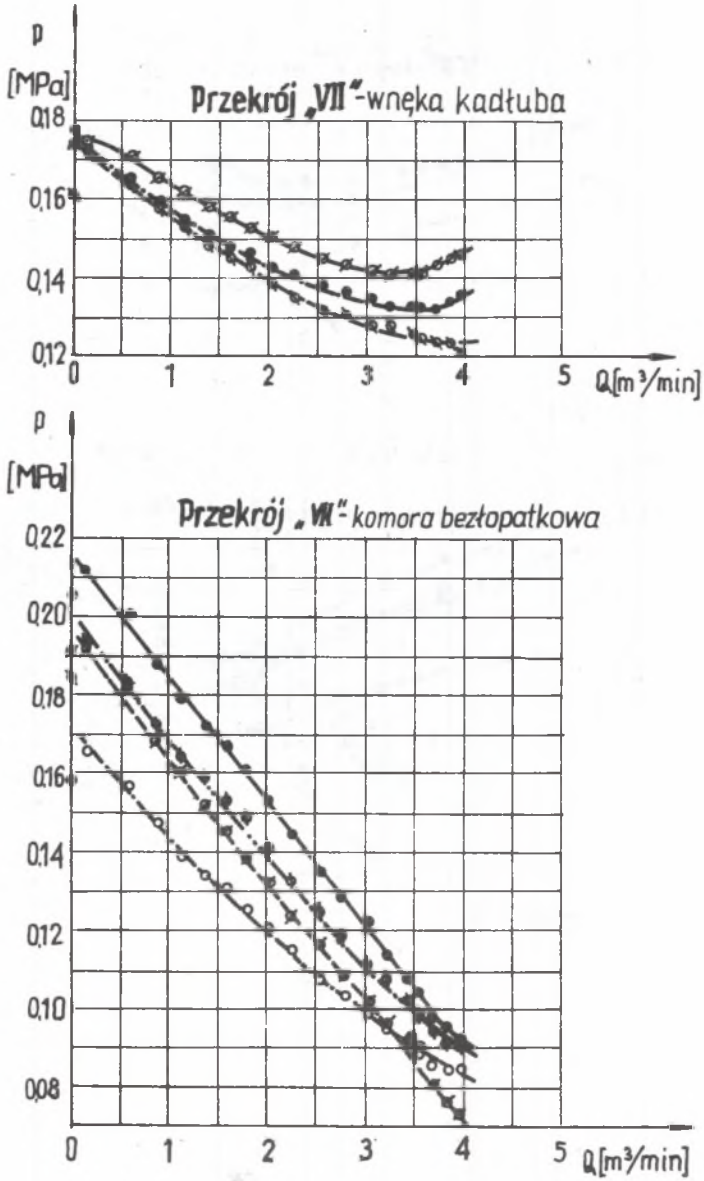

p
[MPa]
Przekrój „II"-wnęka kadłuba
0,18
0,16
0,14
0,12
0
1
2
3
4
5
Q[m³/min]


p
[MPa]
Przekrój „III"-komora bezłopatkowa
0,20
0,18
0,16
0,14
0,12
0
1
2
3
4
5
Q[m³/min]

Rys. 9b


p
[MPa]
Przekrój „V"-wnęka kadłuba
0,18
0,16
0,14
0
1
2
3
4
5
Q [m³/min]
p
[MPa]
Przekrój „V"-komora bezłopatkowa
0,20
0,18
0,16
0,14
0
1
2
3
4
5
Q [m³/min]

Rys. 9c



Rys. 9d

Zmienność rozkładu ciśnienia na powierzchni wnęki i komory w zależności od wydajności pompy

dajnościach zbliżonych i większych od wydajności optymalnej. Zmianę ciśnienia wzdłuż obwodu można wyjaśnić oddziaływaniem dyfuzora pompy w okolicy dopływu którego następuje rozdział cieczy na strumień wypływający i cyrkulujący w płaszczyźnie prostopadłej do osi pompy.

- Ciśnienie zmienia się również wzdłuż tworzącej wnęki cylindrycznej. Zmniejsza się ono w stronę płaszczyzny wypływowej wirnika. Gradient spadku ciśnienia jest szczególnie silny w przekrojach przylegających do króćca wypływowego. Można to tłumaczyć oddziaływaniem lokalnego spadku ciśnienia w komorze bezłopatkowej w okolicy króćca.
- W przekroju południkowym komory bezłopatkowej maksymalne ciśnienie występuje na największej średnicy komory.
- Ze wzrostem wydajności pompy ciśnienie w poszczególnych punktach wnęki i komory maleje. Jedynie w przypadku punktów położonych na powierzchni wnęki blisko tarczy wirnika można dla wydajności przewyższających optymalną zaobserwować stabilizację lub nawet nieznaczny wzrost ciśnienia.

