

Zygmunt POPCZYK  
Ryszard ROHATYŃSKI

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
Politechnika Wrocławska

## KONCEPCJA OBLICZANIA TEORETYCZNYCH CHARAKTERYSTYK PALISAD PROFILÓW DLA ZASTOSOWANIA W PROJEKTOWANIU POMP ŚMIGŁOWYCH

**Streszczenie:** Praca poświęcona jest zastosowaniu teoretycznych charakterystyk palisad profilów w projektowaniu pomp śmigłowych. Scharakteryzowano program obliczania opływu palisad profilów metodą punktów osobliwych, który umożliwia wyznaczanie teoretycznych charakterystyk wirnika i kierownicy pompy śmigłowej w osiowo-symetrycznym przepływie potencjalnym. Podano sposób urealnienia wyników obliczeń przepływu potencjalnego przez uwzględnienie wpływu lepkości cieczy. Omówiono program obliczania strat w palisadzie profilów oparty na koncepcji warstwy przyściennej.

### 1. Wstęp

Jakość pompy śmigłowej ocenia się na podstawie charakterystyk: dławienia, sprawności i kawitacyjnej. Przebieg tych charakterystyk zależy od wielu czynników, jednak decydujące znaczenie ma ukształtowanie elementów roboczych pompy, tj. wirnika i kierownicy. W pompie śmigłowej łopatki wirnika i kierownicy mają kształt płata nośnego, dlatego też projektowanie tych elementów sprowadza się, w zasadzie, do zagadnienia poszukiwania odpowiedniej palisady profilów.

Dotychczasowe metody doboru tych palisad stosowane w projektowaniu pomp śmigłowych bazują przeważnie na wynikach badań pojedynczych płatów nośnych. W stosunku do tych metod można wysunąć następujące zastrzeżenia:

- liczba przebadanych profilów jest ograniczona i nie zaspokaja potrzeb projektowania pomp;
- dokładne uwzględnienie wpływu gęstości palisady jest niemożliwe;
- nie jest znany wpływ zmiany kształtu profilu na jego charakterystyki;
- rozkłady prędkości i ciśnień na powierzchni profilu pozostają nieznanne, wskutek czego niemożliwe jest przewidywanie wystąpienia kawitacji i obliczenie warstwy przyściennej na łopatkę.

Zastosowanie metody punktów osobliwych [10, 11] w toku projektowania pompy śmigłowej umożliwia usunięcie wielu z tych mankamentów. Za pomocą tej metody otrzymuje się charakterystyki profilu lub palisady profilów w płaskim przepływie cieczy doskonałej, tj. kąta cieczy za palisadą, współczynnik siły nośnej profilu w palisadzie, rozkłady prędkości i ciśnienia na konturze profilu. Znajomość tych charakterystyk w poszczególnych przekrojach cylindrycznych wirnika i kierownicy dla różnych punktów

pracy pompy umożliwia wnioskowanie o własnościach pompy, a w szczególności przewidywanie przebiegu charakterystyki dławienia, zakresu wysokiej sprawności oraz własności kawitacyjnych pompy [4, 6]. Zastosowanie tej metody w projektowaniu pomp śmigłowych jest zatem istotnym postępowaniem w stosunku do metod prezentowanych w krajowej literaturze z zakresu projektowania pomp [2, 13, 15]. Dalszym ulepszeniem, obecnie opracowywanym, jest uwzględnienie wpływu lepkości cieczy, co umożliwi obliczanie strat w palisadzie łopatek, a przez to trafniejsze przewidywanie charakterystyk projektowanej pompy.

## 2. Charakterystyki teoretyczne palisady profilów w przepływie cieczy doskonałej

Dla celów analizy i projektowania łopatek pomp śmigłowych została opracowana metoda punktów osobliwych w wersji podanej przez Martensena [3, 18]. Metoda ta, ogólnie biorąc, polega na rozpatrywaniu pola prądu utworzonego przez superpozycję przepływu niezakłóconego i przepływu indukowanego przez odpowiednio dobrany rozkład wirów na konturze profilów w palisadzie.

