

INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOVYCH
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

redakcja

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOVYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

65

WARSZAWA—POZNAŃ 1974

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych
w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględ-
nieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all
aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference
to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk,
skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1974

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 400+90 egz.	Oddano do składania 31 V 1974 r.	
Ark. wyd. 14. Ark. druk. 11.	Podpisano do druku 2 XII 1974 r.	
Papier ilustrac. kl. V, 70 g 70 × 100 cm.	Druk ukończono w grudniu 1974 r.	
Nr zam. 449/30.	F-15/1068.	Cena zł 42, —

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

TERESA TUSZKOWSKA

Gdańsk

Wpływ wzajemnego położenia śrub współbieżnych w układzie tandem na charakterystyki hydrodynamiczne układu*

Praca przedstawia wpływ wzajemnego położenia śrub współbieżnych w układzie tandem w oparciu o wyniki badań własnych. Omówiono badania wybranych zespołów śrub tandem współbieżnych oraz zmianę ich charakterystyk hydrodynamicznych w zależności od współustawienia kąтового ($\Delta\varphi$) obu śrub w zespole, dla wybranych położań osiowych ($\Delta x/R_p$) tych śrub.

Spis oznaczeń

A_E/A_0 – współczynnik powierzchni,

d_p – średnica piasty,

D – średnica śruby,

$J = \frac{V}{nD}$ – współczynnik posuwu,

$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$ – współczynnik naporu,

$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$ – współczynnik momentu,

$m_n = \frac{\Gamma}{4\pi R^2 \omega_0} \frac{2}{\tan \beta}$ – bezwymiarowa wielkość cyrkulacji wirów śrubowych w odniesieniu do prędkości obwodowej,

$m_v = \frac{\Gamma}{4\pi R V_0} \frac{2}{\tan \beta}$ – bezwymiarowa wielkość cyrkulacji wirów śrubowych w odniesieniu do prędkości postępowej,

n – obroty pędnika śrubowego,

P – skok śruby,

Q – moment obrotowy pędnika śrubowego,

R_p – promień śruby przedniej,

T – napór pędnika śrubowego,

V_0 – prędkość dopływu wody do układu,

$\Delta\theta_0$ – wielkość charakteryzująca prędkość

wiru wierzchołkowego indukowana przez cały układ wirów śruby,

Δx – odległość między śrubami układu tandem,

δx – przyrost odległości między śrubami układu tandem,

β – kąt charakteryzujący skok wirów wierzchołkowych,

$\Delta\varphi$ – kąt zawarty między śrubami w układzie tandem,

$\delta\varphi$ – przyrost kąta zawartego między śrubami w układzie tandem,

$\eta = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}$ – współczynnik sprawności,

$\lambda = \frac{J}{\pi}$ – współczynnik posuwu (odniesiony do ωR),

ρ – gęstość cieczy,

ω – prędkość kątowa.

Indeksy

p – odnosi się do śruby przedniej zespołu tandem,

t – odnosi się do śruby tylnej zespołu tandem,

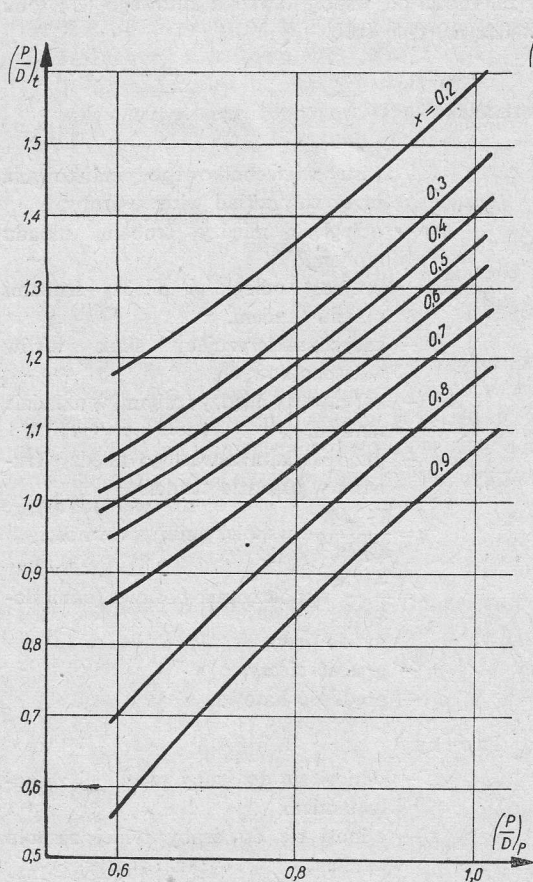
3 – odnosi się do przekroju daleko za pędnikiem.

* Pracę wykonano w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 5.

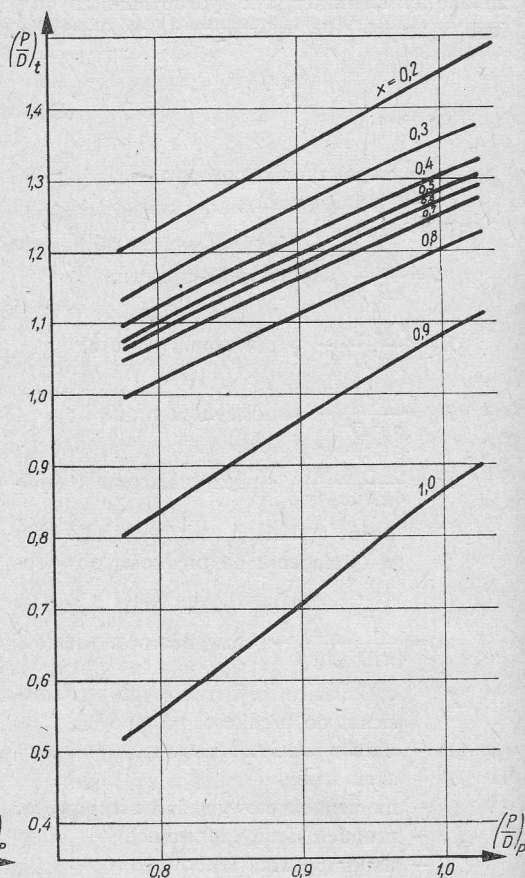
1. Wstęp

Przystąpienie do systematycznych badań śrub silnie obciążonych, a przede wszystkim współbieżnych w układzie tandem, stwarzało potrzebę wyznaczenia odpowiedniej metody określania charakterystyk geometrycznych takich zespołów. Dotychczasowe wyniki prac teoretycznych i doświadczalnych, przeprowadzonych w Samodzielnej Pracowni Pędników Okrętowych IMP PAN, dostarczyły odpowiednich danych co do pola prędkości indukowanych przez pojedynczy pędnik śrubowy. Badania pozwoliły na opracowanie metody określania charakterystyk geometrycznych śruby tylnej w układzie tandem śrub współbieżnych. Metoda ta miała na celu wyznaczenie wstępnej serii modeli zespołów, opierając się na wynikach badań modelowych śrub pojedynczych. Oparto się na serii śrub pojedynczych, odznaczających się dobrą sprawnością i dobrymi własnościami kawitacyjnymi.

Wybrano serię śrub trzyskrzydłowych Gawna, o współczynniku powierzchni $A_E/A_0 = 0,80$ i serię śrub pięcioskrzydłowych Göteborg, o współczynniku powierzchni $A_E/A_0 =$



Rys. 1. Wykres rozkładu skoku śruby tylnej dla badanych układów śrub Gawna $(P/D)_t = f(P/D)_p$, $z = 3$



Rys. 2. Wykres rozkładu skoku śruby tylnej dla badanych układów śrub Göteborg $(P/D)_t = f(P/D)_p$, $z = 5$

