

Maciej ZARZYCKI, Jan DĘBIEC,
Jerzy GRZYCHOWSKI, Jerzy ROKITA

BADANIA NAD NAPONEM OSIOWYM W POMPIE ODŚRODKOWEJ
Z WIRNIKIEM JEDNOSTRONNIE OTWARTYM

Streszczenie. Omówiono szczegółowo budowę układu pomiarowego, umożliwiającego pomiar naporu osiowego w pompie odśrodkowej z wirnikiem jednostronnie otwartym. Podano wyniki badań naporu osiowego działającego na wirnik otwarty z otworami odciążającymi i bez tych otworów. Wskazano na celowość stosowania otworów odciążających w wirniku odśrodkowym jednostronnie otwartym. Przeanalizowano uzyskane rezultaty.

Wprowadzenie

W Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, od szeregu lat prowadzone są kompleksowe prace nad problemem naporów osiowych w pompach wirowych [1, 2, 3, 4]. Jednym z etapów tych prac były badania nad wielkością naporów osiowych w pompach krętnych odśrodkowych z wirnikami jednostronnie otwartymi, które zostaną omówione w niniejszej pracy.

Szerokie zastosowanie w przemyśle znajdują pompy odśrodkowe z wirnikiem otwartym. Odnaczają się one korzystnymi zaletami eksploatacyjnymi, jak: relatywnie wysokimi sprawnościami, możliwością czyszczenia kanałów międzyłopatkowych i pokrywania ich wykładziną ochronną oraz uproszczoną technologią wykonawstwa. Natomiast w porównaniu z wirnikami odśrodkowymi zamkniętymi, w wirnikach odśrodkowych jednostronnie otwartych zwiększa się (działający w tym samym kierunku) napór osiowy, ponieważ siła działająca na zewnętrzną powierzchnię tylnej tarczy wirnika jest w mniejszym stopniu równoważona przez siłę działającą od strony kanałów międzyłopatkowych.

Napór osiowy działający na wirnik otwarty zależy również od szerokości szczeliny między łopatkami, a ścianką osłony wirnika.

Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie nad wpływem szczeliny nadłopatkowej na parametry pracy i przebieg charakterystyk pompy [5]. Natomiast rozważania i badania nad wielkością naporu osiowego w pompach odśrodkowych z wirnikami otwartymi nie były dotychczas szerzej prowadzone, jednak na uwagę zasługują stwierdzenia przytoczone w pracy [6].

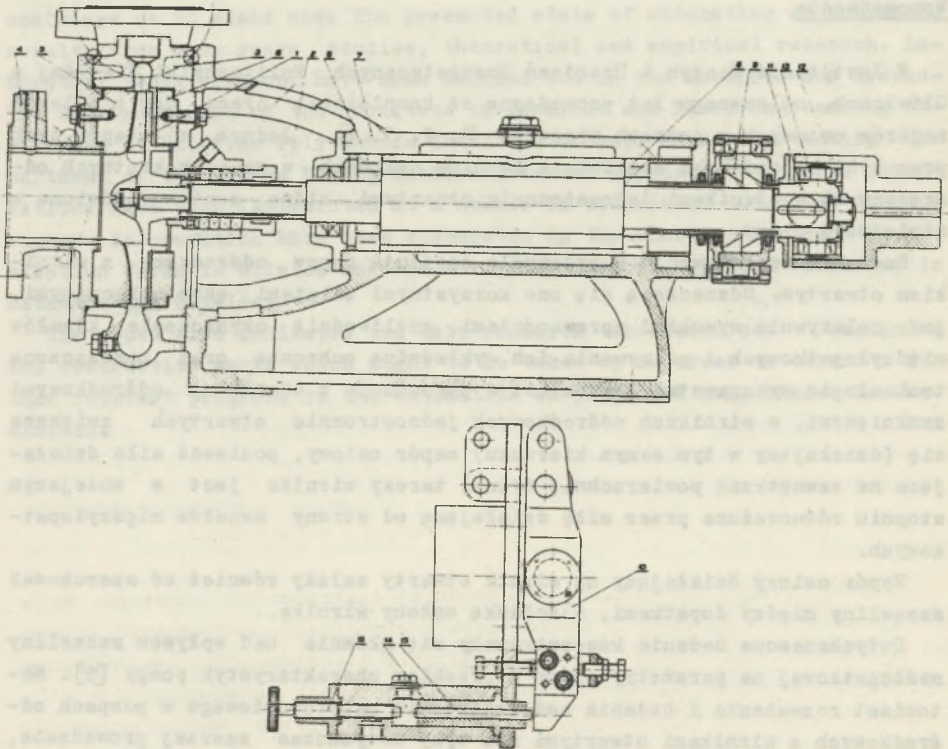
Aby wyjaśnić bliżej problem naporów osiowych w pompach odśrodkowych z wirnikami jednostronnie otwartymi, zdecydowano przeprowadzić własne badania w tym zakresie.

