

Dzielimy mianowicie cały wirnik na szereg wirników częściowych, przez które przepływają jednakowe ilości wody i zakładamy, że w każdym przekroju takiej elementarnej strugi cząstki wody posiadają prędkość jednakową. Wynika stąd, że przekroje o jednakowych składowych promieniowych prędkości C_r powinny mieć pola równe oraz tworzyć powierzchnie ortogonalne do lejowatych powierzchni obrotowych, oddzielających sąsiednie strugi. Założenie to daje nam tylko przybliżony obraz przepływu wody przez wirnik, nie uwzględnia bowiem wpływu różnicy promieni krzywizny ρ' i ρ /rys.12/ na zmianę prędkości wzdłuż przekrojów ortogonalnych.

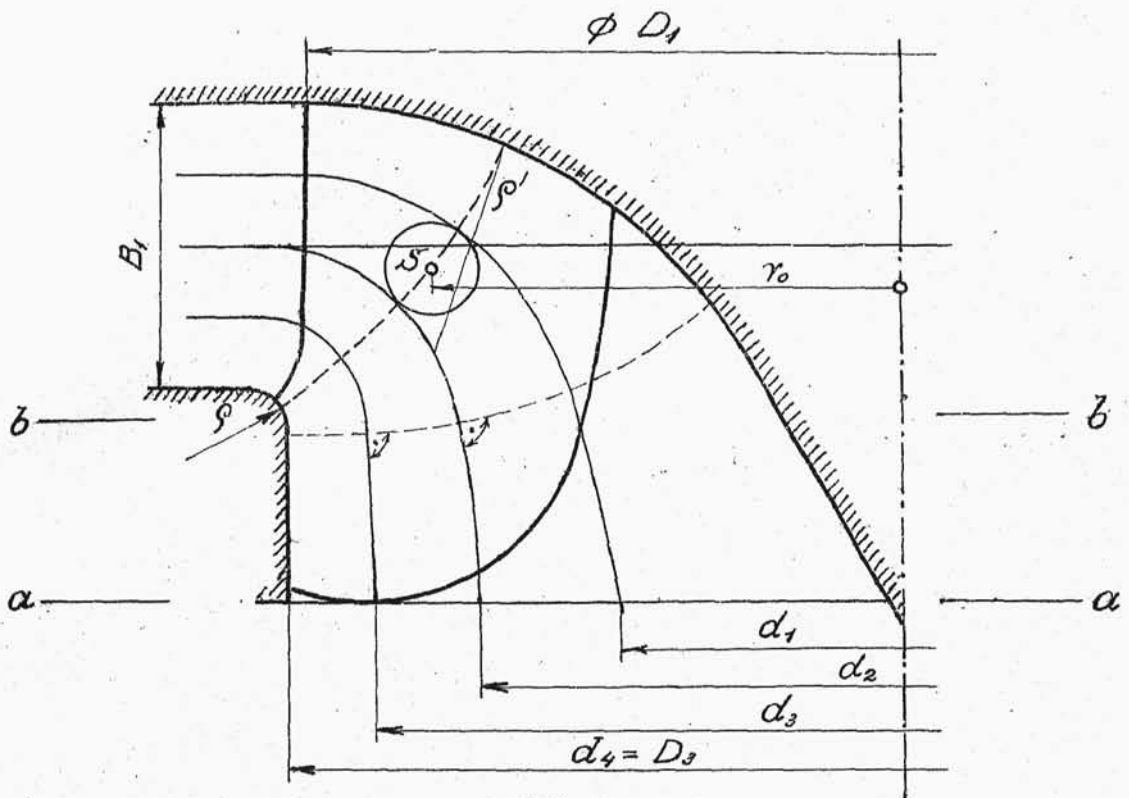
W przekroju osiowym wirnika należy więc wyrysować szereg krzywych, stanowiących linje tworzące wspomnianych powierzchni obrotowych oraz poprowadzić do tych krzywych trajektorje ortogonalne. W myśl założenia, przy podziale wirnika na m strug elementarnych, wydatek jednej strugi będzie równy

$$q = \frac{Q}{m}$$

Ponieważ zaś pola przekrojów:

$$f = 5.2 \pi r_0$$

wzdłuż ortogonalii są jednakowe, przeto składowa pro-



rys. 12.

