

Waldemar Jędrał

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

ZAGADNIENIA BADAWCZE POMP WIROWYCH W ENERGETYCE CIEPLNEJ

Dobra pompa energetyczna (tzn. zasilająca, obiegowa, kondensatu, wody chłodzącej lub sieciowa) powinna pracować niezawodnie, mieć dużą trwałość, zaś jej silnik napędowy powinien zużywać możliwie mało energii. Dalsze polepszanie tych własności wymaga stałego doskonalenia konstrukcji pomp i poprawy jakości ich wykonania, jak również doskonalenia metod obliczania sił hydraulicznych i metod projektowania układów odciążających. Znaczne efekty techniczne i ekonomiczne można uzyskać przez optymalny dobór pomp do instalacji, różnorodne zabiegi modernizacyjne samych pomp i układów pompowych oraz energooszczędną eksploatację. W pracy przedstawiono ważniejsze wyniki prac naukowo-badawczych już wykonanych w tym zakresie w Instytucie Techniki Ciepłej PW, oraz krótko omówiono prace rozpoczęte i planowane.

WSTĘP

Zespół Pomp w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Energetycznych ITC PW od wielu lat prowadzi prace dotyczące pomp wirowych stosowanych w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach. Główne obszary badań, to:

- nowe metody obliczania hydraulicznych sił osiowych i promieniowych,
- optymalizacja układów równoważących całkowicie lub częściowo te siły,
- modernizacja konstrukcji pomp w celu poprawy ich sprawności,
- optymalny dobór pomp do instalacji,
- energooszczędna eksploatacja pomp.

Celem pracy jest pokazanie niektórych wyników uzyskanych dotychczas oraz przedstawienie nowych kierunków badań.

1. PROBLEMY POMP W ENERGETYCE CIEPLNEJ

Podstawowe cechy dobrej pompy energetycznej, to przede wszystkim:

- duża niezawodność pracy,
- dostatecznie wysoka trwałość,
- możliwie małe zużycie energii podczas eksploatacji.

Duża niezawodność pracy sprawia, że straty związane z awaryjnym postojem bloku czy instalacji są niewielkie. Wysoka trwałość warunkuje stosunkowo małe koszty remontów oraz wymiany pomp. Wreszcie energooszczędność – to zarówno niskie koszty eksploatacji jak również, pośrednio, efekty sprzyjające ochronie środowiska, gdyż zmniejszenie zużycia energii oznacza mniejszą jej produkcję, a tym samym mniejszą produkcję popiołów, SO_2 , NO_x .

Uzyskanie powyższych własności wymaga rozwiązania szeregu zagadnień naukowo-technicznych dotyczących:

- układu pompowego,
- pompy i zachodzących wewnątrz niej procesów.

1.1. Zagadnienia dotyczące układu pompowego

Układ pompowy (instalację pompową) tworzą elementy ściśle współpracujące z pompą, a więc napęd, urządzenia regulacyjne oraz rurociągi i armatura. W tym zakresie podstawowym zagadnieniem jest optymalny dobór pomp o korzystnej charakterystyce oraz zaprojektowanie układu pod kątem minimalnego zużycia energii. Ważnym zagadnieniem jest poszukiwanie oszczędności energii w układach istniejących, m.in. przez lepsze dopasowanie pomp do układu i optymalną regulację, a także przez różnorodne zabiegi modernizacyjne dokonywane podczas remontów (rekonstrukcja uszczelnień, zmniejszenie chropowatości powierzchni, stoczenia wirników itp.).

1.2. Zagadnienia dotyczące pomp

Ta grupa zagadnień jest związana z przepływem i stratami energii wewnątrz pompy, a także z siłami hydraulicznymi i sposobami ich przyjmowania.

a. *Straty i sprawności* ujmuje łącznie znana zależność

$$\eta = \eta_h \eta_v (\eta_m - \zeta_t)$$

gdzie η , η_h , η_v , η_m są to odpowiednio sprawności: całkowita, hydrauliczna, objętościowa (volumetryczna) i mechaniczna, zaś ζ_t jest współczynnikiem strat tarcia zewnętrznych powierzchni tarcz wirnika w otaczającej cieczy. Powiększenie którejkolwiek sprawności lub zmniejszenie ζ_t powoduje wzrost sprawności η pompy.