Wyniki pomiarów wskazują ponadto na równość ciśnień w odpowiadających sobie punktach pomiarowych w płaszczyznach D i H. Potwierdza to pośrednio tezę o wyrównaniu się składowych obwodowych prędkości cieczy w komorze bezłopatkowej na danym promieniu. Nie wiadomo jednak czy takie wyrównanie prędkości wystąpiłoby również w przypadku pompy z komorą bezłopatkową o większej szerokości.

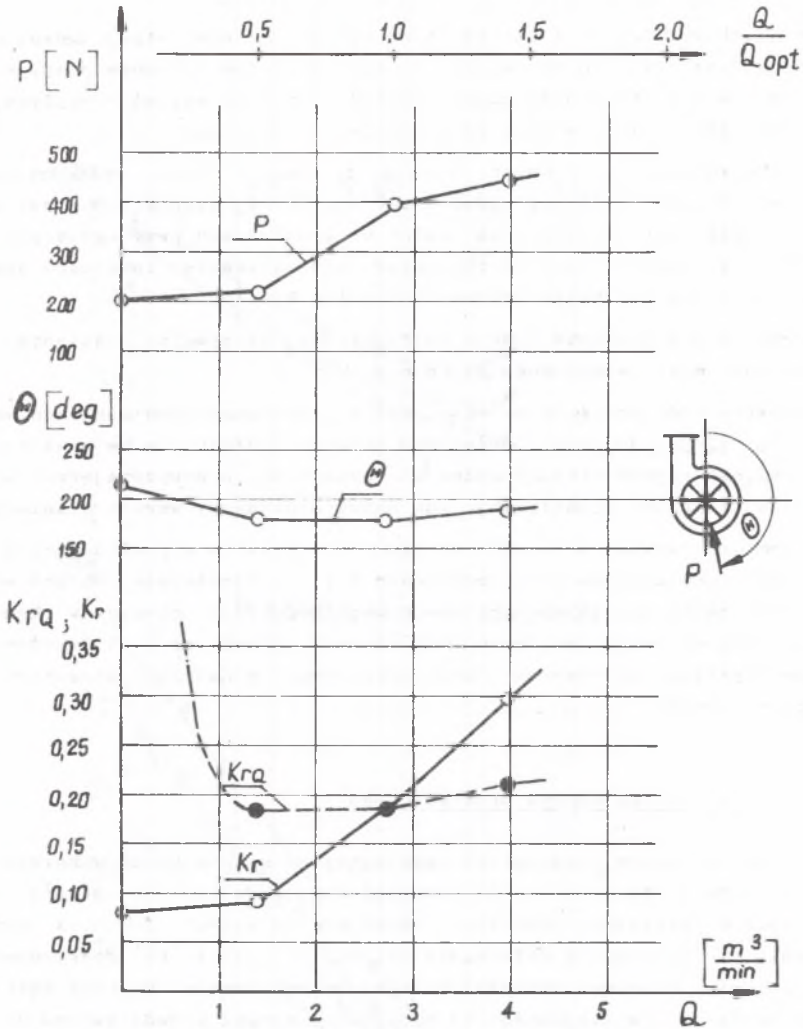
4. Określenie i ocena naporu promieniowego

Aby określić napór promieniowy działający na wirnik pompy wykorzystano zależności (5a), (5b), (6) i (7), uwzględniając, że funkcja $p(1,\vartheta)$ dana jest w sposób dyskretny. Określenie zależności ciągłych dokonano metodą wyrównania graficznego, a całkowanie zależności (5a) i (5b) przeprowadzono numerycznie. Uzyskane wartości nacisku promieniowego P oraz kąta jego nachylenia θ (w zależności od wydajności pompy) przedstawiono na rysunku 10. Na tym samym rysunku przedstawiono również zależność od wydajności bezwymiarowego wyróżnika naporu promieniowego K_r, zdefiniowanego następująco:

$$K_r = \frac{P}{g \rho H d_w (b_w + g_w)}, \tag{9}$$

gdzie:

g - stała przyspieszenia ziemskiego,
ρ - gęstość pompowanej cieczy,
d_w - średnica zewnętrzna wirnika,
H - użyteczna wysokość podnoszenia pompy.



Rys. 10. Zależność naporu promieniowego, kierunku jego działania i wyróżników bezwymiarowych naporu od wydajności pompy

Z analizy danych na rysunku 10 wynika, że:

- napór promieniowy zwiększa się w całym przedziale ze wzrostem wydajności pompy około dwukrotnie (w stosunku do wartości osiąganej przy zamkniętej zasuwie),
- kierunek naporu promieniowego nie ulega w miarę wzrostu wydajności istotniejszym zmianom, co pośrednio dowodzi, że wywołuje go ta sama przyczyna (oddziaływanie króćca tłocznego),

- wyróżnik naporu promieniowego K_r wzrasta silnie w miarę zwiększania się wydajności pompy.