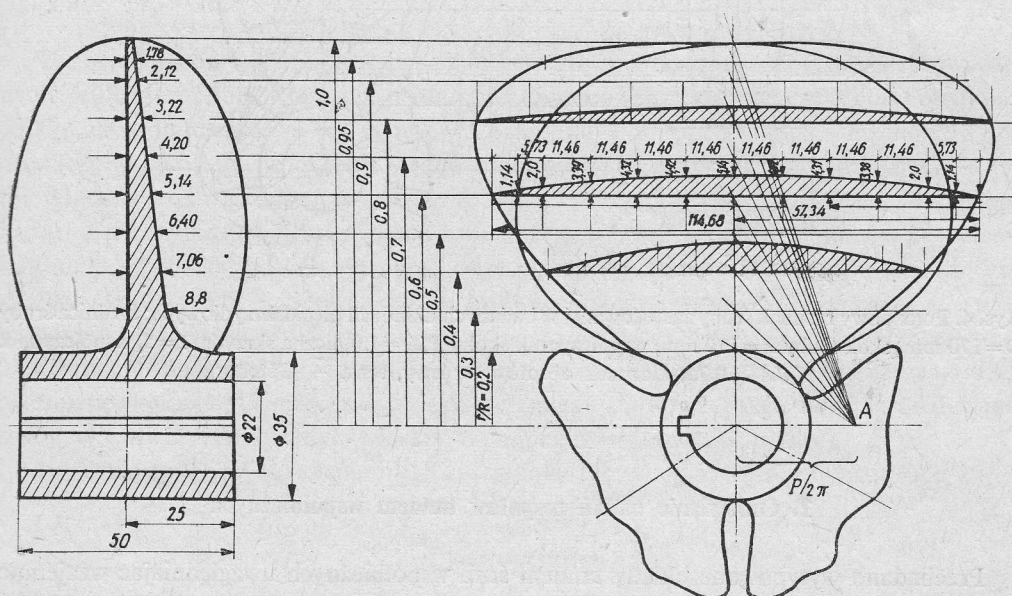
$=0,75$. Wzorując się na serii Gawna wyznaczono trzy układy, a według serii Göteborg – dwa układy różniące się wielkością skoku śruby przedniej i tylnej dostosowanej do niej. Rozkład skoku śruby tylnej dostosowano do pola prędkości indukowanych przez śrubę przednią według metody szczegółowo opisanej w [4]. W przebadanych układach danej serii przyjęto równe średnice obu śrub, a także identyczny kształt ich skrzydeł i profili. Śruby różniły się jedynie wielkością i rozkładem skoku z tym, że przednia śruba ma skok stały. Wielkość współczynników skoku śrub przednich wybrano tak, by pokrywały sobą obszar dużych obciążeń. Przyjęto $(P/D)_p = 0,6; 0,8; 1,0$. Śruby tylne tworzące zespoły z przednimi miały promieniowo zmienny skok. Rozkład skoku śruby tylnej przedstawiono na rys. 1 i 2.

Zgodnie z kolejnością przeprowadzonych badań układy oparte na serii Gawna otrzymały następujące numery:

- układ 03 – śruba przednia $(P/D)_p = 1,0$
 śruba tylna $(P/D_{0,7})_t = 1,25$,
- układ 06 – śruba przednia $(P/D)_p = 0,6$
 śruba tylna $(P/D_{0,7})_t = 0,868$,
- układ 07 – śruba przednia $(P/D)_p = 0,8$
 śruba tylna $(P/D_{0,7})_t = 1,05$.

Inne dane charakteryzujące geometrię obu śrub układu są następujące:

- współczynnik powierzchni $A_E/A_0 = 0,80$,
- współczynnik wielkości piasty $d_p/D = 0,20$,
- liczba skrzydeł $z = 3$,
- nachylenie skrzydeł do osi $\alpha = 0^\circ$.



Rys. 3. Poglądowy rysunek śruby zastosowanej w badanych układach trzyskrzydłowych; średnica śruby $D = 182$ mm, skok śruby $P = 182$ mm, współczynnik skoku $P/D = 1,0$, liczba skrzydeł $z = 3$, współczynnik $A_E/A_0 = 0,8$, kierunek obrotów – lewy, seria – Gawna

Przyjęty kształt profili był typowy dla śrub serii Gawna (odcinek koła) o krawędziach natarcia i spływu zaokrąglonych o promieniu $r=0,002D$.

Na rys. 3 przedstawiono śrubę z serii Gawna zastosowaną w badanych układach.

Zespoły oparte na serii Göteborg otrzymały następujące numery:

układ 08 — śruba przednia $(P/D)_p=0,8$

śruba tylna $(P/D_{0,7})_t=1,11$,

układ 09 — śruba przednia $(P/D)_p=1,0$

śruba tylna $(P/D_{0,7})_t=1,275$.

Pozostałe dane charakteryzujące geometrię obu śrub układu są następujące:

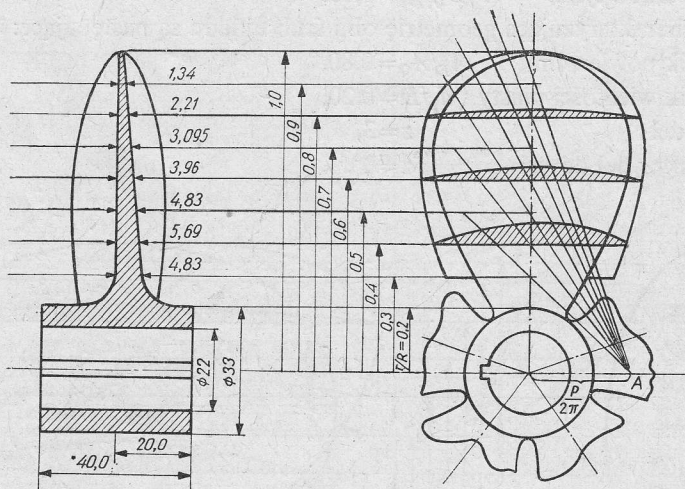
współczynnik powierzchni $A_E/A_0=0,75$,

współczynnik wielkości piasty $d_p/D=0,20$,

liczba skrzydeł $z=5$,

nachylenie skrzydeł do osi $\alpha=0^\circ$.

Przyjęty kształt profili był typowy dla śrub serii Göteborg: odcinek koła z podniesioną stroną cisnącą przy krawędzi natarcia. Na rys. 4 przedstawiono śrubę serii Göteborg zastosowaną w badanych układach.

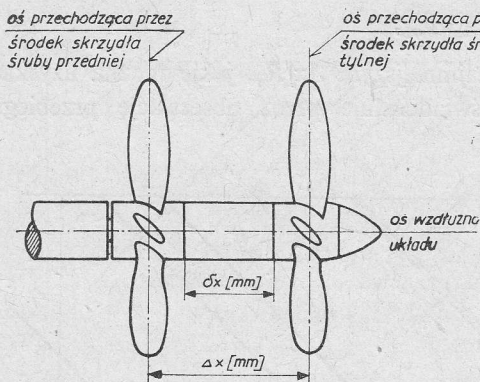


Rys. 4. Poglądowy rysunek śruby zastosowanej w badanych układach pięcioskrzydłowych; średnica śruby $D=170$ mm, skok śruby $P=170$ mm, współczynnik skoku $P/D=1,0$, liczba skrzydeł $z=5$, współczynnik $A_E/A_0=0,75$, kierunek obrotów — lewy, seria — Göteborg

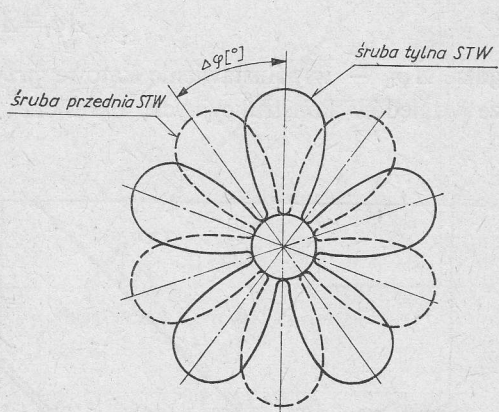
2. Omówienie badań zespołów tandem współbieżnych

Przebadano wytypowane układy tandem śrub współbieżnych uwzględniając wzajemne oddziaływanie poszczególnych śrub. W tym celu przebadano każdy z zespołów przy różnym wzajemnym usytuowaniu śrub zmieniając ich położenie osiowe (Δx) i kątowe ($\Delta \varphi$). Charakterystyki tych wielkości są następujące:

Δx – odległość dwu śrub współbieżnych w układzie tandem, mierzona od punktu przecięcia osi skrzydła śruby przedniej z osią wzdłużną układu, do punktu przecięcia się osi skrzydła śruby tylnej z osią wzdłużną układu (rys. 5) – przy określaniu położenia osiowego wygodniej jest posługiwać się wielkością bezwymiarową, stosunkiem odległości osiowej do promienia śruby przedniej, $\Delta x/R_p$;



Rys. 5. Poglądowy rysunek określający odległość osiową – Δx



Rys. 6. Poglądowy rysunek określający położenie katowe – $\Delta \varphi$

$\Delta \varphi$ – kąt zawarty pomiędzy osią przechodzącą przez środek skrzydła śruby przedniej a osią przechodzącą przez środek skrzydła śruby tylnej (rys. 6). Znak $\Delta \varphi$ jest dodatni, gdy żądany kierunek przestawienia śruby przedniej jest zgodny z kierunkiem obrotu układu.