Sprawność η_h można zwiększyć przez:

- zaprojektowanie lepszej hydraulicznie części przepływowej pompy,
- lepszą jakość wykonania pompy, w szczególności lepszą jakość odlewów,
- powiększenie gładkości kanałów przepływowych pomp istniejących przez mechaniczne, hydrauliczne lub ręczne czyszczenie i szlifowanie lub pokrycie ich powierzchni specjalnymi tworzywami.

Sprawność η_v można poprawić przez modyfikację uszczelnień wewnętrznych pompy lub zastosowanie tam nowych typów uszczelnień.

Sprawność η_m można zwiększyć zastępując typowe uszczelnienia sznurowe wałów zupełnie nowymi rodzajami uszczelnień.

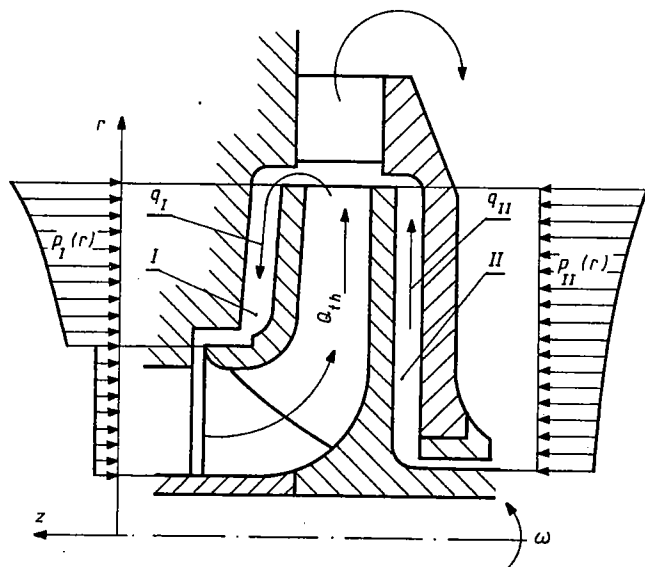
Współczynnik ζ_t można zmniejszyć przez powiększenie gładkości tarcz wirnika oraz przez optymalizację wymiarów przestrzeni wokół wirnika.

b. *Problemy sił hydraulicznych* obejmują zarówno powiększenie dokładności ich obliczania, jak również projektowanie optymalnych układów odciążających. Dokładniejsze obliczenie siły to w konsekwencji lepszy dobór układu odciążającego i mniejsze w nim straty, równocześnie zaś większa pewność pracy pompy. Optymalnie zaprojektowany układ odciążający, np. tarcza odciążająca, zapewnia większą niezawodność pracy pompy przy mniejszych stratach objętościowych i tarciovych. W obu grupach zagadnień wykonano wiele prac badawczych i rozpoczęto następne [1÷3], [5÷9].

2. PRZYKŁADOWE WYNIKI PRAC WYKONANYCH DOTYCHCZAS

2.1. Siły osiowe

Siła osiowa F_w jest wynikiem działania ciśnień o różnych rozkładach $p_I(r)$ i $p_{II}(r)$, towarzyszących 3-wymiarowemu ruchowi cieczy w przestrzeniach