mieniowa prędkości wody C_r w całym przekroju ortogonalnym wirnika wyniesie:

$$C_r = \frac{Q}{m \cdot f} = \frac{Q}{m \cdot 2\pi r_0 S}$$

UWAGA: Składowa promieniowa C_r nie jest ściśle "promieniową", lecz rzutem prędkości bezwzględnej C na płaszczyznę przechodzącą przez oś wirnika. W płaszczyźnie tej C_r może mieć dowolny kierunek względem osi. Z tego względu nosi ona również nazwę składowej "merydjonalnej".

Liczbę strug obieramy zależnie od wartości stosunku B/D_1 i wielkości wirnika. Im większy jest wirnik oraz im dalej odsunięty jest dolny pierścień od osi turbiny, czyli im bardziej zakrzywione są krawędzie łopatek, tem większej dokładności wymaga wyznaczenie prędkości wody. Liczby orientacyjne dla turbin średniej wielkości podaje tablica:

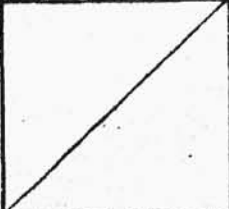
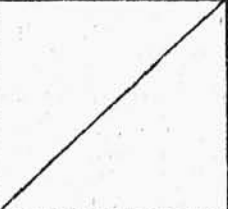
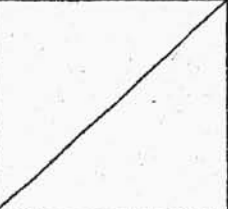
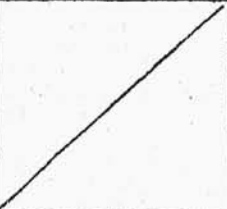
B/D	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{1}{2}$	$>0,5$
m	2	2	3	4	5	6	6	7	7	8

Koło zasilające dzielimy szeregiem płaszczyzn równoległych na m strug o jednakowej grubości /rys.12/, przekrój zaś $\alpha-\alpha$ u wyjścia z wirnika do rury ssącej na m przekrojów pierścieniowych o polach jednakowych. Często można podzielić wirnik na przekroje pierścieniowe również w pobliżu gardzieli $\beta-\beta$. Następnie łączymy proste wejściowe z wyjściowymi linjami łagodnie zakrzywionymi. Rysujemy trajektorje ortogonalne i sprawdzamy tożsamości przekrojów, obliczając iloczyny $S \cdot \eta$. Gdy wartości ich na jednej ortogonalni różnią się znacznie, poprawiamy w tem miejscu linje prądu, poczem kreślimy nowe trajektorje i sprawdzamy je jak po-

przednio.

Przy podziale na strugi elementarne otworu wylotowego najlepiej jest posilkować się metodą rachunkową. Przyjmując oznaczenia, jak na rysunku, możemy ułożyć następującą tabelkę:

$$f = \frac{F_3}{m} = \frac{\pi D_3^2}{4 \cdot m}$$

$f_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = f$	$f_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = 2f$	$f_3 = 3f \dots$	$f_n = mf$
			
d_1	d_2	d_3	d_m

Gdy wał turbiny przechodzi przez rurę ssącą, co ma zawsze miejsce w turbinach o osi poziomej, wtedy przekrój jednej strugi

$$f = \left(\frac{\pi D_3^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{1}{m}$$

w powyższej zaś tabelce będziemy mieli odpowiednio:

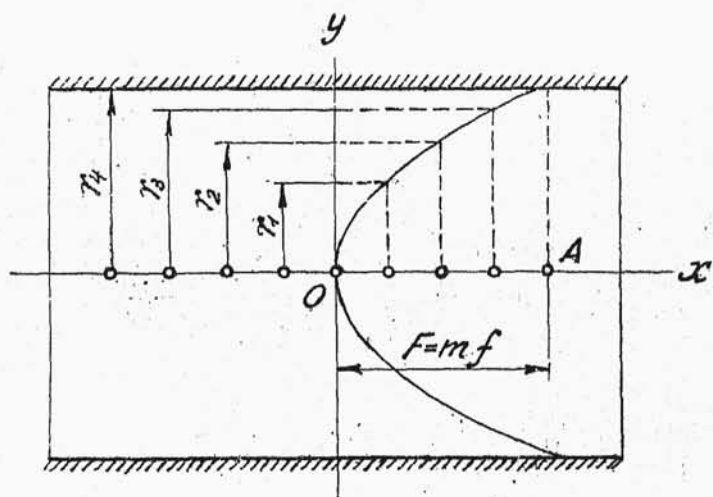
$$f_1 = f + \frac{\pi d^2}{4}; f_2 = f_1 + f; f_3 = f_1 + 2f \dots f_m = f_1 + (m-1)f$$

Mniej dogodną, a nadewszystko mniej dokładną

jest metoda graficzna. Zależność pola koła od promienia jest paraboliczna

$$f = \pi r^2 \quad \text{lub} \quad r^2 = \left(\frac{1}{\pi}\right)f$$

Jeżeli zatem oś przewodu przyjmiemy za oś odciętych jakiejkolwiek paraboli $y^2 = 2px$, to dzie-



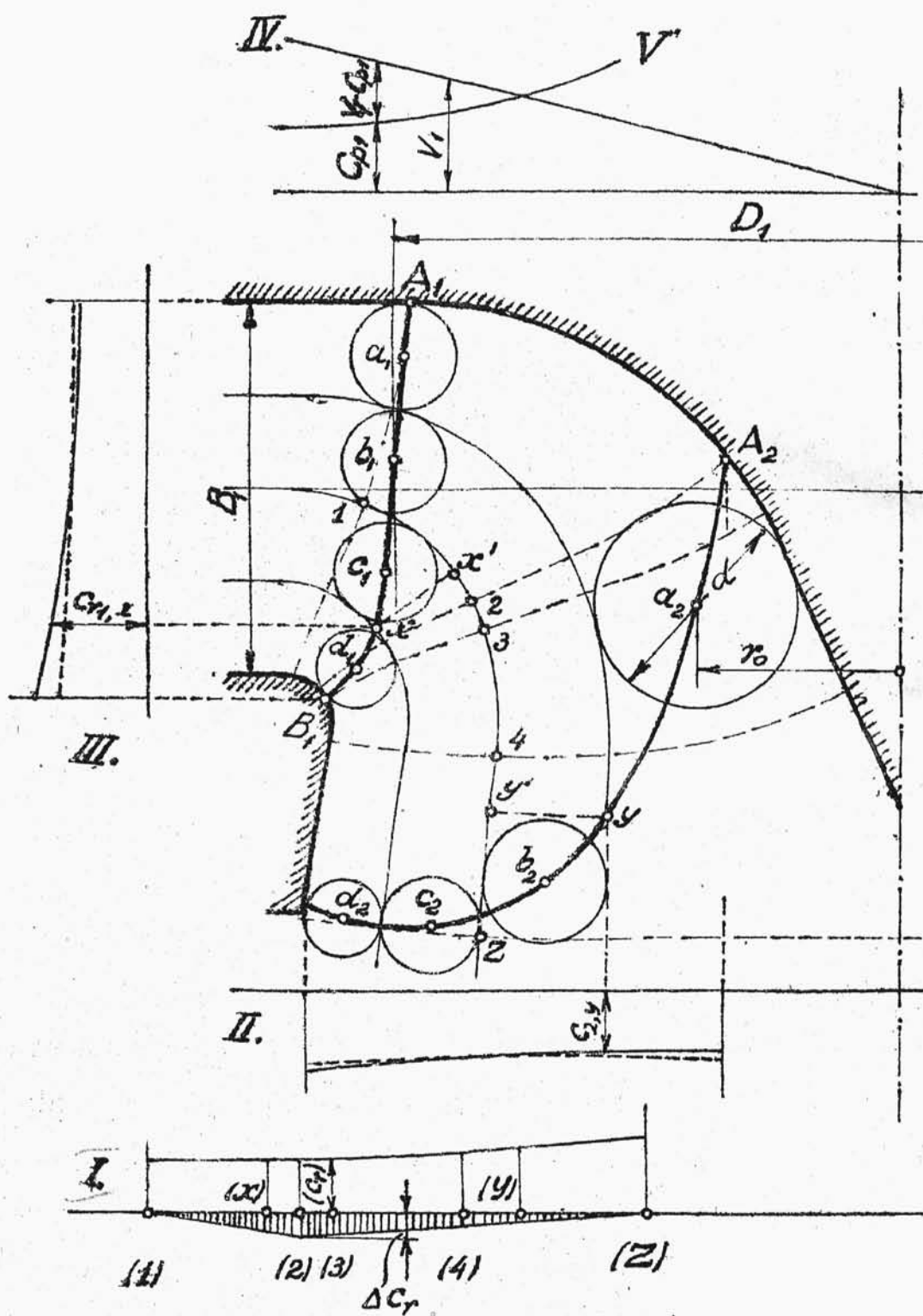
rys.13.