Z dotychczasowych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych, przeprowadzonych w Samodzielnej Pracowni Pędników Okrętowych i dotyczących pola prędkości daleko za pędnikiem [2, 3, 4] wynika, że w środku, pomiędzy wirami wierzchołkowymi, prędkość indukowana w obrębie strumienia śrubowego ($r/R < 1$) jest najmniejsza – ten rejon można uznać za najkorzystniejszy ze względu na pracę śruby tylnej, tzn. na jej osiągi i własności kawitacyjne. Biorąc to pod uwagę, przy rozpatrywaniu wzajemnego ustawienia katowego obu śrub, starano się określić kąt pomiędzy śrubami w układzie tandem, aby skrzydła śruby tylnej znajdowały się w środku pomiędzy wirami spływającymi ze śruby przedniej.

Określenie uniwersalnego wzoru na $\Delta \varphi$, dla dowolnego $\Delta x/R_p$, jest utrudnione ze względu na zmianę skoku $\tan \beta_3$ linii wirowych wraz ze zmianą $\Delta x/R_p$ i ze względu na oddziaływanie śruby tylnej (wpływ ten jest tym większy, im mniejsze jest $\Delta x/R_p$ – rys. 12).

Korzystniejsze jest określenie nie $\Delta \varphi$ – całkowitego, ale pewnego przyrostu $\delta \varphi_i$:

$$\delta \varphi_i = \frac{\delta x_i}{(R_3)_i (\tan \beta_3)_i},$$

gdzie

$$\delta \varphi_i = \Delta \varphi_i - \Delta \varphi_{i-1},$$

$$\delta x_i = \Delta x_i - \Delta x_{i-1},$$

$(R_3)_i$ – promień strumienia śrubowego uwzględniający kontrakcję w punkcie $[i]$, $(\text{tg } \beta_3)_i$ – skok linii wirowej śruby przedniej w punkcie $[i]$.

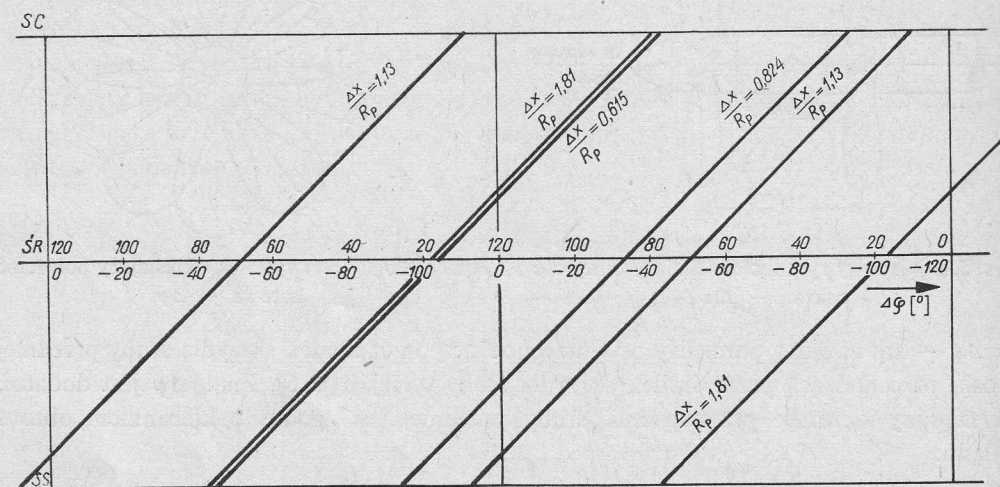
Stąd dla $(\Delta x/R_p)_i$ współustawienie kątowe

$$\Delta \varphi_i = \Delta \varphi_0 + \delta_{\varphi_1} + \delta_{\varphi_2} + \dots + \delta_{\varphi_{i-1}} + \delta_{\varphi_i},$$

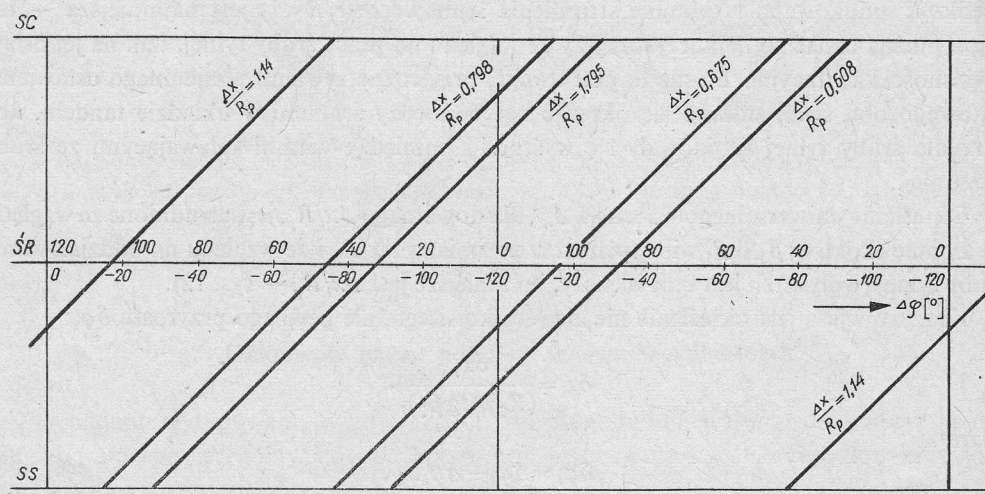
a ogólnie

$$\Delta \varphi_i = \Delta \varphi_{i-1} + \delta_{\varphi_i},$$

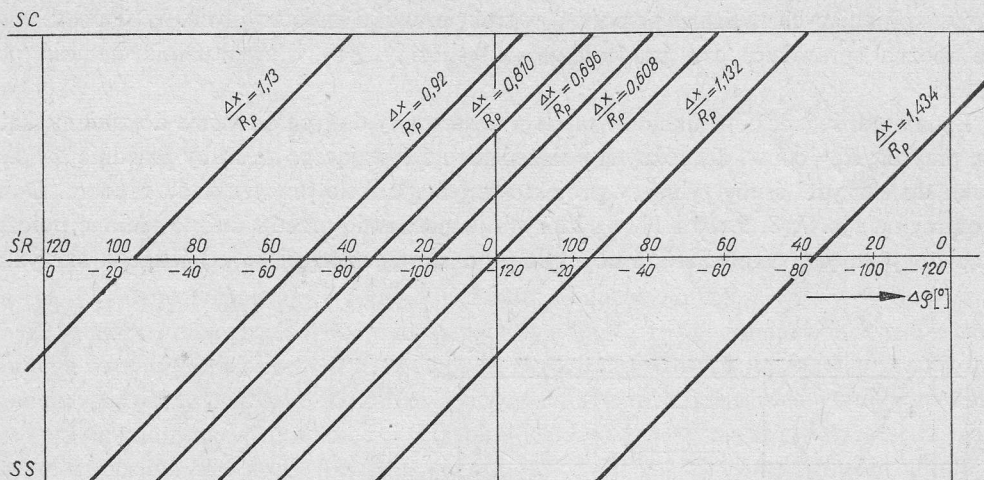
gdzie $\Delta \varphi_0$ – współustawienie kątowe przy najmniejszym $\Delta x/R_p$, jakie można uzyskać ze względów konstrukcyjnych, określone doświadczalnie przez obserwację przebiegu