1. Konstrukcja pompy eksperymentalnej

Aby przeprowadzić badania nad wielkością naporu osiowego w wirniku otwartym, dostosowano do celów pomiarowych seryjnie produkowaną pompę odśrodkową o optymalnych parametrach pracy:

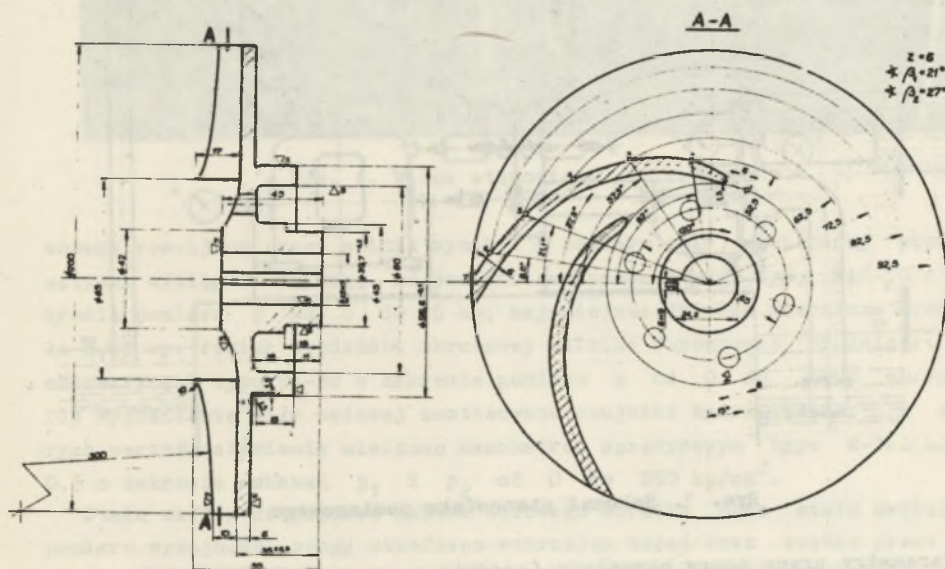
- | | |
|------------------------|------------------------------|
| - wydajność | $Q = 750 \text{ l/min,}$ |
| - wysokość podnoszenia | $H = 34 \text{ m,}$ |
| - prędkość obrotowa | $n = 2850 \text{ min}^{-1},$ |
| - sprawność | $\eta = 0,56.$ |

Rozwiązanie konstrukcyjne pompy po jej przystosowaniu do pomiarów przedstawiono na rysunku 1 (przy czym poszczególne elementy pompy oznaczono kolejnymi numerami).



Rys. 1. Pompa eksperymentalna (w przekroju)

Wał pompy 2 ułożyskowano poprzecznie w dwu łożyskach wałeczkowych 8, w których mógł on się przesuwac w kierunku wzdłużnym z minimalnymi oporami tarcia. Zespół wirujący ustalono wzdłużnie w dwu łożyskach kulkowych skośnych 9 umieszczonych wahliwie w dźwigni 10, której jeden koniec został połączony przegubowo z wspornikiem łożyskowym 7, a drugi oparty jednostronnie na tłoczku 15 cylindra olejowego 14, połączonego z manometrem. W takiej sytuacji wskazania manometru były proporcjonalne do naporu osiowego działającego na wirnik pompy. Śruba regulacyjna 16 umieszczona w cylindrze, wskaźnik przesuwu wału i czujnik mikrometryczny pozwalały ustawiać wirnik przy zadanej wartości szczeliny między łopatkami, a tarczą uszczelniającą wirnik 5. W celu uniknięcia zjawiska obliteracji i powodowanych przez nie błędów, tłoczek wprawiano w trakcie pomiarów w nieprzerwanie trwający ruch wahadłowy (co zrealizowano oddzielnym układem napędzającym korobowo-dźwigniowym).