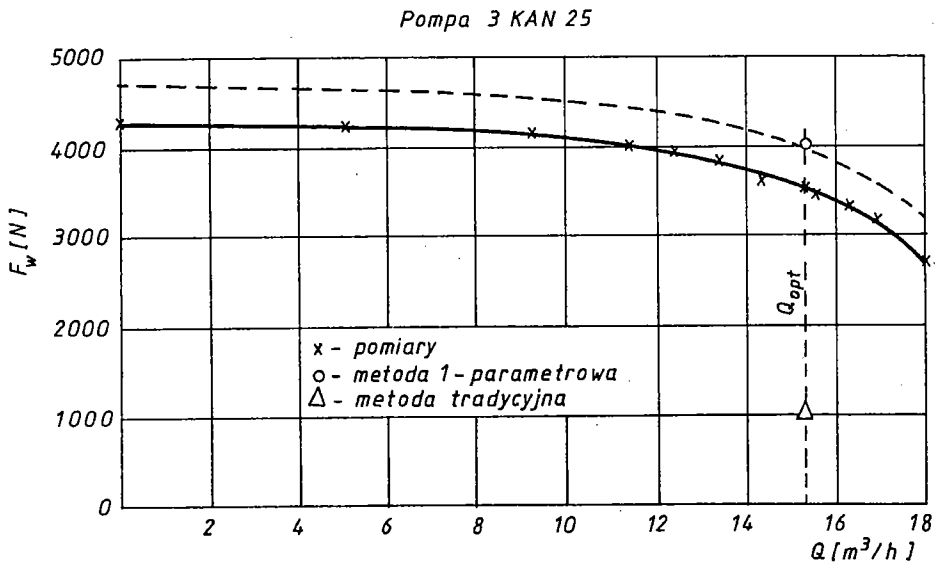


Rys. 1. Rozkład ciśnień wokół wirnika pompy wielostopniowej

okołowirnikowych I, II, na tarczy o różnych powierzchniach (rys. 1). Obliczenie tych rozkładów, będące jednym z klasycznych zadań hydromechaniki, wymaga rozwiązania układu równań różniczkowych cząstkowych ruchu cieczy (tj. równań pędu i ciągłości). W ogromnej większości przypadków są to równania dotyczące przepływów turbulentnych.

Poszukiwanie coraz dokładniejszych rozwiązań idzie dwiema drogami. Jedną z nich, to próby bezpośredniego rozwiązania równań ruchu przy zastosowaniu coraz bardziej subtelnych i złożonych modeli turbulencji. Druga, to metoda związków całkowych, stosując którą przekształca się równania różniczkowe cząstkowe w układ równań różniczkowych zwyczajnych, łatwiejszych do numerycznego rozwiązania. W Zespole Pomp ITC PW trwają prace nad obiema metodami [1,2].

Aktualnie stosowana metoda bezpośrednia opiera się na 8-równaniowym modelu naprężeń turbulentnych otrzymanym przy założeniu turbulencji nieizotropowej oraz przy uwzględnieniu wpływu krzywizny ograniczających powierzchni cylindrycznych na rozkład turbulencji. Wykonane ostatnio obliczenia pokazują bardzo dobrą zgodność ich wyników z rezultatami pomiarów własnych oraz różnymi danymi literaturowymi [2].



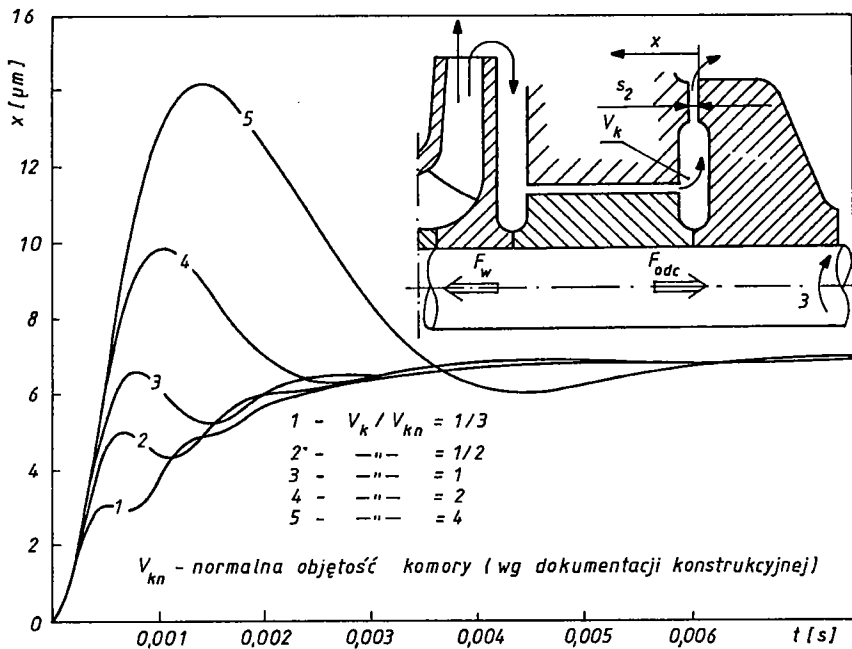
Rys. 2. Porównanie wartości sił zmierzonych i obliczonych dla pompy odśrodkowej o wyróżniku szybkoobrotowości $n_q = n \sqrt{Q_{opt}} / H_{opt}^{0,75} = 7$ (n [obr/min] – prędkość obrotowa, Q_{opt} [m^3/s], H_{opt} [m] – wydajność i wysokość podnoszenia w punkcie optymalnym)

