

Rys. 12.1. Wirnik z krawędzią wlotową przesuniętą w kierunku wlotu: a) schemat wirnika, b) trójkąty prędkości w oznaczonych punktach krawędzi wlotowej

W omawianym przypadku przestrzennej krzywizny łopatek również powierzchnie prądu są powierzchniami przestrzennymi obrotowymi, zaś linie prądu, jako ślady przenikania łopatek z tymi powierzchniami są również krzywymi przestrzennymi.

Przy założeniu osiowo-symetrycznego przepływu cieczy doskonałej przyjmujemy, że wirnik zostanie przecięty dowolną płaszczyzną południkową. Obrazem przecięcia będzie profil wirnika (rys. 12.1) oraz linie prądu  $A_1A_2$ ,  $B_1B_2$  itd., będące w istocie śladami przecięcia płaszczyzny południkowej z powierzchniami prądu. Jednocześnie linie te są rzutami cylindrycznymi linii prądu. Rzutując następnie przepływ trójwymiarowy na płaszczyznę osiową, tj. prostopadłą do osi wirnika, otrzymamy w rzucie przepływ okrężny.

Tak więc przepływ przestrzeny został rozłożony na dwa przepływy: południkowy, będący przepływem płaskim dwuwymiarowym o prędkości przepływu  $c_m$  i okrężny również płaski dwuwymiarowy o prędkości  $c_u$ .

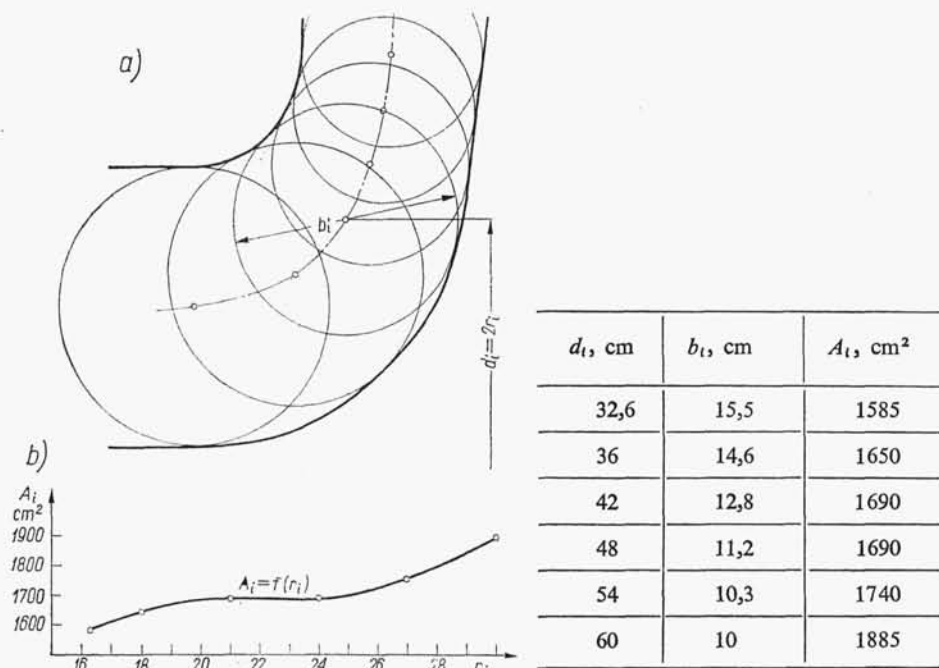
## 12.2. Kształtowanie wirnika

### 12.2.1. Obliczenia wstępne

Dla danych parametrów  $Q$  i  $H$  pompy przeprowadzamy obliczenia wstępne głównych parametrów pompy, jak w przypadku pompy odśrodkowej (rozdz. 11):

— wyróżnika szybkoobrotowości  $n_{sQ}$  przy przyjęciu prędkości obrotowej  $n$ ,

- mocy pobieranej przez pompę  $P_w$  przy założeniu całkowitej sprawności  $\eta$ ,
- minimalnej średnicy wału  $d_w$ , a następnie piasty  $d_p$ ,
- prędkości południkowych  $c_{m1}$  i  $c_{m2}$ ,
- średnicy wlotu na wirnik  $d_0$ ,
- średniej prędkości obwodowej na wylocie  $u_{2sr}$  przyjmując średni kąt łopatki na wylocie  $\beta_2 \approx 25^\circ$  (nieco mniejszy niż w przypadku pomp odśrodkowych), zaś współczynnik zmniejszenia poboru mocy  $p \approx 0,4 \div 0,5$ , a więc nieco większy niż dla pomp odśrodkowych,
- średniej średnicy wylotowej  $d_{2sr}$ ,
- szerokości  $b_2$  wirnika na wylocie.