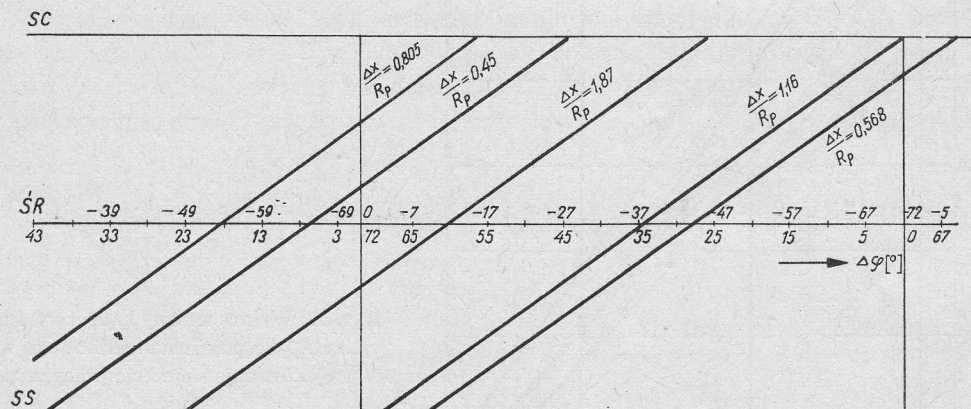
Rys. 7. Wykres zmiany kąta $\Delta \varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$, układ STW 06; $J_{\text{proj}} = 0,35$, s. s. – strona ssąca skrzydła śruby, s. c. – strona cisnąca skrzydła śruby, ś. r. – wir w położeniu środkowym



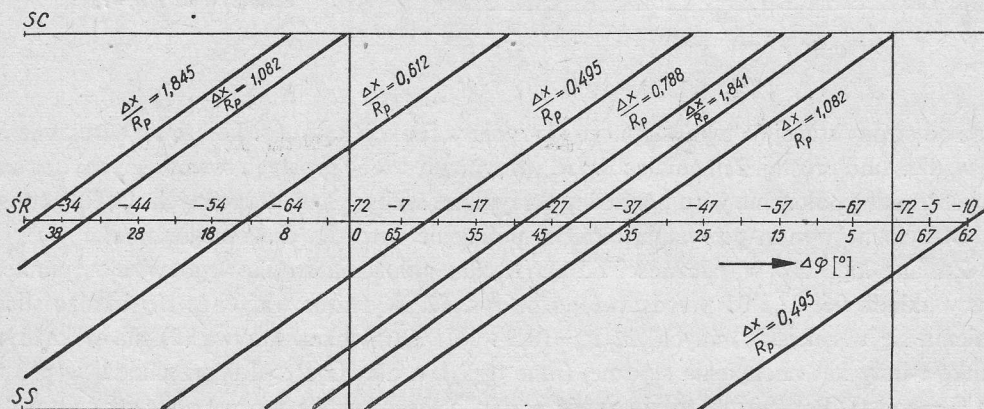
Rys. 8. Wykres zmiany kąta $\Delta \varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$, układ STW 07; $J_{\text{proj}} = 0,55$



Rys. 9. Wykres zmiany kąta $\Delta\varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$, układ STW 03; $J_{\text{proj}} = 0,735$



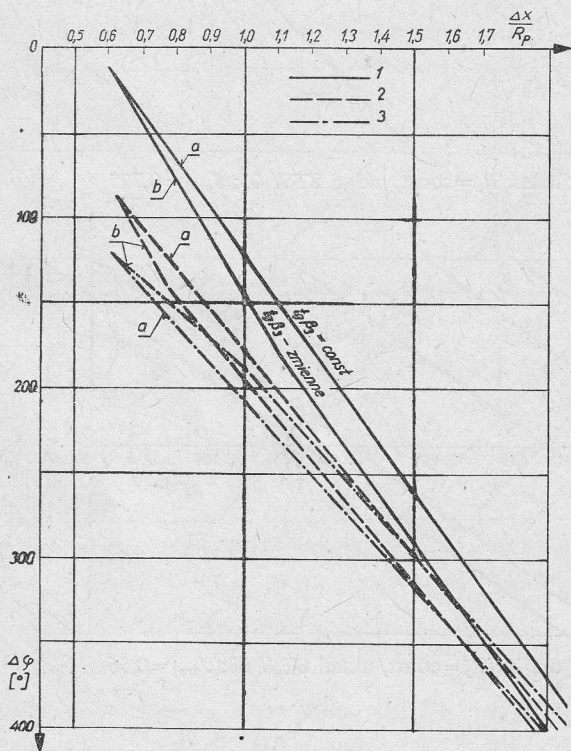
Rys. 10. Wykres zmiany kąta $\Delta\varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$, układ STW 08; $J_{\text{proj}} = 0,56$



Rys. 11. Wykres zmiany kąta $\Delta\varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$, układ STW 09; $J_{\text{proj}} = 0,76$

wirów, spływających ze śruby przedniej, w trakcie badań kawitacyjnych. W ten sam sposób można sprawdzić, czy prawidłowo określiliśmy $\Delta\varphi_i$ i ewentualnie nanieść poprawki.

Badania doświadczalne układów tandem dostarczyły danych odnośnie do zmiany kąta $\Delta\varphi$, przy $\Delta x/R_p = \text{const}$, dla różnych położenia wiru spływającego ze śruby przedniej, w stosunku do skrzydeł śruby tylnej w projektowanym punkcie pracy układu tandem. Dane te mamy na rys. 7, 8, 9, 10 i 11, na których jednocześnie przedstawiono zmianę położenia wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej od strony cisnącej (s. c.) jednego skrzydła,



Rys. 12. Wykres zmiany kąta $\Delta\varphi$ w funkcji $\Delta x/R_p$ dla położenia środkowego wiru w projektowanym punkcie pracy zespołu tandem

$a - \text{tg } \beta_3 = \text{const}$ dla dowolnego $\Delta x/R_p$, $b - \text{tg } \beta_3$ zmienia się wraz ze zmienną $\Delta x/R_p$; 1 – układ STW 06 $P/D_p = 0,6$, 2 – układ STW 07 $P/D_p = 0,8$, 3 – układ STW 03 $P/D_p = 1,0$

oraz od strony ssącej (s. s.) następnego skrzydła w funkcji kąta $\Delta\varphi$. Położenie wiru zmienia się wzdłuż linii prostej. Zmieniając $\Delta x/R_p$ otrzymano szereg prostych równoległych, obrazujących zmianę położenia wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej, dla różnych $\Delta x/R_p = \text{const}$.

Otrzymane wyniki pozwalają określić położenie wiru dla dowolnego $\Delta x/R_p$.

Zmianę kąta $\Delta\varphi$ w zależności od $\Delta x/R_p$ dla położenia środkowego wiru w punkcie pracy układu 06, 07 i 03 przedstawiono na rys. 12. Wyraźnie widać, że $\Delta\varphi$ bardzo silnie zmienia się w zakresie małych $\Delta x/R_p = (0,5 \div 1,0)$. Otrzymana krzywa (2) ma w każdym punkcie inny kąt nachylenia stycznej (inne $\text{tg } \beta_3$), a dla $\Delta x/R_p > 1,0$ przechodzi w prostą ($\text{tg } \beta_3 = \text{const}$). Potwierdza to słuszność podanego wzoru. Nie można obliczać całkowitej zmiany kąta $\Delta\varphi$, a jedynie jego przyrost $\delta\varphi$ na odcinku δx , dla którego $\text{tg } \beta_3 = \text{const}$.

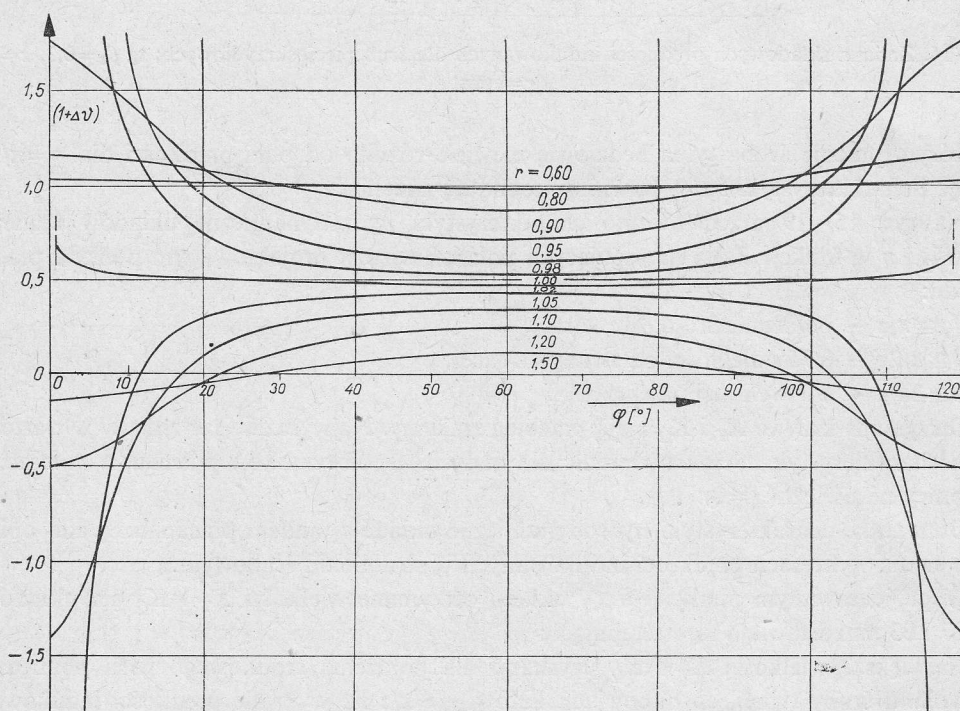
3. Zmiana charakterystyk hydrodynamicznych w zależności od $\Delta\varphi$ dla $\Delta x/R_p = \text{const}$

Aby przystąpić do projektowania układu tandem, a szczególnie śruby tylnej układu, trzeba znać pole prędkości, w którym ma pracować śruba tylna [4].