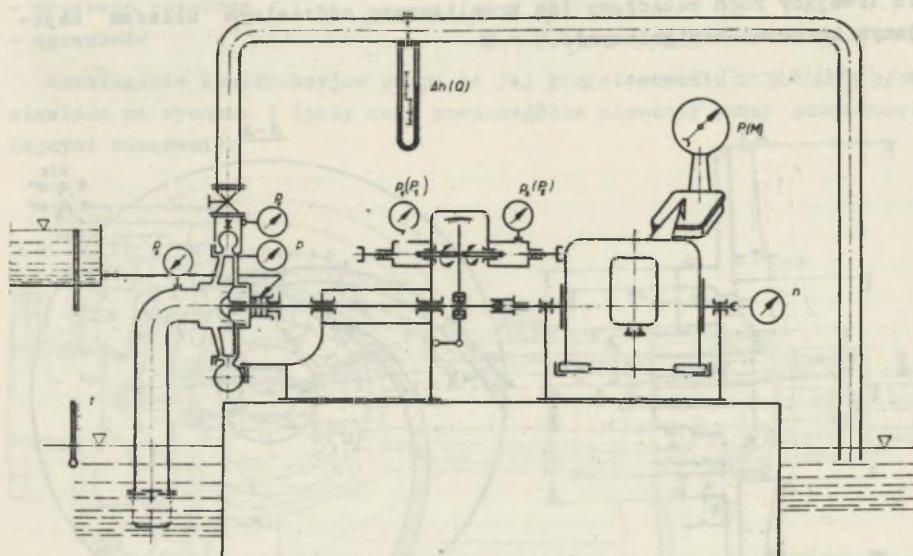
Rys. 2. Wirnik otwarty stosowany w badaniach

Ponieważ warunkiem uzyskania odpowiedniej dokładności pomiarów było umożliwienie wzdłużnych przesunięć zespołu wirującego, zastosowano sprzęgło specjalnej konstrukcji. Zabierak sprzęgła 11 połączony z wałem pompy mógł się przesuwac swobodnie we wzdłużnie wykonanych rowkach obudowy 12, osadzonej na wale silnika napędzającego. Aby zmniejszyć opory przesuwu, moment z obudowy sprzęgła przekazywany był na zabierak, za pośrednictwem pary łożysk kulkowych 13.

Wirnik 1 jednostronnie otwarty przygotowany do badań przedstawiono na rysunku 2, w celu zaprezentowania jego głównych wymiarów. Pozostałe szczególności konstrukcyjne pompy wynikają jednoznacznie z rysunków 1 i 2.

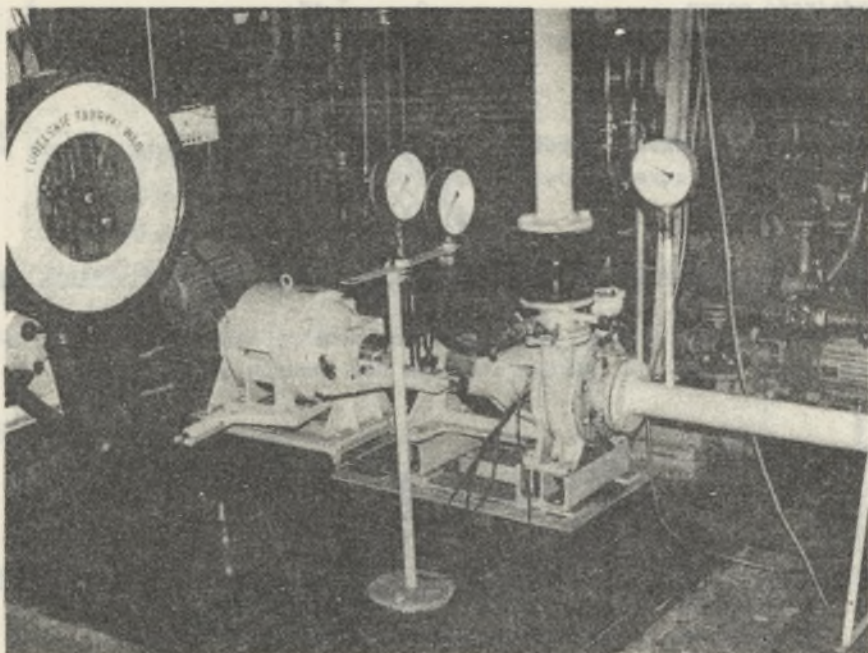
2. Stanowisko pomiarowe

Do badań przystosowano pompę typu ONR-65 i zainstalowano w układzie przedstawionym na rysunku 3. Widok ogólny stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Parametry pracy pompy określano (zgodnie z normą PN-65/M-44002) za pomocą odpowiednich przyrządów pomiarowych. W celu określenia wydajności pompy, na rurociągu tłocznym zainstalowano zwężkę pomiarową w postaci kryzki ostrokrawędziowej. Spadki ciśnienia Δh na kryzce za pomocą manometru różnicowego typu MU-10 wypełnionego rtęcią. Wysokość podnoszenia pompy określano na podstawie wskazań manometrów sprężynowych. Na króćcu ssawnym zainstalowano manometr klasy 1,6 o zakresie wskazań p_s od -1 do $+1$ kp/cm², natomiast na króćcu tłocznym manometr typu M-160 klasy 0,5 o zakresie wskazań p_t od 0 do 10 kp/cm². Moc na wale pompy wyznaczano pośrednio określając moment rozwijany przez silnik napędzający i mierząc prędkość obrotową. W tym celu zastosowano zawieszenie wahlne silnika, a