Rys. 12.2. Kształtowanie profilu wirnika: a) profil wirnika w rzucie południkowym, b) wykres zmienności przekroju w funkcji promienia  $A_i = f(r_i)$

Na podstawie obliczonych głównych parametrów oraz doświadczenia konstrukcyjnego rysujemy profil wirnika w rzucie południkowym. Poprawność przyjętego profilu sprawdzamy obliczając w kilku miejscach przekroje kanału przepływowego, od wlotu do wylotu. Sporządzamy pomocniczy wykres zmienności przekrojów  $A$  w funkcji długości kanału wzdłuż jego linii środkowej lub w funkcji odległości  $r_i$  środka przekroju od osi wirnika. Wykres powinien przedstawiać linię wznoszącą się, płynną, zbliżoną do prostej, świadczącą o płynnej zmianie przekroju wirnika w rzucie południkowym.

Sprawdzenie przyjętego profilu wirnika i pomocniczy wykres  $A = f(r)$  pokazano na rys. 12.2a, b, przy czym poszczególne przekroje określa się wg zależności

$$A_i = 2\pi r_i b_i \quad (12.1)$$

### 12.2.2. Podział pola prądu na elementarne strugi

W dalszym ciągu naszych rozważań rozpatrzmy przepływ południkowy z prędkością  $c_m$ , pamiętając jednak, iż istnieje druga składowa  $c_u$  prostopadła do płaszczyzny południkowej.

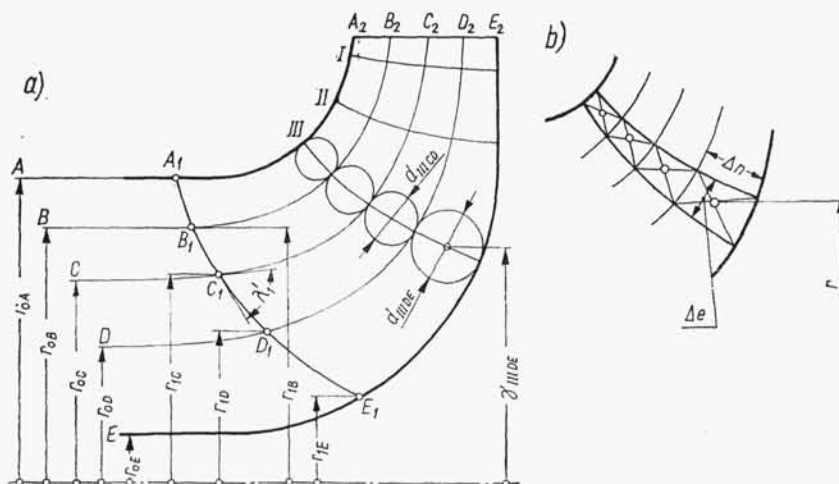
Ze względu na zmienność kąta wlotowego  $\beta_1$ , a często również i kąta wylotowego  $\beta_2$ , dla poszczególnych punktów odnośnych krawędzi dzielimy pole prądu w rzucie południkowym na kilka elementarnych strug odpowiadających jakby cząstkowym wirnikom, oddzielonym poszczególnymi powierzchniami prądu, które w rzucie (przekroju) południkowym są liniami prądu, jak to przedstawiono na rys. 12.3.

Pole prądu dzielimy na elementarne strugi przy założeniu:

— jednakowej wydajności każdej strugi

$$\Delta Q = 2\pi r \Delta n c_m = \text{const} \quad (12.2)$$

— stałej średniej prędkości południkowej wzdłuż jednej trajektorii.



Rys. 12.3. Podział pola prądu na elementarne strugi przy założeniu prędkości  $c_m$  wzdłuż trajektorii: a) stałej, b) zmiennej

Należy tu nadmienić, iż z założenia przepływu osiowo-symetrycznego wynika zmienna prędkość  $c_m$  wzdłuż trajektorii. Przy projektowaniu wirników turbin wodnych o dość dużej szerokości wirnika podział na strugi następuje z uwzględnieniem zmienności  $c_m$ . W pompach szerokości wirników są stosunkowo małe i przyjęcie stałej średniej prędkości wzdłuż trajektorii daje zadowalające dokładności w dalszych obliczeniach.