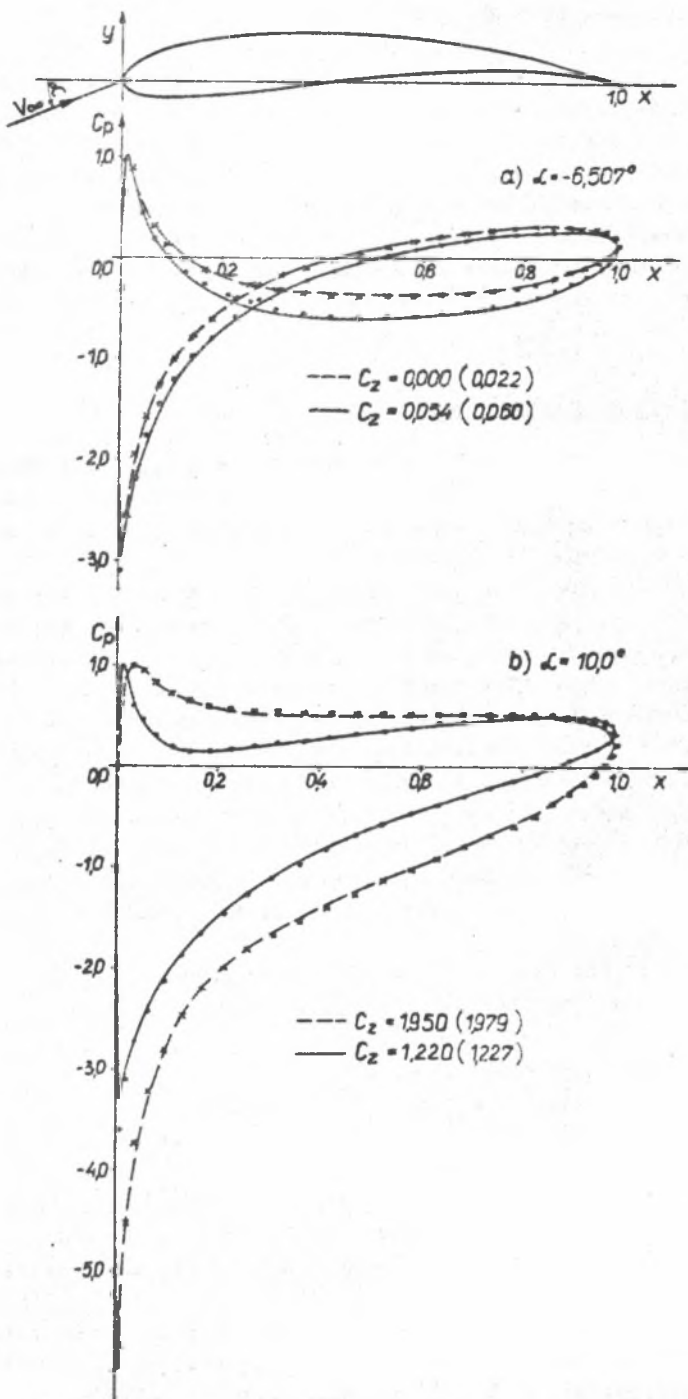
Szczegółowy opis programu obliczeniowego i algorytmu metody został podany w [10, 11]. Podstawowymi wielkościami, które otrzymuje się za pomocą programu, są:

- składowe współczynniki siły nośnej profilu w palisadzie  $C_L^{(0)}$  i  $C_L^{(90)}$ , odpowiadające kątom  $\delta_{\infty} = 0^\circ$  i  $\delta_{\infty} = 90^\circ$ ;
- współczynnik siły nośnej  $C_L$ , kąty przepływu  $\delta_{\infty}$  i  $\delta_2$  oraz rozkłady prędkości i ciśnienia na konturze profilu dla dowolnych wartości kąta napływu  $\delta_1$ .

Dруга wersja tego programu, pomocna szczególnie w projektowaniu, umożliwia obliczanie, w sposób iteracyjny, kąta nachylenia profilu w palisadzie  $\lambda$  dla zadanej wartości kąta wypływu cieczy  $\delta_2$ .

Dokładność programu obliczeniowego została oceniona na podstawie licznych testów, tak dla profilów odosobnionych, jak i w palisadzie. Część tych wyników, dotycząca obliczania opływu profilów analitycznych z ostrą (profil Żukowskiego, Karmana-Trefftza) oraz zaokrągloną (profil Carafaliego) krawędzią spływu, została zamieszczona w [5]. Dla uzupełnienia tych testów na rys. 1 podajemy porównanie wyników obliczeń opływu profilu Bondera odosobnionego i w palisadzie. Jako dane porównawcze posłużyły tu wyniki obliczeń profilu i palisady otrzymane metodą odwzorowań konformnych, opublikowane w [1, 9].