Aby porównać napór promieniowy w pompie o swobodnym przepływie i pompie odśrodkowej z kanałem zbiorczym o stałym przekroju, określono wartości współczynnika naporu K_{rQ} wynikającego z zależności:

$$P = K_{rQ}\left(\frac{Q}{Q_{opt}}\right) g\varrho \; d_w(b_w + g_w) \tag{10}$$

sformułowanej analogicznie jak w monografii [4]. Zależność $K_{rQ} = f(Q)$ przedstawiono również na rysunku 10.
Wielkości K_r i K_{rQ} wiąże zależność:

$$K_{rQ} = K_r \frac{Q_{opt}}{Q}. \tag{11}$$

Znamienne jest, że w zakresie wydajności $Q > 0,5\, Q_{opt}$ wartość współczynnika K_{rQ} jest praktycznie stała i wynosi około 0,2. Wartość współczynnika K_{rQ} jest więc w przypadku pomp o swobodnym przepływie prawie o połowę mniejsza niż w przypadku pomp odśrodkowych z kanałem zbiorczem o stałym przekroju, dla których to wartość współczynnika K_{rQ} wynosi 0,36 [4]. W tej samej proporcji można więc oczekiwać zmniejszenia naporu promieniowego w pompach o swobodnym przepływie, niemniej zgodnie z przewidywaniami napór promieniowy będzie występował.
Oszacowano, że ze względu na zastosowany sposób określania nacisku promieniowego - dokładność jego wyznaczenia można przyjąć z błędem względnym w granicach: $\pm$ 15%.

Można przypuszczać, że ponieważ źródłem powstania naporu promieniowego w pompie o swobodnym przepływie są procesy hydrodynamiczne w kanale zbiorczym o stałym przekroju, przeto również i w przypadku pomp z wirnikiem wysuniętym w przestrzeń bezłopatkową wystąpi napór promieniowy na wirnik.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary pozwoliły ustalić, że na wirnik pompy o swobodnym przepływie działa napór promieniowy, stanowiący przeszło połowę naporu działającego na wirnik pompy odśrodkowej o identycznych głównych wymiarach i takiej samej wysokości podnoszenia. W przypadku pomp na większe wysokości podnoszenia wartość tego naporu może przyjmować znaczne wartości i powinna być uwzględniona w obliczeniach, zwłaszcza że występuje jako maksimum przy optymalnej wydajności pompy, a pamiętać trzeba, że wysokość podnoszenia pomp o swobodnym przepływie może sięgać stu metrów.

Artykuł nie wyczerpuje zagadnienia, gdyż można przypuszczać, że wartości współczynników naporu w ogólności powinny być funkcją geometrycznych

cech konstrukcyjnych pompy, a zwłaszcza szerokości łopatek i szerokości przestrzeni bezłopatkowej. Może to stać się tematem dalszych badań.

LITERATURA

[1] Egger E.: Einsatz von Turo-Pumpen in der Industrie mit spezieller Berücksichtigung des Einsatzes für stark schleissende Fördergüter, Pumpen und Verdichter, Internationale Symposium, Leipzig 1967.

[2] Rokita J.: Wpływ geometrycznych cech konstrukcyjnych na parametry pracy pomp o swobodnym przepływie. Dysertacja doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1971 (maszynopis).

[3] Hupa B.: Pomiary rozkładu ciśnienia statycznego na powierzchni wnęki kadłuba oraz swobodnej przestrzeni przepływowej pompy o swobodnym przepływie. Praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem J. Rokity. Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice 1976 (maszynopis).

[4] Stepanoff A.J.: Centrifugal and axial flow pumps, John Wiley Inc. New York 1956.

Recenzent: doc. dr inż. Janusz Rydlewicz

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1981 r.

ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОГО НАПОРА В НАСОСЕ ОБЛАДАЮЩИМ СВОБОДНЫМ ТЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВАНИИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ РОТОРА И БЕЗЛОПАСТНОЙ КАМЕРЫ

Р е з ю м е

В настоящей работе были указаны причины появления радиального напора в насосах обладающих свободным течением. Была определена его связь с распределением давления на поверхности цилиндрической полости. Были представлены результаты исследований распределения давления на поверхности цилиндрической полости и безлопастного пространства. Была определена оценка величины радиального напора действующего на ротор насоса насоса обладающего свободным течением.

ESTIMATING RADIAL PRESSURE IN A PUMP OF FREE FLOW ON THE BASIS OF A MEASUREMENT OF THE PRESSURE DISTRIBUTION ON A WALL OF ROTOR'S CAVITY AND OF A CHAMBER WITHOUT A VANE

S u m m a r y

Causes of radial pressure in pumps of free flow are indicated in the article. Its relation to the pressure distribution on the surface of the cylindrical cavity and on the space without a vane has been determined. The quantity of radial pressure acting on the rotor of the pump of free flow has been determined and estimated.