Na przekroju południkowym wirnika wykreślamy wstępnie szereg linii prądu  $B_1 B_2$ ,  $C_1 C_2$  itd., jak to przedstawiono na rys. 12.3. Następnie kreślimy szereg trajektorii  $I$ ,  $II$  itd., które powinny być prostopadłe do przecinających je linii prądu.

Dla danej trajektorii, np.  $III$ , napiszmy warunek równości wydajności cząstkowych poszczególnych strug, których szerokości określimy wykreślnie wpisując koła styczne do sąsiednich linii prądu o środkach na trajektorii. Promienie środków

kół wpisanych określimy przez zmierzenie ich na rysunku. Z warunku równości cząstkowych wydajności otrzymamy

$$Q = 2\pi r_{IIIAB} d_{IIIAB} c_m = 2\pi r_{IIIBC} d_{IIIBC} c_m = \dots = \text{const} \quad (12.3a)$$

a po skróceniu

$$r_{IIIAB} d_{IIIAB} = r_{IIIBC} d_{IIIBC} = \dots r_{IIIDE} d_{IIIDE} = \text{const} \quad (12.3b)$$

lub ogólnie wzdłuż danej trajektorii

$$r'd' = \text{const} \quad (12.3c)$$

Jest to warunek poprawnego podziału na elementarne strugi. Musi on być spełniony wzdłuż każdej trajektorii. W przypadku przepływu osiowego (w części cylindrycznej wlotowej wirnika) podział na strugi może być obliczony matematycznie, gdyż promień środkowej linii prądu jest średnią geometryczną promieni obu sąsiednich linii, np.

$$r_{OB} = \sqrt{\frac{r_{OA}^2 + r_{OC}^2}{2}}$$

Obliczenia iloczynów wg wzoru (12.3c) prowadzimy tabelarycznie. Różnice wartości poszczególnych iloczynów i wartości średniej są dopuszczalne w granicy do  $\pm 5\%$ . Przy większych różnicach należy przeprowadzić korektę podziału pola prądu na elementarne strugi i ponownie sprawdzić obliczenia.

Przy uwzględnieniu zmienności  $c_m$  wzdłuż trajektorii i wykorzystaniu teorii ruchu potencjalnego zakładamy stały przyrost potencjału prędkości  $\Delta\phi$  między sąsiednimi trajektoriami wzdłuż linii prądu, czyli

$$\Delta\phi = c_m \Delta e = \text{const} \quad (12.4)$$

Z połączenia z równaniem (12.2) wynika zależność

$$\frac{r \Delta n}{\Delta e} = \text{const} \quad (12.5)$$

stanowiącą teoretyczną podstawę wykreślnej metody podziału na elementarne strugi (rys. 12.3b).

### 12.2.3. Położenie krawędzi łopatk

Położenie krawędzi wlotowej i wylotowej łopatk nie wynika jednoznacznie z obliczeń, istnieje pewna dowolność w ich wyznaczaniu. Należy jednak mieć na uwadze warunki, jakie powinny one stwarzać.

Krawędź wlotowa powinna tworzyć ze ścianami wirnika kąt zbliżony do prostego, co zapewnia dobre prowadzenie strug przyściennych. Ponadto krawędź wlotowa powinna zapewnić dostateczną długość przyściennej linii prądu (zewnątrznej)  $A_1 A_2$  w porównaniu z linią prądu przy wewnętrznej ścianie wirnika  $E_1 E_2$  (rys. 12.3).

Kąty nachylenia  $\beta'_1$  dla skrajnych linii prądu powinny zawierać się w granicach  $\beta'_1 \geq 15^\circ$  — dla linii zewnętrznej i  $\beta_1 < 40^\circ$  — dla wewnętrznej linii prądu.

Krawędź wylotowa przechodzi przez środek koła określającego szerokość  $b_2$  wirnika na wylocie na obliczonej uprzednio średniej średnicy wylotowej  $d_2$ . Krawędź

może przybierać przy tym różne położenia. Przy  $n_{sQ} \leq 60$  krawędź jest najczęściej równoległa, zaś przy większych wartościach  $n_{sQ} \geq 60$  krawędź przybiera położenie ukośne względem osi obrotu wirnika. Kąt nachylenia krawędzi wylotowej wzrasta wraz ze wzrostem szybkoobrotowości. Wzajemne położenie obu krawędzi określa długości poszczególnych linii prądu i wpływa na wartość ich momentów statycznych, a więc na wartość kąta wylotowego  $\beta_2$ . Z tych względów może wystąpić niekiedy potrzeba kilkakrotnego korygowania położenia krawędzi.