Rys. 4. Widok stanowiska pomiarowego

moment rozwijany przez silnik wynikał z pomiaru siły wywieranej poprzez sztywny wysięgnik na wagę. Do pomiaru zastosowano wagę typu WAP-50 o zakresie pomiaru p od 0 do 25 kp; najmniejsza działka miernicza wynosiła 0,02 kp. Pomiar prędkości obrotowej silnika dokonywano prądniczką tachometryczną typu TP-28 o zakresie pomiaru n od 0 do 4000 obr/min. Dla wyznaczenia siły osiowej zastosowano czujniki hydrauliczne, w których wartość ciśnienia mierzono manometrem sprężynowym typu M-160 klasy 0,5 o zakresie wskazań p_1 i p_2 od 0 do 250 kp/cm².

Stałą układu do pomiaru naporu osiowego wirnika oraz stałą zwięzki do pomiaru wydajności pompy określano wzorcując układ oraz zwięzkę przed pomiarem. Dla przyjętych cech geometrycznych czujnika stała wynosiła $k_1 = 1,63$. Dławnica pompy zasilana była w czasie pomiaru wodą o stałym napływie wynoszącym 0,6 m. Położenie zespołu wirującego, a tym samym wartość szczeliny osiowej w pompie, ustalano czujnikiem sprężynowym. W czasie pracy pompy równoważono siłę pochodzącą od naporu osiowego ciśnieniem oleju działającego na tłoczek czujnika tak, aby jednocześnie dźwignia działająca na tłoczek znajdowała się w określonym położeniu odpowiadającym wymaganej wartości szczeliny osiowej.

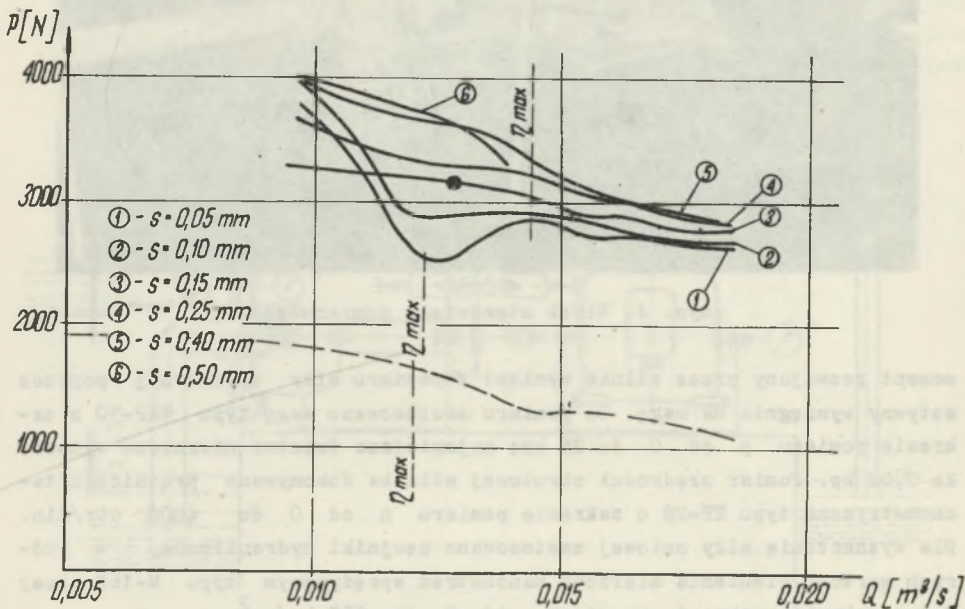
Dobór przyrządów i metod pomiarowych umożliwił określenie mierzonych lub wyznaczanych wielkości z następującą dokładnością:

- wydajność pompy	Q	$\pm 1\%$
- wysokość podnoszenia pompy	H	$\pm 1,5\%$
- sprawność pompy	η	$\pm 2\%$
- napór osiowy	P	$\pm 2\%$

odniesioną do prędkości obrotowej wału $n = 2900 \text{ min}^{-1}$. Jako czynnik pompowany stosowano czystą wodę o temperaturze otoczenia.