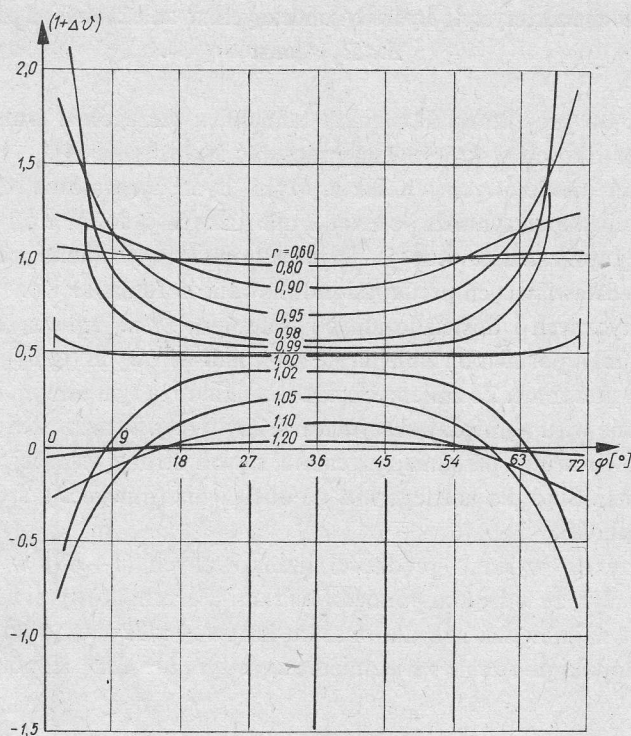
Mając z badań modelowych charakterystyki hydrodynamiczne układów tandem K_T , K_Q i η w funkcji współczynnika posuwu J dla różnych położenia wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej, przeanalizowano je w projektowanym punkcie pracy opierając się na rys. 13 i 14 przedstawiających prędkości indukowane w funkcji r i φ .

Z badań teoretycznych i doświadczalnych wiadomo, że ze zmianą obciążenia śruby (zmiana współczynnika posuwu J) zmienia się skok linii wirowych ($\text{tg } \beta_3$), [1]. W układach tandem wygląda to podobnie. Ze zmianą obciążenia układu, a tym samym i śruby przedniej, zmienia się położenie wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej. Wraz ze zwiększeniem współczynnika posuwu wir śruby przedniej przesuwa się od strony cisnącej do strony ssącej skrzydła śruby tylnej. Stąd dla każdego innego obciążenia (innego J), śruba tylna pracuje w innym polu prędkości.

Wróćmy jeszcze do wykresu prędkości indukowanych ($1+\Delta v$) w funkcji kąta φ . Łatwo da się zauważyć, że w środku pomiędzy wirami wierzchołkowymi wielkość prędkości indukowanych jest najmniejsza i to dla obszaru kątów $\pm\pi/2z$ (licząc od $\varphi=\pi/z$). Można przypuszczać, że dopóki położenie wiru zmienia się w tym obszarze, dopóty pole prędkości,



Rys. 13. Zmiana składowych prędkości indukowanych dla śrub trzyskrzydłowych; $\text{tg } \beta_3 = 0,3$, $z = 3$, $r = \text{const}$



Rys. 14. Zmiana składowych prędkości indukowanych dla śrub pięcioskrzydłowych; $\operatorname{tg} \beta_3 = 0,3$, $z = 5$, $r = \text{const}$

w którym pracuje śruba tylna będzie się niewiele różniło od pola prędkości dla $\varphi = \pi/z$, a więc i charakterystyki śruby powinny trochę się zmieniać.

Na rys. 15 - 19 przedstawiono charakterystyki hydrodynamiczne układów tandem K_T , K_Q i η w funkcji J dla następujących położenia wiru w projektowanym punkcie pracy układu:

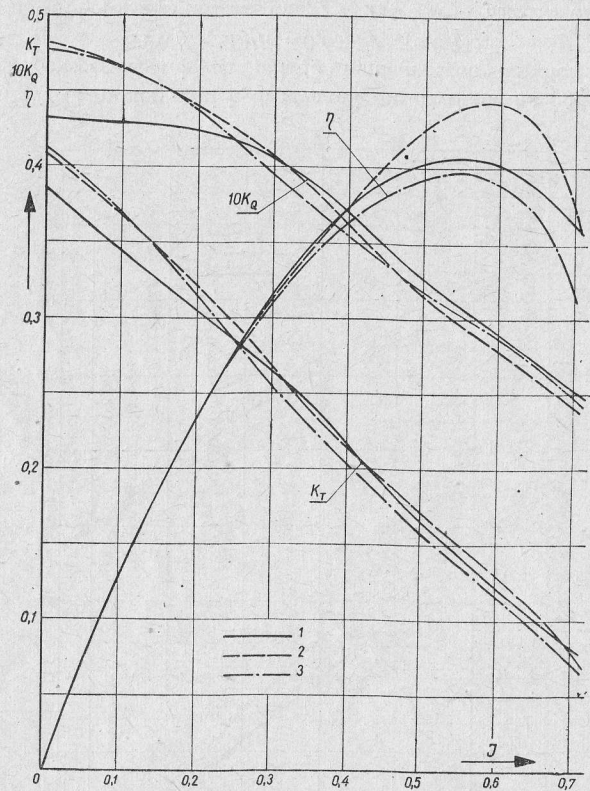
- $\varphi \cong \pi/z$ — położenie środkowe wiru,
- $\varphi \cong \pi/2z$ — 0,75 odległości od strony cisnącej,
- $\varphi \cong 2\pi/z$ — wir wchodzi na skrzydło.

Otrzymane krzywe K_T i K_Q mają przebieg zmienny. Najwyraźniejsze zmiany w wartościach charakterystyk można stwierdzić dla małych współczynników posuwu, a zwłaszcza dla pracy na uwięzi ($J=0$).

Otrzymane charakterystyki hydrodynamiczne układów tandem przeanalizowano opierając się na wykresach prędkości indukowanych w strumieniu śrubowym.

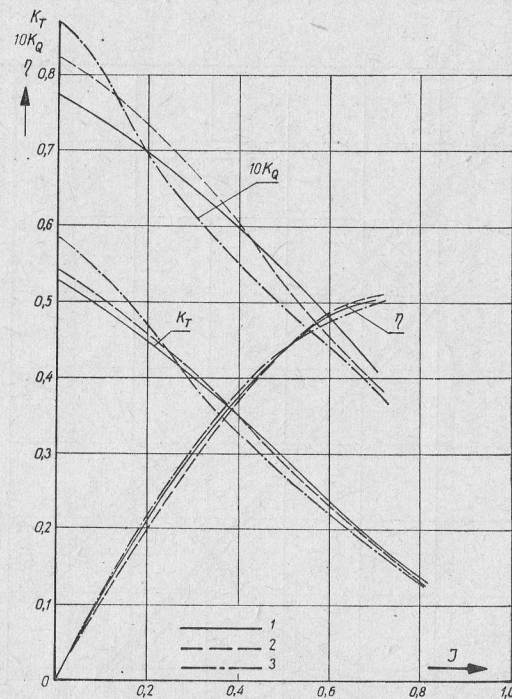
W projektowanym punkcie pracy układu otrzymane wielkości K_T i K_Q dla układów 06, 07 i 03 przedstawiają się następująco:

Największe wielkości K_T i K_Q uzyskano dla położenia środkowego wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej, co odpowiada kątowi $\varphi = \pi/z$ na wykresie prędkości indukowanych, gdzie śruba tylna pracuje w rejonie charakteryzującym się najmniejszą niejednorodnością.