#### 12.2.4. Wlot do wirnika

Obliczenie kąta nachylenia łopatki  $\beta'_1$  na wlocie przeprowadzamy dla początkowych punktów linii prądu  $A_1$ ,  $B_1$  itd. (rys. 12.3). Dla punktów tych należy, po ustaleniu przebiegu krawędzi, wyznaczyć z rysunku średnice  $d_{1A}$ ,  $d_{1B}$  itd., a następnie obliczyć prędkości unoszenia

$$u_{1A} = \frac{\pi d_{1A} n}{60}; \quad u_{1B} = \frac{\pi d_{1B} n}{60} \text{ itd.} \quad (12.6)$$

oraz kąty nachylenia z zależności

$$\operatorname{tg} \beta_{1A} = \frac{c_{m1}}{u_{1A}}; \quad \operatorname{tg} \beta_{2A} = \frac{c_{m1}}{u_{1B}} \text{ itd.} \quad (12.7)$$

Za  $c_{m1}$  przyjmujemy wartość obliczoną ze wzoru  $c_{m1} = K_{cm1} \sqrt{2gH}$ , jeżeli wymiary wlotu zostały obliczone wg tej wartości. Przeważnie jednak przy kształtowaniu profilu kanału wirnika zmieniamy niejednokrotnie jego szerokość i rzeczywistą prędkość  $c_{m1}$  należy obliczyć na podstawie rzeczywistych wymiarów wlotu z równania ciągłości przepływu

$$c_{m1} = \frac{\varphi_1 Q'}{\pi d_{1sr} b_1} \quad (12.8)$$

gdzie:  $Q' = Q/\eta_v$ ,  $b_1$  — szerokość wirnika na wlocie równa średnicy koła wpisanego, którego środek leży na krawędzi wlotowej i określa średnicę  $d_{1sr}$ ,  $\varphi_1$  — współczynnik przesłonięcia przekroju na wlocie.

Współczynnik ten obliczamy z zależności  $\varphi_1 = \frac{t_1}{t - s_{u1}}$ , zaś

$$s_{u1} = \frac{s'_1}{\sin \beta'_1} \quad (12.9)$$

przy czym grubość łopatki w przecięciu z powierzchnią prądu  $s'_1 = \frac{s_1}{\sin \lambda_1}$ , więc

$$s_{u1} = \frac{s_1}{\sin \beta'_1 \sin \lambda_1} \quad (12.10)$$

gdzie  $\lambda_1$  — kąt zawarty między powierzchnią łopatki a powierzchnią prądu na krawędzi wlotowej.

Ze względu na trudności w określeniu kąta  $\lambda_1$  można go obliczyć pośrednio z zależności matematycznej

$$\operatorname{ctg} \lambda_1 = \operatorname{ctg} \lambda'_1 \cos \beta'_1 \quad (12.11)$$

gdzie  $\lambda'_1$  — kąt zawarty między krawędzią wlotową a linią prądu na wlocie wirnika (rys. 12.3).

Podane zależności są słuszne przy założeniu, że krawędź wlotowa leży w płaszczyźnie południkowej.

Wprowadzając do zależności

$$\frac{1}{\varphi_1} = \frac{t_1 - s_{u1}}{t_1} = 1 - \frac{s_1}{t_1} \cdot \frac{1}{\sin \beta'_1 \sin \lambda_1} \quad (12.12)$$

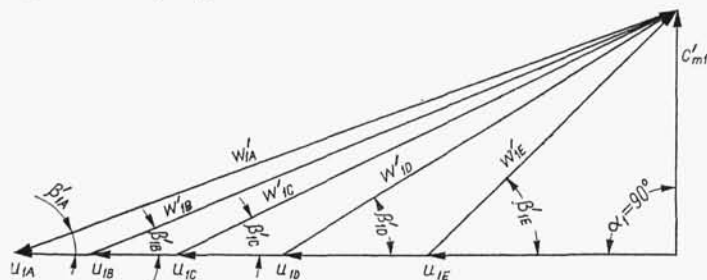
wzór trygonometryczny

$$\sin \lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \lambda'_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \lambda'_1 \cos^2 \beta'_1}} \quad (12.13)$$

otrzymamy po przekształceniu

$$\frac{1}{\varphi_1} = 1 - \frac{s_1}{t_1} \sqrt{1 + \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta'_1}{\sin \lambda'_1} \right)^2} \quad (12.14)$$

Znając dokładną wartość prędkości południkowej  $c_{m1}$  obliczymy kąty nachylenia  $\beta_1$  wg wzorów (12.7).