Na rysunku 2 pokazano różnice między wartościami sił zmierzonych (metodą tensometryczną) i obliczonych za pomocą najprostszej z metod opartych na związkach całkowych [3]. Błąd nie przekracza 15% i jest znacznie mniejszy od błędów obliczeń metodami tradycyjnymi [4].

Inne wykonane prace [5] ukazały równocześnie znaczny wpływ dokładności wyznaczenia brzegowych wartości ciśnień i zawirowań cieczy na wynikową dokładność obliczeń sił osiowych. Okazało się, że szczególnie silny jest wpływ błędu oszacowania wartości ciśnień na zewnętrznych granicach przestrzeni I i II mogącego osiągnąć wartość $\pm 20\%$ i powodującego błąd obliczenia siły F_w tego samego rzędu [5]. Mniejszy, lecz także nie pomijalny jest wpływ błędu oszacowania średniego zawirowania cieczy wpływającej do przestrzeni I, II.

2.2. Tarcze odciążające

Wiele spośród wykonanych prac dotyczyło zespołów z tarczami odciążającymi, stosowanymi do równoważenia sił osiowych w dużych pompach wielostopniowych. Opracowano metodę projektowania optymalnych energetycznie zespołów z tarczami, spełniających warunek najmniejszych możliwych strat mocy $P_{odc} = \min$ w układzie odciążającym. Odpowiednio dobrane ograniczenia pozwalają otrzymać konstrukcję mającą równocześnie właściwe charakterystyki statyczne, zapewniające dostatecznie dużą niezawodność pracy pompy [6].



Rys. 3. Drgania osiowe zespołu z tarczą odciążającą pompy 15Z33 (bez łożyska oporowego) spowodowane skokowym wzrostem wartości siły osiowej o 10% ($\Delta F_w / F_w = 0,1$)

Niezawodność pracy jest również wynikiem odpowiednich własności dynamicznych zespołów odciążających, ważnych w nieustalonych stanach pracy pomp (rozruch, nagła zmiana warunków pracy, stany awaryjne). Opracowano

metody symulacji komputerowej takich stanów pracy. Na rysunku 3 pokazano przykład obliczonego przebiegu drgań osiowych $x(t)$ zespołu z tarczą odciążającą 15Z33; $x = s_2 - s_{20}$, (s_{20} , s_2 – odpowiednio początkowa i bieżąca szerokość szczeliny między tarczą i przeciwtarczą). Zaznacza się tu znaczny wpływ ściśłości cieczy; tym większy, im większa jest objętość komory przed tarczą [7]. Zbyt duże objętości są, jak widać, niepożądane.

Obliczenia wykonane dla wymuszeń harmonicznycych (tj. dla pulsującej sinusoidalnie wartości F_w) wskazały z kolei na możliwość wystąpienia rezonansu i w konsekwencji nadmiernie dużego przesunięcia x tarczy w przypadku wymuszeń z częstościami łopatkowymi $\Omega = z\omega$, gdzie: z – liczba łopatek wirnika, ω – prędkość kątowna zespołu wirującego [7].

Wykonano także szereg prac dotyczących optymalizacji energetycznej innych układów odciążających, takich jak otwory, bębny [8] i łopatki odciążające [9].