3. Wyniki badań wirnika otwartego jednostronnie bez otworów odciążających

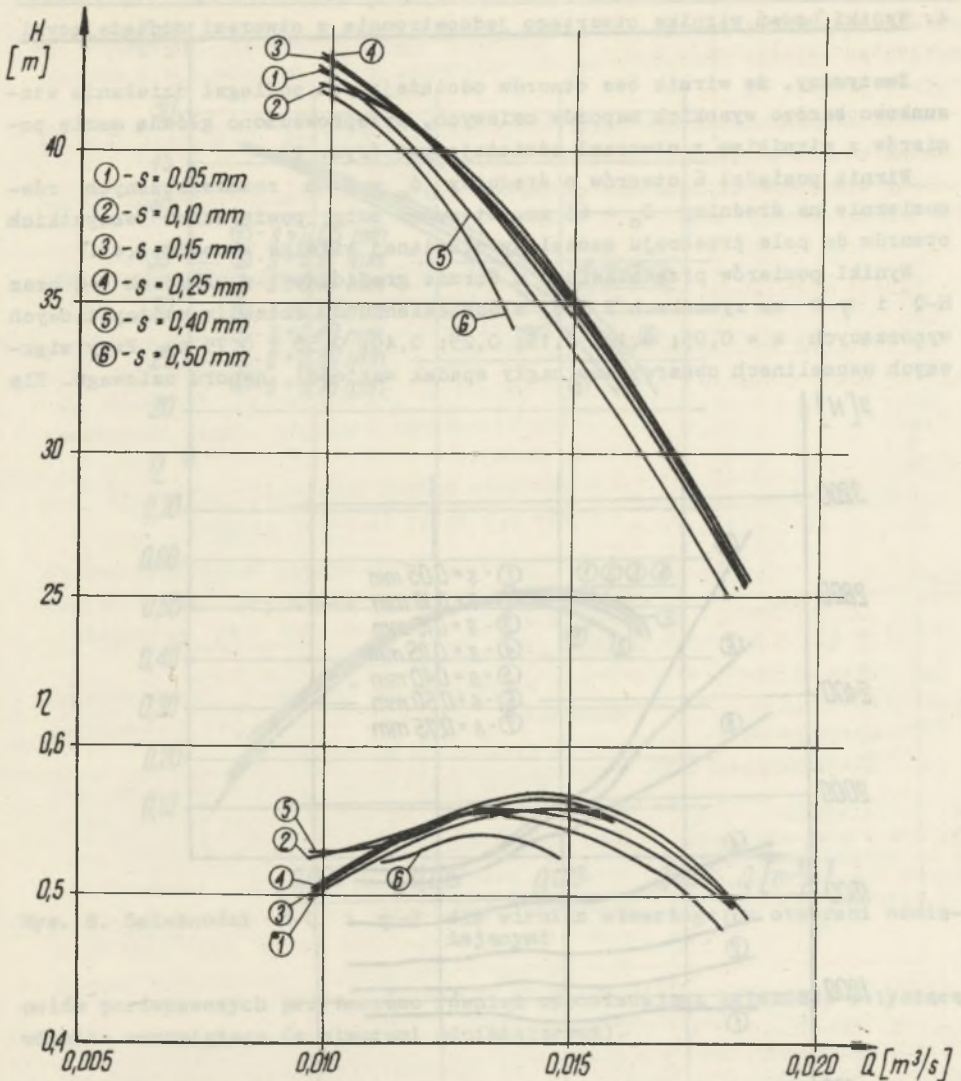
W wstępnym etapie badań przeprowadzono pomiary naporu osiowego i parametrów pracy pompy z wirnikiem otwartym bez otworów odciążających.



Rys. 5. Zależność P-Q dla wirnika otwartego bez otworów odciążających (linią przerywaną przedstawiono zależność dotyczącą identycznego wirnika budowy zamkniętej bez otworów odciążających). Punktem oznaczono napór osiowy obliczony na podstawie zależności podanej w pracy [6]

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie graficznej w układach P-Q oraz H-Q i η -Q na rysunkach 5 i 6, ograniczając się do zakresu wydajności odpowiadającemu obszarowi maksymalnej sprawności.

Pomiary naporu osiowego przy wydajnościach bliskich zeru nie były możliwe do przeprowadzenia, ze względu na znaczny wzrost naporu osiowego i występowanie odkształceń w układzie pomiarowym, które przekraczały wartości dopuszczalne.



rys. 6. Zależności $H-Q$ i $\eta-Q$ dla wirnika otwartego bez otworów odciążających