łąc odciętą OA /rys.13/ na m równych odcinków, otrzymamy jako rzędne promienie kół, dzielących cały przekrój na pierścienie o polach jednakowych.

5. WYKRESY PRĘDKOŚCI.

Mając linie prądu ostatecznie ustalone możemy znaleźć składowe promieniowe prędkości wody w każdym punkcie wirnika, a więc i w dowolnym punkcie krawędzi łopatki. Aby mieć wyraźny obraz zmienności tej składowej, zarówno w obrębie całego wirnika, jak i wzdłuż krawędzi łopatki, możemy zastosować następującą interpretację graficzną.

Wyprostowujemy jedną z linii prądu, najlepiej środkową /rys.14/ i oznaczamy na niej /1/, /2/, /3/,, odpowiadające punktom 1,2,3.... czyli przecięciom tej linii z narysowanymi trajektorjami. Prędkości wody C_r w punktach 1,2,3... znamy, ponieważ obliczyliśmy je dla wszystkich trajektorji przy podziale wirnika na strugi. Możemy przeto na wyprostowanej linii prądu, jako na osi odciętych, zbudować wykres /wykres I/, odmierzając w skali na rzędnych wykreślonych w punktach /1/, /2/, /3/... odpowiednie wartości C_r . Z wykresu tego możemy odczytać wielkość składowej C_r dla każdego punktu krawędzi. Wystarczy wykreślić trajektorję od punktu danego tylko do przecięcia z linią, którą wyprostowaliśmy, i określić położenie punktu ich przecięcia na wykresie /np. punkty x i y /.



Wskazane jest umieszczać wszystkie wykresy prędkości, dotyczące krawędzi łopatk w pobliżu rysunku wirnika w ten sposób, aby proste rzutowanie punktów krawędzi pozwalało na bezpośrednie odczytanie szukanych wartości /np. punkty x i y . Z pomocą opisanego wyżej wykresu prędkości budujemy więc dwa nowe wykresy C_{r1} i $C_{r2} = C_2$, przenosząc wartości C_r z wykresu I-go do wykresów II-go i III-go.

Składowe C_{r1} i C_{r2} możemy wyznaczyć w inny jeszcze sposób: wykreślamy koła o środkach leżących na krawędzi łopatek styczne do dwóch sąsiednich linii prądu, uważając średnice tych kół d za szerokości strug w pobliżu krawędzi, obliczamy średnie wartości C_r ze wzoru:

$$C_r = \frac{Q}{m \cdot f} = \frac{Q}{m \cdot 2\pi r_0 d}$$

Prędkości te w odniesieniu do punktów a_1, b_1, c_1 oraz a_2, b_2, c_2, \dots pozwolą nam zbudować odrębne wykresy II i III. - Metoda ta jest wogóle mniej dokładna od poprzedniej i daje dobre wyniki tylko przy zupełnie ścisłym podziale wirnika na strugi elementarne.