2.3. Modernizacja części przepływowych pomp

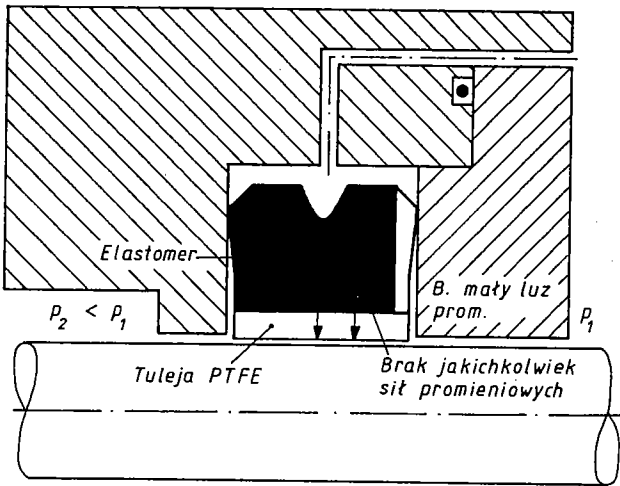
Blisko 2/3 pomp wirowych produkowanych w kraju ma sprawność o 5÷15 punktów niższą od sprawności pomp przodujących firm zagranicznych. Równocześnie co najmniej 20% całkowitej produkcji energii elektrycznej jest zużywane do napędu tych pomp. Możliwość zaoszczędzenia znacznych ilości energii i pieniędzy była przyczyną podjęcia tematu modernizacji krajowych pomp wirowych w celu poprawy ich sprawności. Wynikiem badań wykonanych w ramach programów PR-8, CPBR 5.1.2 i 5.9.2 było opracowanie, przy współudziale OBR Pomp Przemysłowych w Warszawie i Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, nowych części przepływowych (wirniki, kierownice) szeregu pomp różnych typowielkości. W dziewiętnastu przypadkach uzyskano średni wzrost sprawności o 5,2 punktu [10] w porównaniu do sprawności pomp dotychczas produkowanych. Oszczędności z tytułu wdrożenia do produkcji wszystkich tych pomp o zmodernizowanych konstrukcjach części przepływowych mogłyby wynieść ok. 80 mln kWh rocznie. Oszczędności te można by jeszcze znacznie powiększyć przez równoczesną wydatną poprawę jakości wykonania części przepływowych.

3. PRZYKŁADY PRAC KONTYNUOWANYCH LUB ROZPOCZĘTYCH

3.1. Uszczelnienia wirników

Na rysunku 4 pokazano bezstykowe uszczelnienie typu RotaLion, stosowane m.in. do uszczelniania wałów pomp i turbin wodnych. Najczęściej stosuje się

układ dwóch takich uszczelnień z doprowadzeniem pomiędzy nie wody płuczącej. Zastąpienie nimi tradycyjnej dławnicy, ze szczeliwem sznurowym dociskany dławikiem, powoduje wyeliminowanie znacznych strat tarcia i wzrost sprawności η_m . Powiększa się także wówczas niezawodność pracy pompy.



Rys. 4. Bezstykowe uszczelnienia RotaLion (James Walker)

W Zespole Pomp podjęto prace nad wykorzystaniem pokazanego elementu do uszczelnienia szyjki wirnika w kadłubie, zamiast tradycyjnej szczeliny dławniczej. Niezbędność bardzo precyzyjnego montażu (wysokie wymagania odnośnie do współosiowości oraz konieczność zachowania odpowiedniej kolejności poszczególnych kroków montażowych) powoduje pewne trudności technologiczne. Warto je pokonać, oczekując wzrostu sprawności objętościowej z $0,94 \div 0,96$ do $0,98 \div 0,99$ i odpowiedniego wzrostu sprawności całkowitej. Dodatkowym spodziewanym efektem będzie zmniejszenie wartości siły osiowej, spowodowane zmniejszeniem przepływu dośrodkowego w przestrzeni I przed wirnikiem. Równocześnie kontynuowane jest wdrażanie do stosowania uszczelnień szczelinowych zmodyfikowanych przez nacięcie prostokątnych rowków o odpowiednio dobranych wymiarach. Uszczelnienia takie nie tylko zmniejszają straty objętościowe, lecz najprawdopodobniej znacznie zmniejszają również siły promieniowe wynikłe z nieuniknionej mimośrodowości powierzchni szczelin (tzw. siły Łomakina). Rezultatem tego może być znaczne zmniejszenie amplitudy drgań promieniowych zespołu wirującego.