Rys. 12.4. Trójkąty prędkości na wlocie do wirnika

Zwykle kąt natarcia  $\delta_1 = 2 \div 6^\circ$  dodajemy do kąta nachylenia środkowej strugi i otrzymujemy kąt konstrukcyjny. W przypadku jak na rys. 12.3

$$\beta'_{1C} = \beta_{1C} + \delta_1$$

Dla pozostałych linii prądu (przy założeniu  $c_{m1} = \text{const}$  wzdłuż całej krawędzi wlotowej) kąty konstrukcyjne nachylenia  $\beta'_1$  wyznaczymy z trójkątów prędkości (rys. 12.4) lub obliczymy z zależności

$$\operatorname{tg} \beta'_{1A} = \frac{u_{1C}}{u_{1A}} \operatorname{tg} \beta'_{1C} = \frac{d_{1C}}{d_{1A}} \operatorname{tg} \beta'_{1C} \quad (12.15)$$

$$\operatorname{tg} \beta'_{1B} = \frac{d_{1C}}{d_{1B}} \operatorname{tg} \beta'_{1C}$$

i analogicznie dla pozostałych linii prądu.

### 12.2.5. Wylot z wirnika

Po zaprojektowaniu profilu wirnika możemy dokładnie określić rzeczywistą szerokość  $b_2$  na wylocie, jako średnicę koła wpisanego między ścianą zewnętrzną a wewnętrzną (lub przedłużenie przyściennych linii prądu), o środku leżącym na krawędzi

wylotowej na średnicy  $d_{2sr}$ , obliczonej na wstępie. Krawędź wylotowa może przybierać różne kierunki, zgodnie z wytycznymi zawartymi w p. 12.2.3, każdorazowo przechodząc przez punkt środkowy wylotu o średnicy  $d_{2sr}$ .

W przypadku krawędzi wylotowej równoległej do osi wirnika ( $n_{sQ} \leq 60$ ) dążymy do uzyskania jednakowego kąta  $\beta_2$  wzdłuż całej krawędzi. Wymaga to jednak stałej wartości współczynnika  $p$ , a przez to stałego momentu statycznego wszystkich linii prądu, co nie zawsze jest możliwe ze względów konstrukcyjnych (punkt początkowy  $A_1$  zewnętrznej linii prądu musiałby być przesunięty zbyt daleko w kierunku wlotu).

W przypadku krawędzi wylotowej ukośnej ( $n_{sQ} \geq 60$ ) (jak na rysunku 12.9) kąt  $\beta_2$  jest różny dla poszczególnych linii prądu. Powinien on zawierać się w granicach  $20 \div 40^\circ$ , zwiększając się w kierunku tylnej tarczy wirnika.

Dążenie do zachowania niezmienniej wartości współczynnika  $p$  nie znajduje tu uzasadnienia. Z tych przyczyn nie ma sensu dążenie do uzyskania stałej wartości momentu statycznego  $M_{st}$  dla poszczególnych linii prądu. Należy jednak dążyć do otrzymania dostatecznej długości linii prądu w rzucie południkowym, gdyż zapewnią to uzyskanie dostatecznie długich kanałów międzyłopatkowych.

Rzeczywistą średnią prędkość południkową  $c_{m2}$ , stałą na całej krawędzi, obliczymy dla średniej średnicy wylotowej (rys. 12.3)  $d_{2sr}$  z równania ciągłości przepływu

$$c_{m2} = \frac{\varphi_2 Q'}{\pi d_{2sr} b_2} \quad (12.16)$$

gdzie  $\varphi_2$  — współczynnik przesłonięcia wylotu; przyjęto wstępnie  $\varphi_2 = 1,05$ — $1,10$ , a później przeprowadza się obliczenia korekcyjne.