Dotychczas była mowa o prędkościach wody, obliczonych dla przekrojów wirnika z pominięciem grubości łopatek, uszczuplających przestrzeń swobodną. Rzeczywiste prędkości w obrębie łopatek będą nieco większe. Uwzględniając przeto obecność tych ostatnich poprawimy teraz, obliczone poprzednio, wartości składowej C_r .

Przekroje ortogonalne, przechodzące przez punkty krawędzi A_2 i B_1 , oraz pośrednie względem nich, leżą całkowicie lub niemal całkowicie w obrębie łopatek. Zmniejszenie ich dzięki grubości tych ostatnich jest zatem największe. Pozostałe przekroje, opuszczając łopatki w kierunku wlotu, bądź też wylotu wirnika, będą stopniowo wzrastały aż do położenia krańcowych t.j. do chwili, gdy przekrój przy wejściu przejdzie przez punkt A_1 , zaś przy wyjściu zajmie położenie styczne do łopatki. Dla obu tych przekrojów, jako zupełnie swobodnych [czyli w punktach /1/ i /2/ wykresu I-go], poprawka prędkości stanie się równą zeru.

Wielkość poprawki ΔC_r zależy od grubości łopatek, które nadto przy wykonaniu w odlewie grubsze są w środku, aniżeli w pobliżu krawędzi, oraz od kąta β , mającego wartości nie tylko różne dla poszczególnych ortogonalii, lecz również zmienne na

całej długości tych ostatnich. Dlatego też zazwyczaj zakładamy zgóry wartość $\Delta C_r / 0,10 - 0,15 C_r /$ pomiędzy punktami 2 i 3 /na wykresie I-ym $\sim /2/$ i $/3/$ /, przyjmując, że poprawka ta maleje do zera w punktach 1 i 2 [na wykresie $/1/$ i $/2/$] w sposób linjowy.

Z pomocą poprawionego wykresu I-go możemy sprawdzić, czy wirnik posiada profil właściwy t.j. czy nie zachodzi w nim dławienie wody. - Niektórzy konstruktorzy używają wykresu tego również do konstrukcji wykresów II i III, które w ten sposób miałyby od razu postać ostateczną.

Lepiej jest jednak budować wykresy II i III przy pomocy wykresu I-go, pomijając narazie zmianę prędkości, wywołaną obecnością łopatek, a następnie poprawić je, korzystając z przybliżonych wartości kątów β_1 i β_2 . Kąty te /patrz rys. 7/ możemy wyznaczyć we wszystkich punktach krawędzi z pomocą wektorów V i C_{p_4} /wykresy IV i V/ oraz przybliżonych wartości C_{r_2} i $C_{r_2} = C_2$ /wykresy II i III/. Przypuśćmy na przykład, że prosta $\bar{b}-\bar{b}$ /rys. 15/ jest wyprostowanym okręgiem, na którym leżą punkty krawędzi \bar{b}_2 . Określamy kąt β_2 przy pomocy trójkąta wektorów