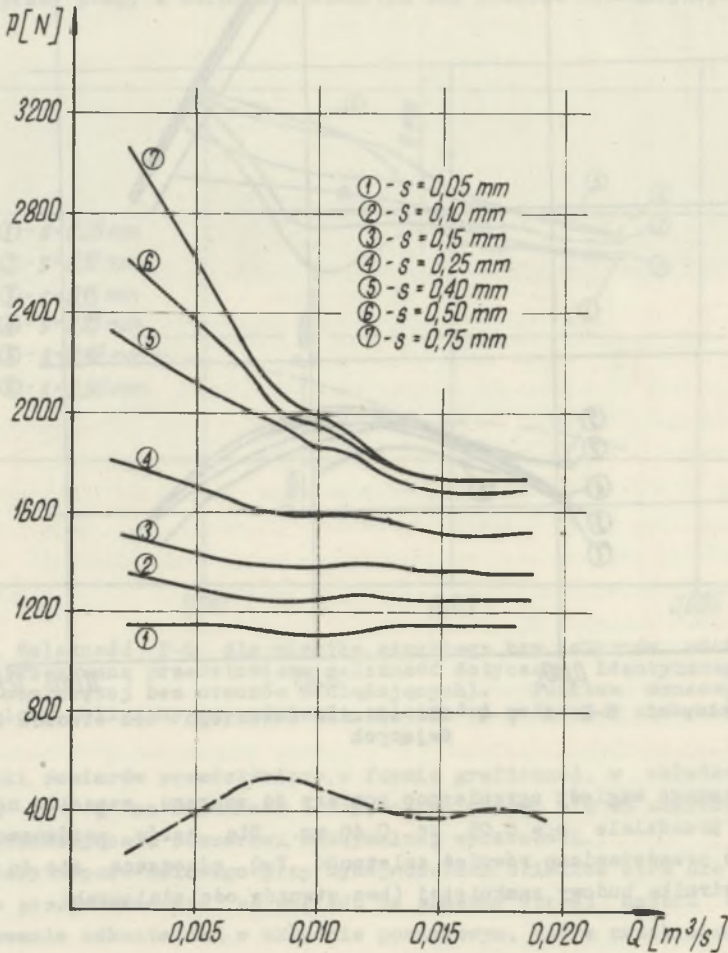
Z tegoż samego względu ograniczono pomiary do zakresu szczelin nadłopatkowych w przedziale $s = 0,05$ do $0,40 \text{ mm}$. Dla celów porównawczych na rysunku 5 przedstawiono również zależność $P-Q$ odnoszącą się do analogicznego wirnika budowy zamkniętej (bez otworów odciążających).

4. Wyniki badań wirnika otwartego jednostronnie z otworami odciążającymi

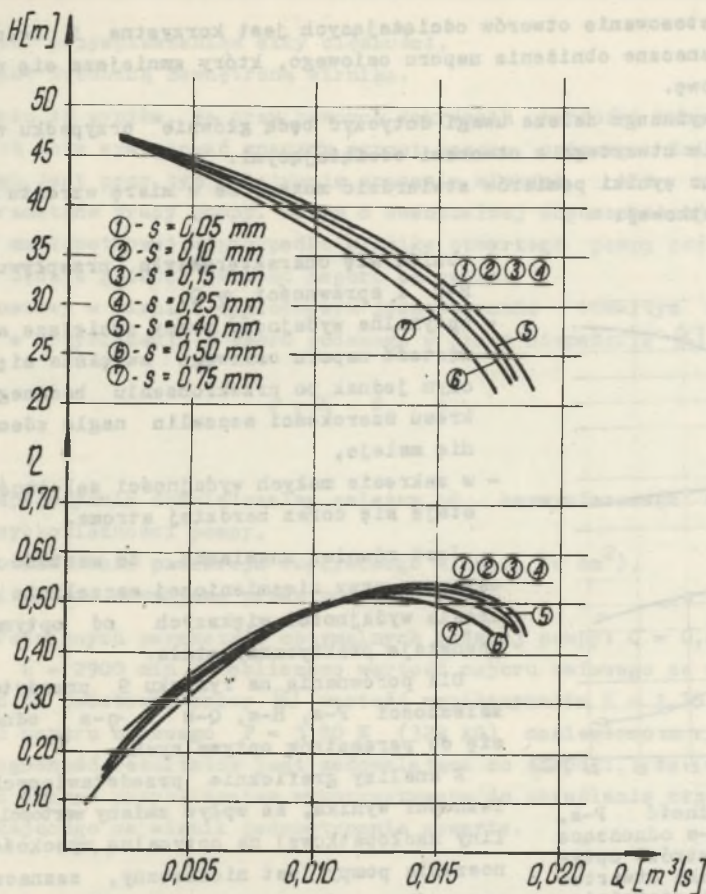
Zważywszy, że wirnik bez otworów odciążających podlegał działaniu stosunkowo bardzo wysokich naporów osiowych, przeprowadzono główną serię pomiarów z wirnikiem z otworami odciążającymi (rys. 2).

Wirnik posiadał 6 otworów o średnicy $d_o = 8$ mm rozmieszczonych równomiernie na średnicy $D_o = 65$ mm. Stosunek pola powierzchni wszystkich otworów do pola przekroju szczeliny dławiącej wirnika wynosił 3,43.