Rysunek zawiera porównanie rozkładów współczynnika ciśnienia na konturze profilu oraz porównanie wartości współczynnika siły nośnej dla dwóch kątów natarcia: a)  $\alpha = -6,507^\circ$  i b)  $\alpha = 10^\circ$ . Na rysunku tym linia ciągła odpowiada profilowi w palisadzie o podziałce  $t = 1$  i kącie ustawienia profilu  $\lambda = 30^\circ$ , natomiast linia przerywana - profilowi odosobnionemu. Odpowiednie rozkłady współczynnika ciśnienia, otrzymane metodą punktów osobliwych, zostały zamieszczone na rysunku w postaci punktów.



Rys. 1. Porównanie wyników obliczeń opływu palisady profili Bondera

Wszystkie wykonane testy obliczeniowe potwierdziły dużą dokładność metody i programu obliczeniowego w zakresie przyjętych założeń upraszczających.

Omawiany program może być wykorzystywany zarówno do oceny własności pomp istniejących, jak również do projektowania nowych konstrukcji. Zasady wykorzystania programu do analizy i oceny własności hydraulicznych pompy śmigłowej zostały podane w [4]. Dla celów projektowania została opracowana procedura projektowania części przepływowej pompy śmigłowej z zastosowaniem tego programu [6]. Wykonane projekty pomp śmigłowych [7, 8] wg toku zaproponowanego w procedurze potwierdziły pełną przydatność programu obliczania opływu palisad profilów metodą punktów osobliwych w projektowaniu.

### 3. Uwzględnienie wpływu lepkości cieczy

Charakterystyka teoretyczna wirnika  $H_{th} = f(Q_{th})$  oraz rozkłady prędkości i ciśnienia wokół łopatki, które można wyznaczyć dla dowolnego punktu charakterystyki, stanowią zupełną charakterystykę własności wirnika przy przepływie cieczy doskonałej.

Wysuwane na podstawie tych charakterystyk wnioski dotyczące przebiegu charakterystyki dławienia, własności kawitacyjnych czy zakresu wysokiej sprawności pompy, mają jednak charakter jakościowy. Dla zilustrowania tego zagadnienia na rys.2 zestawiono charakterystyki teoretyczne  $H_{th} = f(Q_{th})$  wirnika z charakterystykami rzeczywistymi pompy  $H = f(Q)$ , dla różnych kątów ustawienia łopatki. Wiadąc, że aby na podstawie charakterystyki teoretycznej wirnika można było oszacować rzeczywistą charakterystykę pompy, to należałoby uwzględnić szereg czynników, które wpływają na tę charakterystykę, a nie są uwzględnione w osiowo-symetrycznym modelu przepływu cieczy doskonałej, tj. nielepkiej i nieściśliwej. Jednym z tych czynników jest lepkość cieczy.

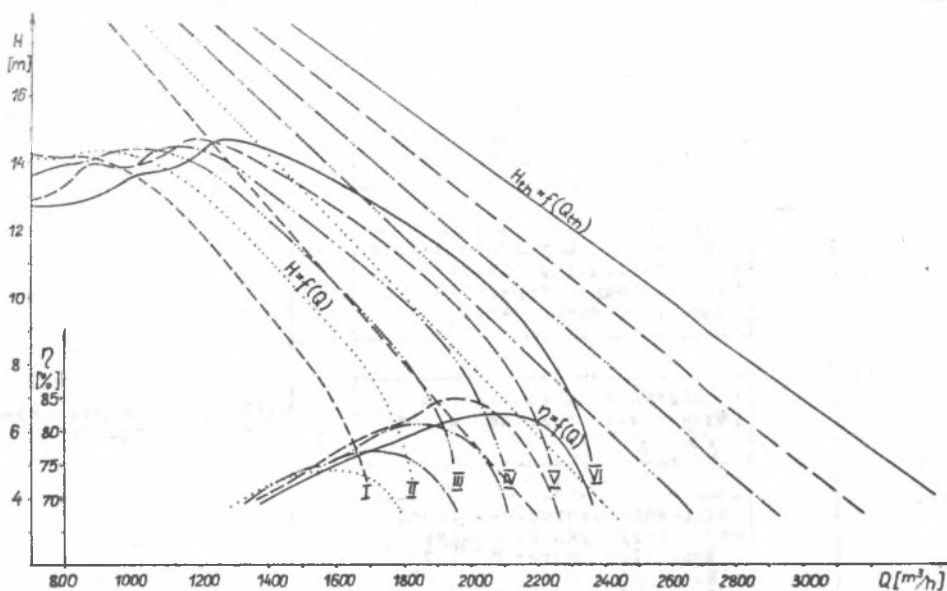
Zgodnie z koncepcją Prandtla przepływ cieczy lepkiej przez palisadę profilów można wyznaczyć rozwiązując kolejno dwa następujące prostsze zagadnienia:

1. Wyznaczenie przepływu potencjalnego,
2. Obliczenie przepływu w warstwie przyściennej.

Schemat programu obliczania strat w palisadzie prostoliniowej oparty na powyższej koncepcji został przedstawiony na rys.3. W programie można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy: I - obliczanie przepływu potencjalnego, II - obliczanie warstwy przyściennej, III - obliczanie strat.

Przepływ potencjalny oblicza się za pomocą omawianej wcześniej metody punktów osobliwych.

Przepływ w warstwie przyściennej oblicza się za pomocą metody Truckenbrodta [16], która została uzupełniona i przedstawiona w sposób łatwy do zastosowania przez Scholza [12]. Jest to metoda całkowa, jednoparametrowa, która umożliwia obliczenie zarówno laminarnej, jak i turbulენტnej



Rys.2. Zestawienie charakterystyk rzeczywistych i teoretycznych pompy śmigłowej modelowej 40 Pm o wyróżniku  $n_{SN} = 700$ .

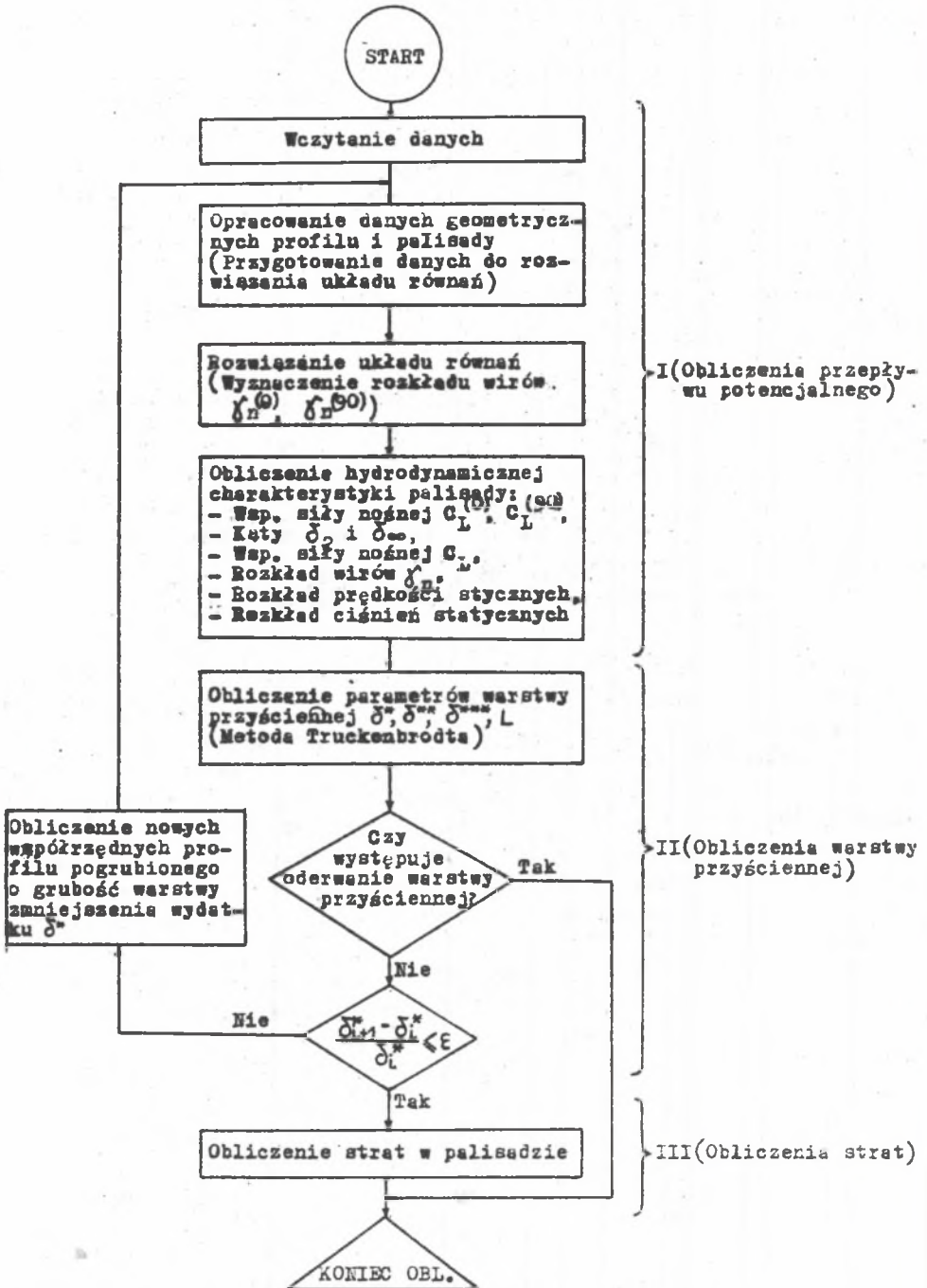
warstwy przyściennej, w płaskim przepływie płynu nieściśliwego. Metoda pozwala obliczać charakterystyczne grubości warstwy przyściennej, tj. grubość warstwy zmniejszenia wydatku  $\delta^*/l$ , grubość warstwy straty pędu  $\delta^{**}/l$ , grubość warstwy straty energii kinetycznej  $\delta^{***}/l$  oraz parametr kształtu warstwy przyściennej  $L$ , na podstawie którego można oszacować punkt oderwania warstwy przyściennej. Wyniki obliczeń warstwy przyściennej są poprawne tylko wówczas, gdy przepływ odbywa się bez oderwania, co ogranicza zastosowanie tej metody do stosunkowo wąskiego zakresu pracy pompy. Mimo to metoda jest chętnie stosowana w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień przepływowych [14, 17].