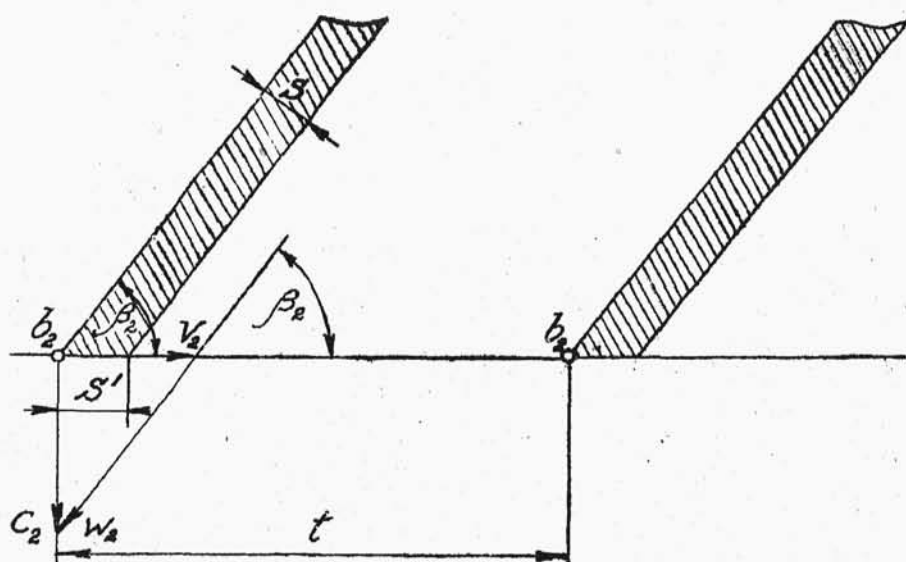
V_2, C_2, W_2 i rysujemy łopatkę w przekroju. Jeżeli grubość jej równa jest S , zaś t jest odległość

cia dwu sąsiednich łopatek, mierzoną na obwodzie koła punktów b_2 , to szerokość swobodnej przestrzeni między łopatkami zmniejszy się o $\frac{s}{\sin \beta_2} = S'$

i wyniesie $(t - S')$. Stosunkowe zmniejszenie całego swobodnego obwodu wirnika będzie zatem równe $\left(\frac{t - S'}{t}\right)$, prędkość C_r zaś wzrośnie w stosunku odwrotnym t.j. $\left/\frac{t}{t - S'}\right/$. Jeżeli więc w wirniku

bez łopatek składowa promieniowa prędkości wody w punkcie b_2 wynosi (C_{r2}) , to w rzeczywistości będzie ona równa:

$$C_{r2} = (C_{r2}) \cdot \frac{t}{t - S'}$$



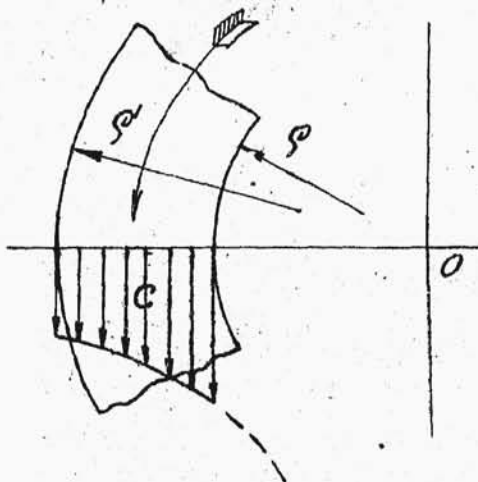
rys. 15.

Wyliczając w ten sposób rzeczywiste wartości C_r dla szeregu punktów obu krawędzi łopatki np. dla punktów a_1, b_1, c_1, d_1 oraz a_2, b_2, c_2, d_2 lub też punktów przecięcia krawędzi z liniami prądu, możemy poprawić wykresy prędkości II i III.

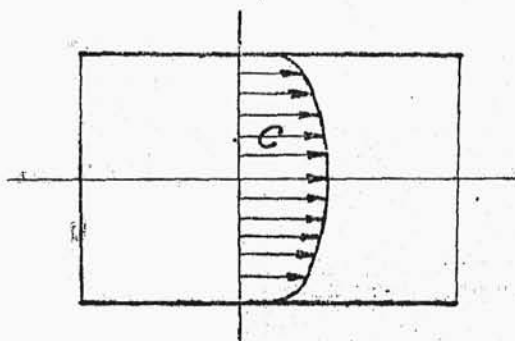
Rzeczywisty przepływ wody przez wirniki, które w przeważnej części stanowią przewody zakrzywione, ma charakter bardziej skomplikowany. Założenie jednakowej prędkości w całym przekroju ortogonalnym oraz podziału wirnika na strugi elementarne o jednakowych polach przekrojów jako wirniki cząstkowe o wydatkach równych, nie odpowiada rzeczywistości i jest od niej tem bardziej odległe, im większe są różnice promieni krzywizny torów cząstek wody.