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie graficznej w układach P-Q oraz H-Q i η -Q na rysunkach 7 i 8, w odniesieniu do szczelin nadłopatkowych wynoszących $s = 0,05; 0,10; 0,15; 0,25; 0,40; 0,50$ i $0,75$ mm. Przy większych szczelinach obserwowano nagły spadek wartości naporu osiowego. Dla



Rys. 7. Zależność P-Q dla wirnika otwartego z otworami odciążającymi (linią przerywaną przedstawiono zależność dotyczącą identycznego wirnika budowy otwartej z otworami odciążającymi)



Rys. 8. Zależności $H-Q$ i $\eta-Q$ dla wirnika otwartego z otworami odciążającymi

celów porównawczych przytoczono również odpowiadającą zależność dotyczącą wirnika zamkniętego (z otworami odciążającymi).

5. Analiza uzyskanych rezultatów

Na podstawie badań stwierdzono, że napór osiowy działający w pompie odśrodkowej z wirnikiem jednostronnie otwartym jest przeciętnie 2 do 4 razy większy od naporu osiowego działającego na identyczny wirnik budowy zamkniętej pracujący przy tych samych parametrach.

Dlatego też napór osiowy działający na wirnik odśrodkowy jednostronnie otwarty jest wysoki i wirnik taki powinien zostać odciążony.

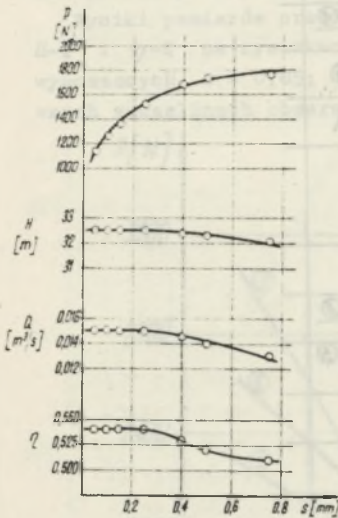
Z porównania uzyskanych rezultatów pomiarów naporów osiowych działających na wirnik jednostronnie otwarty z otworami odciążającymi i bez nich

wynika, że stosowanie otworów odciążających jest korzystne i celowe ze względu na znaczne obniżenie naporu osiowego, który zmniejsza się wówczas o około połowę.

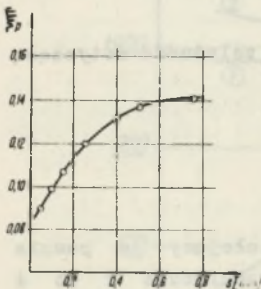
Wobec powyższego dalšie uwagi dotyczyć będą głównie przypadku wirnika jednostronnie otwartego z otworami odciążającymi.

Analizując wyniki pomiarów stwierdzić można, że w miarę wzrostu szczeliny nadłopatkowej:

- obniża się charakterystyka przepływu pompy H-Q i sprawności η -Q,
- optymalna wydajność pompy zmniejsza się,
- wartość naporu osiowego zwiększa się, przy czym jednak po przekroczeniu badanego zakresu szerokości szczelin nagle zdecydowanie maleje,
- w zakresie małych wydajności zależność P-Q staje się coraz bardziej stroma.



Rys. 9. Zależność P-s, H-s, Q-s i η -s odnoszące się do parametrów optymalnych wirnika otwartego z otworami odciążającymi



Rys. 10. Zależność ΣP_p -s dla badanego wirnika otwartego z otworami odciążającymi

Jest również znamienne, że wartość naporu osiowego przy niezmienionej szczelinie w zakresie wydajności większych od optymalnej, pozostaje praktycznie stała.

Dla porównania na rysunku 9 przedstawiono zależności P-s, H-s, Q-s i η -s odnoszące się do parametrów optymalnych.

Z analizy graficznie przedstawionych zależności wynika, że wpływ zmiany wartości szczeliny nadłopatkowej na optymalną wysokość podnoszenia pompy jest nieznaczny, zaznacza się w sposób wyraźniejszy w przypadku optymalnej wydajności i sprawności pompy oraz jest bardzo znaczny w odniesieniu do wartości naporu osiowego.

W celu pewnego uogólnienia uzyskanych rezultatów na rysunku 10 przedstawiono zależność ΣP_p -s, odnoszącą się do wirnika z otworami odciążającymi, gdzie ΣP_p jest bezwymiarowym wyróżnikiem naporu określonym wzorem w odniesieniu do parametrów optymalnych

$$\Sigma P_p = \frac{P}{\rho g d_2^2 H}, \quad (1)$$

gdzie:

ρ - jest gęstością pompowanej cieczy,

g - jest przyspieszeniem siły ciężkości,

d_2 - jest średnicą zewnętrzną wirnika.