3.2. Nowe technologie części przepływowych

Rozpoczęto prace mające doprowadzić do wzrostu sprawności hydraulicznej i poprawy charakterystyk pomp. Osiągnięcie tego celu powinny umożliwić:

a. *Wirniki składane z blaszanych łopatek o dużej gładkości i dokładności wymiarowej.* Zastosowanie 20÷25 cienkich, gładkich łopatek zamiast dotychczasowych 6÷8, zwykle niestarannie odlanych, powinno przynieść wzrost sprawności hydraulicznej oraz 15÷20-procentowy wzrost wysokości podnoszenia. Opracowanie prostej technologii pozwoli, być może, rozpocząć krajową produkcję pomp z takimi wirnikami.

b. *Pokrycia powierzchni przepływowych specjalnymi tworzywami.* Jest to jedna z nowych technologii radykalnie zwiększających gładkość kanałów wirników i spiral zbiorczych, powodujących zmniejszenie współczynnika tarcia hydraulicznego. Firmy produkujące tworzywa gwarantują przyrost sprawności po takim zabiegu o 4÷9 punktów, zależnie od wielkości pompy. Celem rozpoczętych właśnie prac będzie weryfikacja tych danych i sprawdzenie przydatności technologii powlekania, jak również zastosowanie jej do pokrywania zewnętrznych powierzchni tarcz wirników.

3.3. Badania zjawisk przepływowych w przestrzeniach wokół wirników

W ramach grantu KBN rozpoczęto badania doświadczalne rozkładów ciśnień i prędkości w przestrzeniach okołowirnikowych. Celem badań jest uzyskanie danych empirycznych do weryfikacji dalszego doskonalenia metod obliczeniowych; ponadto – uzyskanie większej liczby informacji potrzebnych do wyznaczenia brzegowych wartości ciśnień i zawirowań cieczy. Dodatkowym celem jest rozszerzenie i uogólnienie metod obliczeniowych przez odejście od uproszczonego modelu osiowosymetrycznego, zarazem – podjęcie próby równoczesnego obliczania hydraulicznych sił osiowych i promieniowych, w różnych warunkach pracy pompy, także znacznie odbiegających od warunków nominalnych.

Kontynuowane są prace nad doskonaleniem modeli naprężeń turbulentnych (turbulencja nieizotropowa, 3-wymiarowe warstwy przyścienne) oraz procedur numerycznych. Niezależnie od dalszego powiększania dokładności wyznaczania rozkładów ciśnień i sił umożliwi to również obliczenie przepływu w kilku sąsiadujących ze sobą obszarach o różnej geometrii (przestrzeń okołowirnikowa + szczeliny osiowe przed i za tą przestrzenią).

3.4. Optymalny dobór i eksploatacja pomp wirowych

Rozpoczęto prace dotyczące optymalnej współpracy grupy równolegle połączonych pomp, z których część jest regulowana za pomocą zmian prędkości obrotowej (np. falownikiem), zaś pozostałe są „doregulowywane” dławieniowo. Celem końcowym jest opracowanie programu optymalizującego w sposób ciągły parametry regulacji i uzyskanie najmniejszego możliwego zużycia energii przez grupę pomp przy dowolnych zmianach $Q(t)$ zapotrzebowania cieczy.

Opracowano również założenia, metody i pierwsze wersje komputerowego banku danych pomp energetycznych [11].

Zagadnienia te są elementami szerszego tematu optymalnego doboru pomp do instalacji i ich optymalnej eksploatacji. W zakres takiej właśnie eksploatacji należy włączyć różnorodne zabiegi modernizacyjne dokonywane podczas remontów pomp. Są to, m.in. rekonstrukcja uszczelnień wewnętrznych i zewnętrznych, zmniejszenie chropowatości powierzchni stykających się z cieczą, stoczenia i ew. inne przeróbki wirników itp. [12]÷[14].

Przewidywane oszczędności energii, jakie w skali całej gospodarki narodowej przynieść może kompleksowe wdrożenie do eksploatacji poszczególnych rozwiązań, szacuje się na 2÷3 mld kWh rocznie.