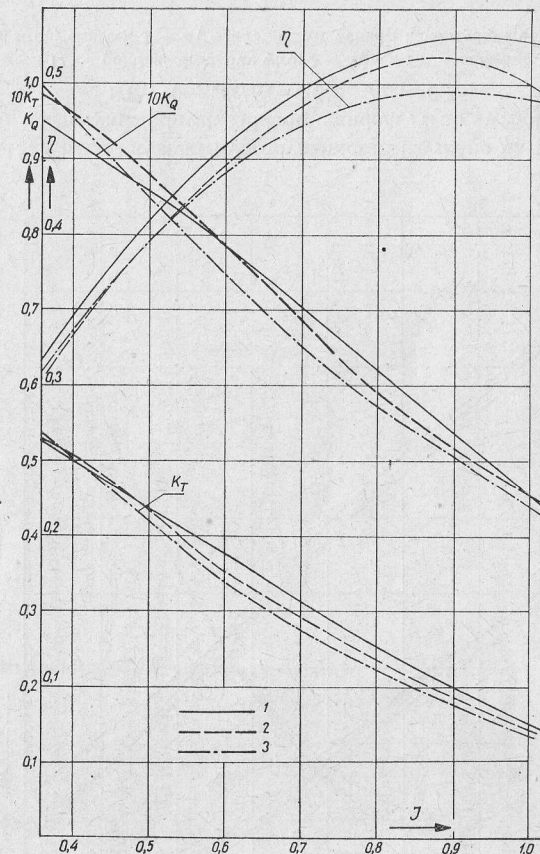
Rys. 15. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 06, $\Delta x/R_p=0,615$, $J_{proj}=0,35$,

1 - $\Delta\varphi=+17^\circ$ - położenie środkowe wiru, 2 - $\Delta\varphi=+50^\circ$ - odległość wiru $\sim 0,75$ od strony cisnącej, 3 - $\Delta\varphi=+75^\circ$ - wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



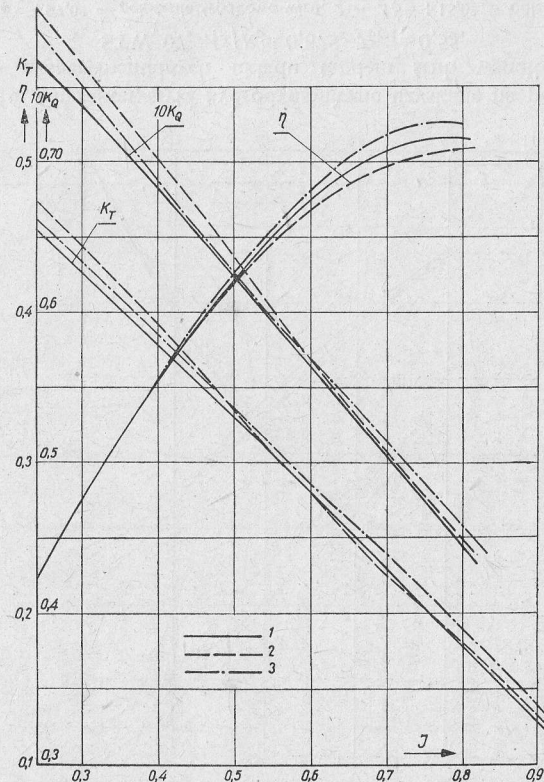
Rys. 16. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 07, $\Delta x/R_p=0,675$, $J_{proj}=0,55$,

1 - $\Delta\varphi=+97,0^\circ$ - położenie środkowe wiru, 2 - $\Delta\varphi=+15,0^\circ$ - odległość wiru $\sim 0,74$ od strony cisnącej, 3 - $\Delta\varphi=+45,0^\circ$ - wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



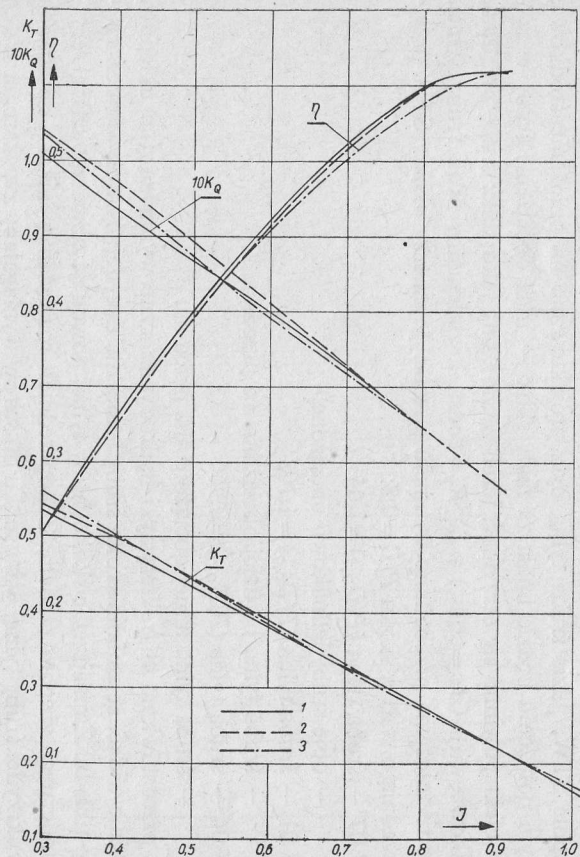
Rys. 17. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 03, $\Delta x/R_p = 0,608$, $J_{proj} = 0,735$,

1 — $\Delta\varphi = 0^\circ$ — położenie środkowe wiru, 2 — $\Delta\varphi = +30^\circ$ — odległość wiru 0,75 od strony cisnącej, 3 — $\Delta\varphi = +60^\circ$ — wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



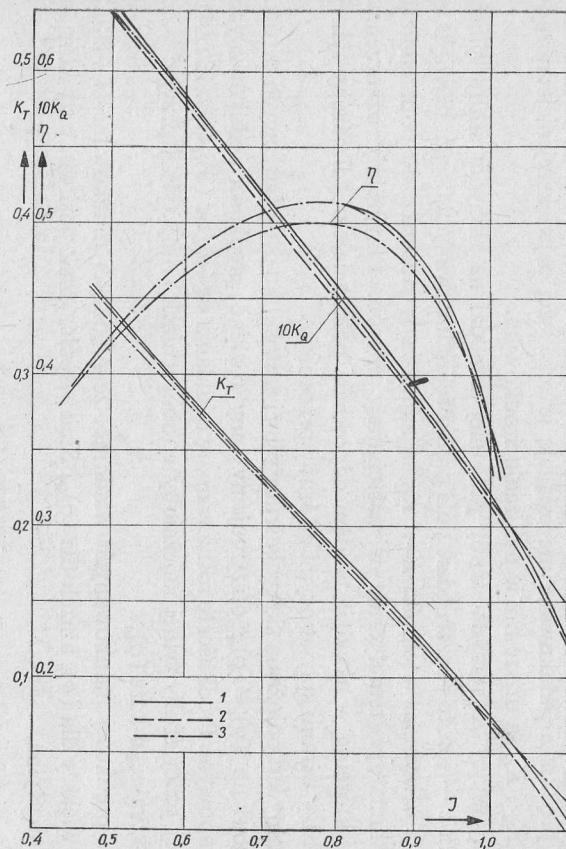
Rys. 18. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 08, $\Delta x/R_p = 0,45$, $J_{proj} = 0,56$,

1 — $\Delta\varphi = +7^\circ$ — położenie środkowe wiru, 2 — $\Delta\varphi = +25^\circ$ — odległość wiru $\sim 0,75$ od strony cisnącej, 3 — $\Delta\varphi = +43^\circ$ — wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



Rys. 19. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 09, $\Delta x/R_p = 0,495$, $J_{proj} = 0,76$,

1 - $\Delta\varphi = +61^\circ$ - położenie środkowe wiru, 2 - $\Delta\varphi = +7^\circ$ - odległość wiru $\sim 0,75$ od strony cisnącej, 3 - $\Delta\varphi = +25^\circ$ - wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



Rys. 20. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;
STW 08, $\Delta x/R_p = 0,568$, $J_{proj} = 0,56$,

1 - $\Delta\varphi = +27,7^\circ$ - położenie środkowe wiru, 2 - $\Delta\varphi = +41,6^\circ$ - odległość wiru $\sim 0,75$ od strony cisnącej, 3 - $\Delta\varphi = +13,9^\circ$ - w pobliżu strony cisnącej

Jeżeli wir spływający ze śruby przedniej znajduje się w odległości $\sim 0,75$ od strony cisańcej skrzydła śruby tylnej, co na wykresie prędkości indukowanych odpowiada kątowi $\varphi \cong \pi/2z$, gdzie prędkości indukowane nie osiągają jeszcze swej największej niejednorodności, wartości K_T i K_Q są niższe niż w położeniu środkowym.