Z rysunku 10 wynika, że przy pewnych zakresach wartości szczelin nadłopatkowych może występować znaczny wzrost naporu osiowego. Zmiana naporu osiowego jest przy tym relatywnie znacznie większa, niż ewentualne zmiany parametrów pracy pompy. Zatem o ewentualnej dopuszczalnej wartości szczeliny nadłopatkowej w przypadku wirnika otwartego pompy odśrodkowej, decydować będzie głównie wartość naporu osiowego.

Napór osiowy w wirniku odśrodkowym jednostronnie otwartym może być określony w przybliżeniu z wzoru podanego w pracy Stepanoffa [6]

$$P = K \cdot f_0 \cdot p, \quad (2)$$

gdzie:

K - współczynnik doświadczalny zależny od bezwymiarowego wyróżnika szybkości pompy,

f_0 - powierzchnia przekroju dopływowego wirnika (w cm^2),

p - ciśnienie rozwijane przez pompę (w at).

Dla uśrednionych parametrów optymalnych badanej pompy: $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{min}$, $H = 33 \text{ m}$, $n = 2900 \text{ min}^{-1}$ obliczono wartość naporu osiowego ze wzoru (2), przyjmując na podstawie pracy [6] wartość współczynnika $K = 1,75$. Uzyskaną wartość naporu osiowego $P = 3180 \text{ N}$ (322 kG) naniesiono na rysunek 5. Uzyskana zgodność rezultatów jest zadowalająca co dowodzi, że wzór (2) może być z dobrym przybliżeniem wykorzystywany do określania naporu osiowego działającego na wirnik jednostronnie otwarty.

6. Podsumowanie

Pompy krętne odśrodkowe z wirnikami jednostronnie otwartymi osiągają parametry pracy zbliżone do pomp z wirnikami zamkniętymi. Na parametry pracy pompy istotny wpływ wywiera wielkość szczeliny nadłopatkowej, z której wzrostem maleją optymalne parametry pracy pompy oraz bardzo wydatnie zmniejsza się wartość naporu osiowego. Napór osiowy w pompie z wirnikiem jednostronnie otwartym jest bardzo znacznie większy od występującego w przypadku wirnika zamkniętego. Dlatego też problem odciążania i łożyskowania wzdłużnego wirników jednostronnie otwartych w pompach odśrodkowych zasługuje na szczególną uwagę.

LITERATURA

- [1] Grychowski J.: Promieniowy rozkład ciśnienia w osłonie cylindrycznej ograniczonej wirującą tarczą z dodatkowym przepływem cieczy, rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Macieja Zarzyckiego, Politechnika Śląska, Gliwice 1969.
- [2] Grychowski J.: Napór osiowy w pompach wirowych, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 22, 1974.
- [3] Wilk S.: Wpływ promieniowych łopatek odciążających na rozkład ciśnienia oraz zmniejszenie naporu osiowego w pompach odśrodkowych, rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. M. Zarzyckiego, Politechnika Śląska, Gliwice 1971.
- [4] Dębiec J.: Wpływ otworów odciążających i średnicy szczeliny dławiącej na napór osiowy wirnika pompy odśrodkowej, rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. M. Zarzyckiego, Politechnika Śląska, Gliwice 1973.
- [5] Verba A., Szabo A.: Typical Characteristics of Radial Flow Pump Depending on Size of Clearance between Rotating Cascade of Vanes Without Front Shroud and Casing, Acta Technica XXVIII, Budapest 1960.
- [6] Stepanoff A.J.: Leakage Loss and Axial Thrust in Centrifugal Pumps. Trans. ASME, vol. 54 Nr 15, 1942.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО НАПОРА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ
С ОДНОСТОРОННЕ-ОТКРЫТЫМ РОТОРОМ

Р е з ю м е

Подробно представлено строение измерительного устройства, дающего возможность измерить осевой напор в центробежном насосе с односторонне-открытым ротором. Поданы результаты исследования осевого напора, который действует на открытый ротор с разгружающими отверстиями и без этих отверстий. Указана целесообразность использования разгружающих отверстий в центробежном односторонне-открытом роторе. Проанализированы полученные результаты.

INVESTIGATIONS AN AXIAL THRUST IN A CENTRIFUGAL
PUMP WITH A SEMI-OPEN IMPELLER

S u m m a r y

The construction of a measuring system permitting measurement of axial thrust in a centrifugal pump with a semi-open impeller has been discussed in detail. Investigation results on axial thrust acting upon an open impeller with and without relieving holes have been presented. The advisability of using relieving holes in a centrifugal semi-open impeller has been stressed. The obtained results have been analysed.