Jeśli w przepływie nie występuje oderwanie warstwy przyściennej, to profil jest pogrubiany przez dodanie grubości warstwy zmniejszenia wydatku  $\delta^*/l$  i zgodnie ze schematem programu, obliczenia są powtarzane tak długo, aż względna różnica  $\delta^*/l$  w dwóch kolejnych iteracjach będzie mniejszą od założonej, dowolnie małej liczby.

W ostatnim etapie obliczeń, na podstawie parametrów warstwy przyściennej obliczany jest współczynnik strat profilowych w palisadzie.

Na uwagę zasługuje fakt, że program obliczeniowy posiada strukturę modułową. Zasadnicze obliczenia wykonywane są w podprogramach modułach, którymi zarządza program sterujący. Program taki, oprócz wielu innych, posiada również tę zaletę, że bardzo łatwo można go aktualizować poprzez wymianę określonego modułu na inny. Jeśli np. okaże się, że dysponujemy bardziej skuteczną metodą obliczania warstwy przyściennej niż zastosowana aktualnie w programie, będzie można ją zastosować opracowując odpowiedni moduł.





Rys.3. Schemat blokowy programu obliczenia strat profilowych w palisadzie prostoliniowej

#### 4. Podsumowanie

Metoda punktów osobliwych umożliwia wyznaczenie hydrodynamicznych charakterystyk prostoliniowej palisady profilów w przepływie cieczy śliskościowej. Na podstawie charakterystyk palisady łopatek w poszczególnych przekrojach cylindrycznych wirnika można wyznaczyć zupełną charakterystykę własności wirnika w przepływie potencjalnym, na którą składają się: teoretyczna charakterystyka przepływu  $H_{th} = f(Q_{th})$  oraz rozkłady prędkości i ciśnienia na łopacie wirnika. Charakterystyki te są użyteczne w toku analizy i projektowania pompy śmigłowej, gdyż zwiększają ilość informacji wiążących geometrię palisady łopatek z własnościami pompy.

Dalszy rozwój metody obliczania przepływów w pompach śmigłowych wymaga uwzględnienia lepkości cieczy. W tym celu program wyznaczania charakterystyk został rozszerzony o obliczanie warstwy przyciennej. Pozwoli to uściślić wyniki obliczeń przepływu potencjalnego, a w szczególności wyznaczyć charakterystykę strat w palisadzie.