Gdy wir spływający ze skrzydła śruby przedniej wchodzi na skrzydła śruby tylnej, a więc dla $\varphi \cong 2\pi/z$ — jest to obszar, gdzie pole prędkości indukowanych osiąga największą niejednorodność, otrzymane wielkości K_T i K_Q są najniższe w stosunku do poprzednich. Można to wytłumaczyć teoretycznie w następujący sposób. Przyjmijmy oznaczenia:

$(\varphi)_{sr}$ — kąt, któremu w układzie tandem odpowiada położenie skrzydła śruby tylnej w środku pomiędzy wirami spływającymi ze śruby przedniej,

$(\varphi)_a$ — aktualny kąt położenia skrzydła śruby tylnej w stosunku do spływających wirów.

Dla każdego kąta $(\varphi)_a \neq (\varphi)_{sr}$ otrzymujemy inny rozkład prędkości indukowanych w strumieniu śrubowym. Prędkości te rosną w miarę oddalania się $(\varphi)_a$ od $(\varphi)_{sr}$ (rys. 13 i 14). Dla prawidłowej pracy śruby tylnej należałoby w obliczeniach śruby tylnej przyjąć pole prędkości dla aktualnego kąta $(\varphi)_a$.

Z wykresów prędkości indukowanych wiadomo, że prędkości indukowane $(1 + \Delta\vartheta_{sr})$ i $(1 + \Delta\vartheta_{rów})$ są większe dla $(\varphi)_a$ aniżeli dla $(\varphi)_{sr}$. Stąd współczynnik posuwu, przy którym pracowałaby śruba tylna

$$(J_t)_a = \lambda_t \pi = \frac{1 + m_{v3}(1 + \Delta\vartheta_{sr})}{\frac{1}{\lambda_2} - m_{v3} \operatorname{tg} \frac{\beta_3}{x_3} (1 + \Delta\vartheta_{rów})}.$$

Dla tego współczynnika posuwu dobrana śruba seryjna o stałym rozkładzie skoku, będzie miała odpowiednio większy skok zastępczy. Po uwzględnieniu pracy śruby tylnej na polu niejednorodnym otrzymano większy promieniowy rozkład skoku dla śruby tylnej pracującej w położeniu $(\varphi)_a$.

Stąd w zespole STW, gdzie śruba tylna była projektowana na położenie środkowe, w każdym innym położeniu będzie miała za mały skok — inne obciążenie śruby w zespole. Taki sam efekt powinno się otrzymać, jeżeli zachowamy jako stałe: śrubę przednią, położenie środkowe wiru ($\Delta\varphi = \text{const}$) i $\Delta x/R_p = \text{const}$, a zmieniamy skok śruby tylnej.

Zachowując te założenia przebadano w tunelu kawitacyjnym trzy układy STW przyjmując śrubę przednią o stałym skoku $P/D = 0,8$:

układ STW 07 — śruba tylna $(P/D_{0,7}) = 1,05$

— obie śruby jednakowo obciążone,

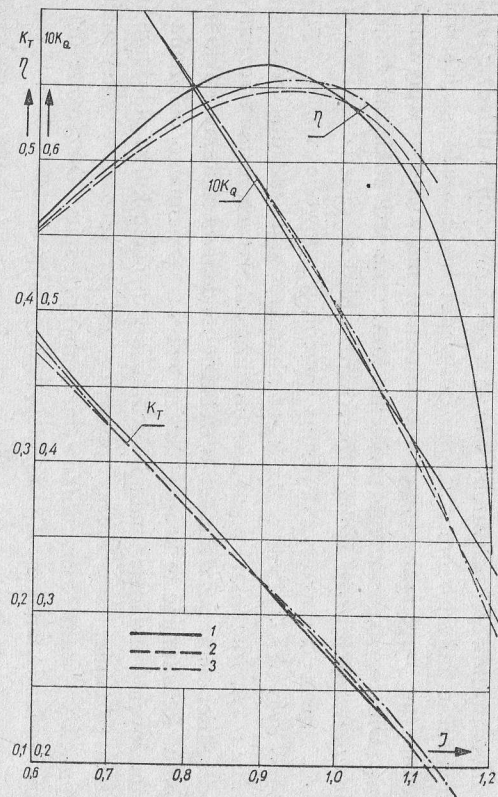
układ STW 01 — śruba tylna $(P/D_{0,7}) = 1,108$

— śruba tylna bardziej obciążona niż przednia,

układ STW 04 — śruba tylna $(P/D_{0,7}) = 0,966$

— śruba tylna mniej obciążona niż przednia.

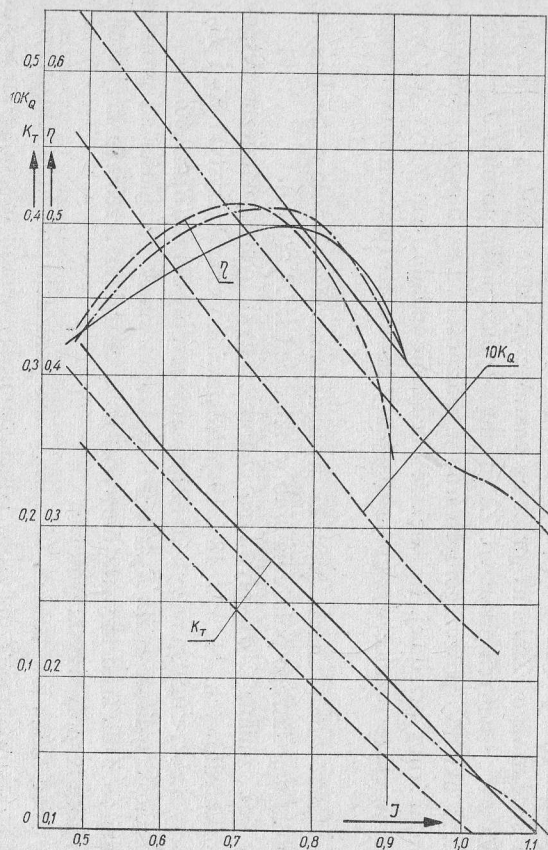
Na rys. 22 przedstawiono charakterystyki hydrodynamiczne wymienionych układów, z których wyraźnie widać, że zmiana skoku śruby tylnej ma decydujący wpływ na charakterystyki całego układu. Zmniejszenie skoku śruby tylnej powoduje obniżenie charakterystyk hydrodynamicznych zespołu tandem. Z poprzednich rozważań wynikało, że zmiana kąta położenia skrzydeł śruby tylnej w stosunku do wirów wymagałaby zwiększenia skoku śruby tylnej.



Rys. 21. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układu tandem śrub współbieżnych;

STW 09, $\Delta x/R_p = 0,612$, $J_{proj} = 0,76$,

1 - $\Delta\varphi = +14^\circ$ - położenie środkowe wiru, 2 - $\Delta\varphi = +68^\circ$ - odległość wiru $\sim 0,25$ od strony cisnącej, 3 - $\Delta\varphi = +51^\circ$ - wir wchodzi na skrzydło śruby tylnej



Rys. 22. Charakterystyki hydrodynamiczne uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych układów tandem śrub współbieżnych; $\Delta x/R_p = 0,675$, $J = 0,55$ (wir w położeniu środkowym), STW 01, 07,

Reasumując widzimy, że dla każdego $(\varphi)_a \neq (\varphi)_{si}$ śruba tylna będzie miała za mały skok (mniej obciążona) czego wynikiem będą mniejsze wartości K_T i K_Q . Stąd na rys. 15, 16 i 17 otrzymaliśmy w projektowanym punkcie pracy maksymalne wielkości K_T i K_Q dla położenia środkowego. Zmienny przebieg charakterystyk ze zmianą współczynnika posuwu wynika z tych samych przyczyn. Ze zmianą współczynnika posuwu J zmienia się obciążenie całego układu i poszczególnych śrub w zależności od usytuowania śruby tylnej pomiędzy wirami śruby przedniej. Im większe obciążenie układu, tym wpływ jest wyraźniejszy, stąd największe różnice występują dla pracy na uwięzi (maksymalne obciążenie układu).