Kąty nachylenia łopatki na wylocie obliczamy dla każdej linii prądu, w punktach krawędzi  $A_2, B_2, \dots, E_2$  z zależności

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{c_{m2}}{u_2 - c_{u2}} \quad (12.17)$$

przy czym składową obwodową  $c_{u2}$  obliczymy z podstawowego równania pomp, w postaci uproszczonej przy przyjęciu  $\alpha_1 = 90^\circ$

$$c_{u2} = \frac{gH_{th\infty}}{u_2} = \frac{gH(1+p)}{\eta_h u_2} \quad (12.18)$$

Sprawność hydrauliczną przyjmujemy wg wytycznych omówionych w rozdz. 4. Współczynnik zmniejszenia poboru mocy jest określony za pomocą wzoru

$$p = \frac{\chi r_2^2}{ZM_{st}} \quad (12.19)$$

Momenty statyczne  $M_{st}$  określimy metodą wykreślno-obliczeniową omówioną w rozdz. 11. Współczynnik  $\chi$ , określony wg kryteriów podanych w p. 11, przyjmujemy stały dla wszystkich linii prądu. We wzorze (12.18) wysokość podnoszenia  $H$  jest niezmienna dla wszystkich linii prądu, w przeciwnym przypadku otrzymalibyśmy na wylocie z wirnika dodatkowe poprzeczne przepływy zmniejszające jego sprawność.

Obliczenia kątów  $\beta_2$  dla każdej linii prądu przeprowadzamy tabelarycznie i wykreślamy trójkąty prędkości.

Przy uwzględnieniu zmienności prędkości południkowej  $c_{m2}$  wzdłuż krawędzi wylotowej wyznaczamy jej wartości ze wzoru opartego na teorii ruchu potencjalnego

$$\ln \frac{c_m}{(c_{m2})_E} = \frac{y}{\mu \varrho_E} \left[ \frac{y}{2b_2} \left( \frac{\varrho_E}{\varrho_A} - 1 \right) + 1 \right] \quad (12.20)$$

gdzie:  $c_m$  — prędkość południkowa w dowolnym punkcie krawędzi wylotowej,  $y$  — odległość tego punktu od punktu  $E$ ,  $(c_{m2})_E$  — prędkość południkowa w punkcie  $E$ ,  $b$  — długość rozwiniętej krawędzi wylotowej,  $\varrho_A$  — promień krzywizny przedniej tarczy,  $\varrho_E$  — promień krzywizny tylnej tarczy w przekroju południkowym,  $\mu = 2 \div 4$  — współczynnik poprawkowy uwzględniający przepływ rzeczywisty.

## 12.3. Kształtowanie powierzchni łopatek

### 12.3.1. Uwagi ogólne. Metody kształtowania powierzchni łopatek

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono wymiary wlotu do i wylotu z wirnika wraz z kątami nachylenia łopatek. Należy następnie ukształtować powierzchnię łopatek od wlotu do wylotu tak, aby utworzone przez nie kanały międzyłopatkowe zapewniły najbardziej sprawny przepływ względny.

Wyznaczenie powierzchni łopatki jest możliwe graficznie przez wyznaczenie przebiegu poszczególnych linii (śladów) przecięć łopatki powierzchniami prądu (linia ABFCG, rys. 9.2). Są to krzywe przestrzenne. Rysunkowe wyznaczenie ich kształtu jest możliwe za pomocą rzutów: południkowego i osiowego.

Stosowane są trzy metody profilowania łopatek: *metoda punktowego wyznaczania przebiegu linii prądu*, *metoda odwzorowania konforemnego na płaszczyznę* i *metoda odwzorowania konforemnego na powierzchnię stożkową*. Spośród wymienionych metod najbardziej popularna i najmniej pracochłonna jest metoda odwzorowania konforemnego na płaszczyznę.

### 12.3.2. Metoda punktowego wyznaczania przebiegu linii przecięć wg C. Pfleiderera

Metoda ta została szczegółowo omówiona w odniesieniu do pomp odśrodkowych. W zastosowaniu do wirników o przepływie ukośnym przestrzennym występują pewne różnice i trudności w jej zastosowaniu.

Rozpatrzmy elementarny trójkąt  $MNP$  utworzony przy przyroście kąta  $d\vartheta$ , czemu odpowiada przyrost  $de = MN$  w rzucie południkowym (rys. 12.5a). Zróbmy kład tego trójkąta. Otrzymamy jego wartość rzeczywistą  $M_0N_0P_0$ ; przy czym kąt między bokami  $M_0P_0$  i  $P_0N_0$  jest kątem  $\beta$  nachylenia linii prądu. Możemy napisać zależność

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\overline{M_0N_0}}{\overline{P_0N_0}} = \frac{de}{R d\vartheta_0} \quad (12.21)$$

Ponieważ

$$R d\vartheta_0 \approx r d\vartheta \quad (12.22)$$

gdzie  $R = \overline{ON_0}$