Istniejące w tej dziedzinie teorie są wysoce niedoskonałe. Tak np. teoria oparta na działaniu siły odśrodkowej prowadzi wprost do absurdu, gdyż graficzną interpretacją rozkładu prędkości w dowolnym przekroju przewodu zakrzywionego jest według tej teorii krzywa asymptotycznie dążąca do nieskończenie wielkich wartości wraz ze wzrostem krzywizny toru /rys.16/. W wirnikach szybkobieżnych, gdzie różnica promieni krzywizny ρ i ρ' /rys.12/ jest zawsze znaczna, odpowiednie różnice prędkości

w krańcowych punktach przekroju wypadłyby nie-
współmiernie wielkie. Istnieniu zaś tak wielkich



rys.16.



rys.17.

prędkości prze-
czy doświadcze-
nie.

Z drugiej
strony badania
przepływu cie-
czy rzeczywis-
tych przez prze-
wody proste do-
wiodły, że pręd-
kości cieczy

w dowolnym prze-
kroju nie są
jednakowe, lecz
maleją ku ścia-
nom tego prze-
wodu /rys.17/.

Podobne zjawisko
musi zachodzić

również i w

przewodach zakrzywionych, brak jednak dla nich
mniej lub więcej ścisłych teorii nie pozwala na
stosowanie jakiejkolwiek metody rachunkowej.

Ponieważ jednakże zarówno opory istniejące przy przepływie przez wirnik, a związane z burzliwym charakterem tego przepływu, jak również i działanie siły odśrodkowej nie pozostają bez wpływu na charakter ruchu wody, który dzięki temu nieraz znacznie odbiega od poczynionych przez nas założeń, przeto wykresy nasze muszą ulec pewnej modyfikacji, lecz nie tak daleko posuniętej, jak tego wymaga wspomniana wyżej teoria.

Dzięki działaniu siły odśrodkowej prędkości cząstek wody, płynących wzdłuż granicznej powierzchni strugi wewnętrznej będą mniejsze, aniżeli wyliczone poprzednio, zaś prędkości w pobliżu zewnętrznego pierścienia wirnika - większe. Wykresy zatem poprawiamy w sposób szkicowy, pamiętając, iż różnice prędkości są tem większe, im bardziej różnią się promienie krzywizny granicznych powierzchni strug. Poprawka ta przeto jest szczególnie ważną w wirnikach szybkoobrotowych.

Na rysunku 14-ym linie przerywane stanowią wykresy prędkości, zbudowane według naszych pierwotnych założeń, zaś linie ciągłe - wykresy zmodyfikowane. Rękojmią dobrej korekty jest tu oczywiście tylko doświadczenie konstruktora.

Wróćmy do rys. 7 w rozdz. 3-im. Z pośród wektorów

określających kąty α i β znamy już składowe promieniowe C_r , prędkości bezwzględnej oraz prędkości obwodowe V , które dla każdego punktu krawędzi łopatkki z łatwością możemy obliczyć. Aby jednak uniknąć rachunku, budujemy wykres tej prędkości w funkcji promienia /wykres C. rys.14/. Będzie to oczywiście prosta przecinająca oś odciętych na osi turbiny, bowiem zależność

$$V = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r$$

jest funkcją liniową.

Dzięki założeniu wyjścia normalnego możemy już wyznaczyć zapomocą równoległoboku prędkości kąt β_2 , dla każdego punktu krawędzi wyjściowej.