Dotychczas omówiono charakterystyki hydrodynamiczne zespołów tandem trzyskrzydłowych dla najbliższego położenia śrub w układzie ($\Delta x/R_p \cong 0,60$).

Zobaczmy jak zmiana $\Delta\varphi$ wpływa na charakterystyki hydrodynamiczne zespołów tandem pięcioskrzydłowych. Na rys. 18 i 19 przedstawiono charakterystyki K_T i K_Q dla różnych $\Delta\varphi$ przy $\Delta x/R_p < 0,50$, a na rys. 20 i 21 te same zespoły dla $\Delta x/R_p \cong 0,60$.

Zespoły pięcioskrzydłowe o $\Delta x/R_p \cong 0,60$ (ten sam stosunek odległości od promienia śruby przedniej co i dla śrub trzyskrzydłowych) mają charakter przebiegu krzywych K_T i K_Q taki sam jak i zespoły trzyskrzydłowe.

Najlepsze osiągi zespołów tandem 08 i 09 w ich punktach projektowych otrzymano dla położenia środkowego skrzydła śruby tylnej, pomiędzy wirami spływającymi ze śruby przedniej (równoznaczne ze środkowym położeniem wiru pomiędzy skrzydłami śruby tylnej). Dla każdego innego położenia wiru otrzymano wartości na K_T i K_Q niższe i to tym znacznie, im bardziej wir jest oddalony od położenia środkowego. Jest to wynikiem zmiany pola prędkości, w którym pracuje śruba tylna (inne obciążenie śrub w zespole trzyskrzydłowym).

Na rys. 18 przedstawiono charakterystyki K_T i K_Q dla STW 08, gdzie $\Delta x/R_p = 0,45$. W tym zespole przebieg charakterystyk nie ma tej prawidłowości, jaka miała miejsce dla $\Delta x/R_p \cong 0,600$. Wszystkie parametry oprócz $\Delta x/R_p$ pozostały niezmienione, wobec czego przyczyny nieprawidłowości należałoby szukać w zbliżeniu śrub w układzie tandem. Dotychczas na podstawie danych teoretycznych i doświadczalnych wiadomo, jak wpływa praca śruby przedniej na pracę śruby tylnej, nic natomiast nie wiemy o wpływie śruby tylnej na przednią. Dla rozwiązania tego problemu konieczna jest dokładna znajomość pola prędkości indukowanych przed śrubą i to w bardzo bliskim sąsiedztwie. Na skutek mało rozeznaczonych zmian charakterystyk śruby przedniej spowodowanych wpływem śruby tylnej, trudno było określić wpływ $\Delta x/R_p$ na charakterystyki układu. Obecnie prowadzone są badania w tym kierunku i po uzyskaniu bliższych danych zostanie rozpatrzony wpływ zmiany odległości osiowej $\Delta x/R_p$ śrub w układzie tandem na charakterystyki hydrodynamiczne zespołu. Reasumując tę krótką analizę wpływu wzajemnego położenia kąтового śrub współbieżnych w układzie tandem, dochodzimy do wniosku, że położenie śruby tylnej w stosunku do przedniej jest wówczas optymalne, gdy skrzydła śruby tylnej znajdują się w środku pomiędzy wirami wierzchołkowymi śruby przedniej. Otrzymane dla tego położenia wielkości hydrodynamiczne K_T i K_Q mają maksymalne wartości.

Literatura

- [1] A. M. Basin, I. J. Miniowin, *Teorija i rasczet griebnych wintow*. Sudpromgiz, 1963.
- [2] T. Koronowicz, *Określenie pola prędkości wiru o kształcie prawidłowej linii śrubowej*. Biuletyn IMP PAN nr 581, 1968.
- [3] T. Koronowicz, *Analiza pola prędkości układu wirów śrubowych*. Biuletyn IMP PAN nr 642, 1969.
- [4] T. Koronowicz, T. Tuszkowska, *Określanie charakterystyk geometrycznych śruby tylnej układów tandem współbieżnych*. Biuletyn IMP PAN nr 20/695, 1971.

Влияние взаимного расположения соосных гребных винтов с одинаковым направлением вращения в системе tandem на гидродинамические характеристики системы

Резюме

В работе представлено влияние взаимного расположения гребных винтов с одинаковым направлением вращения в системе tandem, определенное на основе собственных исследований.

Обсуждаются исследования избранных составов гребных винтов с одинаковым направлением вращения в системе tandem, а также изменение гидродинамических характеристик этих составов в зависимости от углового взаиморасположения ($\Delta\varphi$) обоих винтов для избранных аксиальных расположений ($\Delta x/R_p$).

Определение предварительной серии моделей составов tandem основано на сериях одиночных винтов. Избраны серия трёхкрыльчатых винтов Гауна отношением $A_E/A_0=0,80$ и серия пятикрыльчатых винтов отношением $A_E/A_0=0,75$. На основе серии Гауна определены три системы, а на основе серии Гетеборг — две системы. Системы различались величинами шага, как переднего винта, так и приспособленного к нему заднего винта.

Величины коэффициентов шага передних винтов $(P/D)_p$ подобраны так, чтобы охватывать собой диапазон больших нагрузок. Задние винты, образующие с ними составы характеризовались радиально изменяющимся шагом.

Для перечисленных составов tandem проведены экспериментальные исследования с учетом взаимного воздействия отдельных винтов системы. Изменялись, как аксиальное ($\Delta x/R_p$), так и угловое расположение ($\Delta\varphi$).

На рис. 15 - 21 представлены примерно полученные результаты исследований гидродинамических характеристик составов tandem гребных винтов с одинаковым направлением вращения K_T , K_Q , η в функции J для $\Delta x/R_p = \text{const}$ при изменении $\Delta\varphi$.

Из анализа полученных результатов следует, что взаимное угловое расположение ($\Delta\varphi$) соосных гребных винтов с одинаковым направлением вращения в системе tandem очень сильно влияет на гидродинамические характеристики системы.

Можно доказать, что оптимальное расположение заднего винта по отношению к переднему в системе tandem достигается тогда, когда крылья заднего винта находятся в середине между вершинными вихрями переднего винта. Полученные для этого расположения гидродинамические характеристики системы K_T , K_Q достигают максимального значения.

The Influence of Mutual Propeller Location in a Tandem Co-Rotating Propeller Set on Hydrodynamic Characteristics of the Set

Summary

Based on the author's investigations, the influence of mutual propeller location in a tandem co-rotating propeller set is presented in the paper.

Investigations of selected tandem co-rotating propeller sets are described and the influence of the

angle alignment ($\Delta\varphi$) of the both propellers for selected locations on the axis ($\Delta x/R_p$) on hydrodynamic characteristics of the sets is discussed.

The determination of the preliminary series of tandem propeller set models was based on a single propeller series. The Gawn three-bladed propeller series of $A_E/A_0 = 0.80$ and the five-bladed propeller series of $A_E/A_0 = 0.75$ were selected. Based on the Gawn series three sets were determined and based on the Göteborg series, two sets were determined. The sets differed in propeller pitch values both for the front propeller and the rear propeller, which was matched to the front one.

Front propeller pitch ratios $(P/D)_p$ were selected so as to cover the large load region. Rear propellers in the sets had radially varying pitches.

Experimental investigations of the above tandem propeller sets were carried out by taking into account the mutual influence of particular propellers of the set. Both the axial location ($\Delta x/R_p$) and the angular one ($\Delta\varphi$) were changed.

Experimental results i.e. hydrodynamic characteristics of tandem co-rotating propeller sets K_T , K_Q , η versus J for $\Delta x/R_p = \text{const}$ and variable $\Delta\varphi$ are exemplified in Figs 15 - 21.

The analysis of the results obtained showed that hydrodynamic characteristics of tandem co-rotating propeller sets are to a great extent affected by the mutual angular location $\Delta\varphi$.

It can be stated that the location of the rear propeller in relation to the front one in a tandem set is the optimum one when the rear propeller blades are placed in the middle between the tip vortices created by the front propeller. Hydrodynamic characteristics K_T and K_Q of the set obtained for this location have maximum values.