PODSUMOWANIE

W Zespole Pomp ITC PW kontynuowane są prace rozpoczęte dawniej, jak również podjęto nowe prace badawcze i wdrożeniowe, których celem jest poprawa sprawności i niezawodności pracy pomp wirowych, zwłaszcza dużych pomp energetycznych. Trwają prace nad modernizacją istniejących i projektowaniem optymalnych nowych układów pompowych. Efektem końcowym powinno być wydatne zmniejszenie zużycia energii na potrzeby własne w energetyce, gospodarce komunalnej i innych działach gospodarki narodowej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Jędrał: *Metoda i algorytm komputerowego obliczania sił wzdłużnych i przecieków wewnętrznych w pompach wirowych*. Biul.Inf. ITC, nr 75, 1991, s. 3÷24.
- [2] K. Karaśkiewicz: *Analiza i badania doświadczalne rozkładu ciśnień między wirującą tarczą a nieruchomą obudową w przypadku przepływu burzliwego*. Praca doktorska, PW, Warszawa 1993.
- [3] W. Jędrał: *Metoda obliczania sił wzdłużnych w pompach wirowych*. Przegląd Mechaniczny, 1992, nr 13, s. 11÷14.
- [4] S. Łazarkiewicz, A. T. Troskołański: *Pompy wirowe*. WNT, Warszawa 1968.
- [5] W. Jędrał: *Ciśnienie i zawirowanie strumienia cieczy wypływającej z wirnika*. Biul. Inf. ITC, nr 77, 1992, s. 4÷29.
- [6] W. Jędrał: *Metoda wyznaczania optymalnych wymiarów zespołu z tarczą odciążającą*. Przegl. Mech., 1991, nr 17 (cz.I, s. 7÷12), nr 18 (cz.II, s. 21÷25).
- [7] W. Jędrał: *Axial Displacements Dynamics of a Pump Rotor with a Balancing Disc under Variable Axial Thrust*. Archiwum Budowy Maszyn, 1991, nr 4, s. 293÷307.

- [8] W. Jędral: *Metody obliczania sił wzdłużnych i układów odciążających w pompach wirowych*. Pr. Nauk. PW, Mechanika, z.110, 1988.
- [9] A. Segall: *Badania i optymalizacja wymiarów tarcz ułopatkowanych jako elementów wyrównowazających siły osiowe w pompach*. Praca doktorska, PW, 1980.
- [10] K. Jackowski, W. Jędral: *Modernizacja krajowych pomp wirowych w celu poprawy ich sprawności*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11, 1992, s. 18÷19.
- [11] K. Jackowski, A. Segall, K. Karaškiewicz: *Komputerowy bank danych oraz metody optymalnego doboru pomp*. Praca wyk. w ramach działalności statutowej. Warszawa, ITC, 1991, maszynopis.
- [12] W. Jędral: *Oszczędności energii elektrycznej w eksploatacji pomp wirowych*. Energetyka, 1991, nr 1, s. 8÷13.
- [13] K. Jackowski, W. Jędral: *Sposoby zmniejszenia zużycia energii przez pompy wirowe*. Przeg. Mech., 1992, nr 20, s. 14÷17.
- [14] K. Jackowski, W. Jędral: *Zmniejszenie zużycia energii do napędu pomp wirowych w przemyśle i energetyce*. Konf. Nauk.-Techn. „Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska”, Porąbka-Kozubnik, 1993. Materiały konferencyjne t.II, s. 155÷160.

PROBLEMS OF RESEARCH ON POWER PLANT CENTRIFUGAL PUMPS

S u m m a r y

Research results are presented and new investigation trends are shown concerning:

- methods of axial and radial thrust calculation,
- balancing devices and their optimization,
- improvement of pumps design increasing their efficiency,
- optimum pump selection and energy-saving operation.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ВОПРОСЫ ЛОПАСНЫХ НАСОСОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Краткое содержание

Хорошей энергетический насос (т.е. питательный, циркуляционный, конденсационный, охлаждающей воды или сетевой) должен надежно работать, быть прочным, а его приводной двигатель должен потреблять относительно мало энергии. Дальнейшее улучшение этих свойств требует постоянного совершенствования конструкции насосов и повышения качества их производства, а также совершенствования методов расчета гидравлических сил и методов проектирования систем уменьшения нагрузки. Значительные технические эффекты можно получить оптимально подбирая насосы для установки, модернизируя насосы и системы насосов, а также благодаря экономии энергии при эксплуатации. В работе представлены важнейшие результаты научно-исследовательских работ, выполненных в Институте Теплотехники Варшавского политехнического института, а также коротко обсуждены начатые и планируемые работы.