Inaczej rzecz się ma z krawędzią wejściową. Kąt łopatkki β_1 zależy tu od wielkości i kierunku prędkości bezwzględnej C_1 , której składową promieniową C_{r1} już znamy, zaś składową obwodową C_{p1} możemy obliczyć z zależności:

$$V_1 \cdot C_{p1} = \epsilon g H$$

W wirnikach wolno- i szybkoobrotowych prędkość obwodowa V_1 , a więc i składowa C_{p1} są jednakowe we wszystkich punktach krawędzi. Ponieważ także i składowa promieniowa C_{r1} przy wejściu wody do wirnika jest stała w całym przekroju, więc kąt α_1 ,

którego

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{C_{r1}}{C_{p1}}$$

wzdłuż całej krawędzi zachowuje wartość niezmienną.

W turbinach szybkoobrotowych, dzięki zmiennej średnicy wirnika przy wejściu, wektory V_1 , C_{r1} i C_{p1} , a więc i kąty łopatek mają wzdłuż krawędzi wartości również zmienne.

Podobnie, jak C_r lub V , możemy wartości C_{p1} ująć w wykres /wykres D, rys.14/ w układzie współrzędnych wspólnych z układem wykresu $V=f(r)$

Dla przestrzeni między kołem zasilającym, a krawędziami wejściowymi łopatek istnieje zależność

$$C_p \cdot r = \text{const.}$$

Krzywa więc $C_p=f(r)$ jest hyperbolą równoboczną. Stałą znajdziemy ze wzoru

$$C_{p1} \cdot V_1 = \varepsilon g H$$

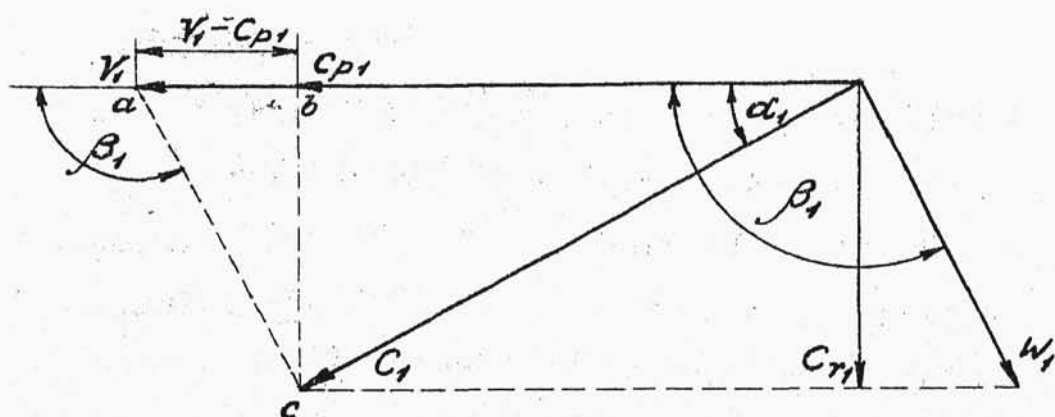
lub

$$C_{p1} \cdot \frac{\pi n}{30} \cdot r_1 = \varepsilon g H$$

skąd

$$C_{p1} \cdot r_1 = \varepsilon g H \cdot \frac{30}{\pi \cdot n} = \text{const.}$$

Kąt β_1 wyznaczymy z trójkąta αbc /rys.18/, przyczem wartość V_1 - C_{p1} możemy odczytać bezpośred-



rys.18.

nio z wykresów C i D jako różnicę rzędnych.

Wszystkie wykresy prędkości należy robić w jednakowej skali, aby z odmierzonych na nich długości wektorów można było korzystać bezpośrednio. -

6. KONSTRUKCJA ŁOPATEK.

Łopatki wirnika projektujemy w dwu rzutach, z których pierwszy /profil/ jest rzutem cylindrycznym na płaszczyznę przekroju osiowego linii leżących na łopacie, drugi zaś zwykłym rzutem prostokątnym na płaszczyznę prostopadłą do osi turbiny. Odległości wszystkich punktów rysunku profilowego od osi wirnika, jak również odległości mierzone wzdłuż osi mają zatem długości naturalne.

Z opisu wirnika turbiny promieniowej doszliśmy