#### LITERATURA

- [1] Klonowska M.E., Prosnak W.J., Szymański I.K.: Obliczanie przepływu palisady prostoliniowej. Prace IPPT PAN, Warszawa 1976.
- [2] Łazarkiewicz Sz., Trokolewski A.T.: Nowoczesne kierunki w konstrukcji pomp wirowych. WNT, Warszawa 1966.
- [3] Martensen E.: Die Berechnung der Druckverteilung an dicken Gitterprofilen mit Hilfe von Fredholmschen Integraleichungen Zweiter Art. Arch. Rat. Mech. Anal. 3/1959.
- [4] Popczyk Z., Rohatyński R.: Zastosowanie metody punktów osobliwych w projektowaniu pomp śmigłowych. Prace Naukowe IKEM Pwr. Zeszyt nr 34, Wrocław 1977.
- [5] Popczyk Z.: Ocena dokładności metody punktów osobliwych w zastosowaniu do obliczania opływu płatów nośnych. Zeszyty Naukowe PŚ. Energetyka 66, Gliwice 1978.
- [6] Popczyk Z.: Projektowanie pomp śmigłowych z zastosowaniem metody punktów osobliwych. Materiały V Konferencji NT nt. Technologia przepływowych maszyn wirnikowych. Rzeszów 1983.
- [7] Popczyk Z., Rohatyński R.: Projekt części hydraulicznej modelowej pompy śmigłowej 40 PmU o wyróżniku szybkoobrotowości  $n_{SN} = 700$ . Raport IKEM Pwr. nr 018/633/80, Wrocław 1980.
- [8] Popczyk Z., Rohatyński R.: Projekt części hydraulicznej modelowej pompy śmigłowej 40 PmU o wyróżniku szybkoobrotowości  $n_{SN} = 600$ . Raport IKEM Pwr. nr 040/655/80, Wrocław 1980.
- [9] Prosnak W.J.: O automatycznym rozwiązywaniu podstawowego zagadnienia teorii profilu. Prace IPPT PAN, Warszawa 1972.
- [10] Rohatyński R.: Opracowanie metody obliczania systemów łopatkowych pomp śmigłowych. Raport IKEM Pwr. nr 125, Wrocław 1974.
- [11] Rohatyński R.: Application of the Martensen method for the analysis of thick aerofoils in cascade. Proceedings of the fifth conference on fluid machinery, vol. 3, Budapest 1975.
- [12] Scholz M.: Aerodynamik der Schaufelgitter. Bd. 1. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1965.

- [13] Stępniewski M.: Pompy. WNT, Warszawa 1978.
- [14] Sucharski Z.: Metoda rozwiązania przepływu płynu lepkiego przez płaskie kołowe palisady profili. Zeszyty Naukowe PP, Maszyny Robocze i Pojazdy 22, Poznań 1982.
- [15] Troskoleński A.T., Łazarkiewicz Sz.: Pompy wirowe. WNT, Warszawa 1973.
- [16] Truckenbrodt E.: Ein Quadraturverfahren zur Berechnung der laminaren und turbulenten Reibungsschicht bei ebener und rotationssymmetrischer Strömung. Ingenieur-Archiv, XI Band, 1952, Heft 4.
- [17] Tuliszka E., Sucharski Z., Walczak J., Rybarczyk J.: Sprężarki promieniowe. Zagadnienia przepływowe, Część I. Teoria i badania przepływu przez promieniowe dyfuzory łopatkowe. PWN, Warszawa-Poznań 1983.
- [18] Wilkinson D.H.: A numerical solution of the analysis and design problems for the flow past one or more aerofoils or cascades, ARC Reports and Memoranda N° 3545, London 1968.

**КОНЦЕПЦИЯ РАСЧЕТА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ  
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСЕВЫХ НАСОСОВ**

**Р е з ю м е**

Доклад посвящен проблеме применения теоретических характеристик решеток профилей в проектировании осевых насосов. Обсуждена программа вычисления обтекания решеток профилей по методу особенностей. С помощью этой программы можно определить теоретические характеристики рабочего колеса и выпрямляющего аппарата осевого насоса в осесимметричном потенциальном потоке идеальной жидкости. Представлено способ уточнения численных результатов потенциального потока, учитыванием влияния вязкости. Описано метод вычисления потерь в решетке профилей основан на концепции пограничного слоя.

**A CONCEPTION OF THEORETICAL CHARACTERISTICS EVALUATION  
OF AEROFOIL CASCADES FOR USE IN AXIAL PUMPS DESIGN**

**S u m m a r y**

The paper is devoted to implementation of aerofoil cascades theoretical characteristics in axial pump desing. An computer programm of flow calculation past aerofoils cascade based on the singularity method is described which enables one the determination of theoretical characteristics of the axial pump rotor and guide apparatus in axisymmetric potential flow. A way of allowing for fluid viscosity is presented in order to make calculation results more realistic. A computer program for pressure losses calculation in cascades is described based an integral method of boundary layer calculation.