

Rozpatrując działanie elementarnej siły odśrodkowej dF na elementarną cząstkę cieczy (rys. 2.4) otrzymamy — analogicznie jak w ruchu okrężnym swobodnym — wyrażenie na przyrost ciśnienia

$$dp = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{u^2}{r} dr = \frac{\gamma}{g} \omega^2 r dr \quad (2.37)$$

Na drodze od r_1 do r_2 całkowity przyrost ciśnienia wyniesie

$$p_2 - p_1 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{u^2}{r} dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma}{g} \omega^2 r dr = \frac{\gamma}{2g} \omega^2 (r_2^2 - r_1^2) = \frac{\gamma}{2g} (u_2^2 - u_1^2) \quad (2.38)$$

zaś dla dowolnego promienia r otrzymamy

$$p - p_1 = \frac{\gamma}{g} \omega^2 (r^2 - r_1^2) = \frac{\gamma}{2g} (u^2 - u_1^2) \quad (2.39)$$

Obrazem przyrostu ciśnienia jest parabola (rys. 2.4). W przypadku otwartego naczynia nastąpiłby odpowiedni przyrost wysokości położenia cząstek cieczy i jej powierzchnia przyjąłaby kształt paraboloidy obrotowej o zarysie $z = \varphi(r)$ podobnym do krzywej przyrostu ciśnienia przedstawionej na rys. 2.4.

Ruch okrężny wymuszony występuje w obrębie wirnika pomp wirowych.

2.4. Zjawiska opływu cieczy

Z pojęciem *opływu cieczy* spotkamy się przy omawianiu *aerodynamicznej metody projektowania łopatek pomp śmigłowych*, polegającej na traktowaniu łopatki jako płata nośnego o danym profilu aerodynamicznym, wokół którego występuje zjawisko *krążenia cieczy (cyrkulacji)*. Dlatego w niniejszym punkcie ograniczymy się do przedstawienia zjawisk występujących przy opływie płata nośnego.

2.4.1. Krążenie prędkości (cyrkulacja)

Krążeniem lub *cyrkulacją prędkości cząsteczki cieczy* nazywamy całkę liniową wektora prędkości v wzdłuż zamkniętego konturu S (rys. 2.5)

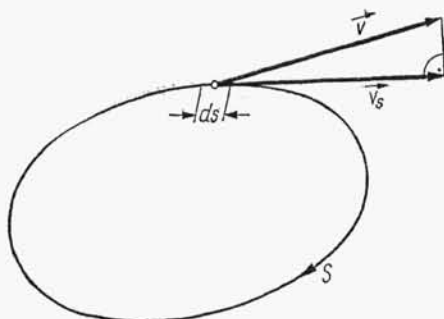
$$\Gamma = \oint_S \vec{v} ds = \oint_S v_s ds \quad (2.40)$$

W szczególnym przypadku poruszania się cząsteczki cieczy po okręgu koła o promieniu r ze stałą prędkością kątową ω krążenie wyniesie

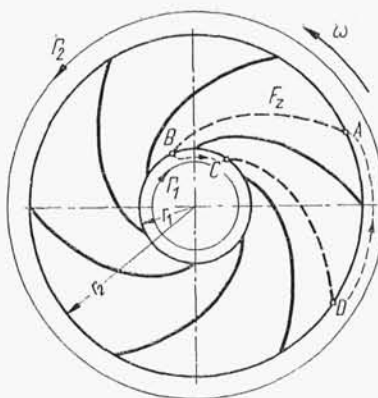
$$\Gamma = \oint_S r \omega r d\vartheta = 2\pi r c = 2\pi r^2 \omega = 2A\omega \quad (2.41)$$

gdzie: A — pole koła o promieniu r , c — prędkość liniowa cząsteczki styczna do okręgu koła.

W przypadku wirnika pompy wirowej (rys. 2.6) możemy wyznaczyć za pomocą krążenia moment obrotowy przenoszony na ciecz pompowaną. Niech wirnik o promieniach wewnętrznym r_1 i zewnętrznym r_2 obraca się ze stałą prędkością kątową ω .



Rys. 2.5. Krążenie prędkości cieczy wzdłuż linii zamkniętej



Rys. 2.6. Krążenie prędkości cieczy w wirniku pompy odśrodkowej

Oznaczając składowe obwodowe prędkości bezwzględnych c_1 i c_2 odpowiednio przez c_{u1} i c_{u2} określimy wartości krążenia na obwodach wg równania (2.41) na wlocie do wirnika

$$\Gamma_1 = 2\pi r_1 c_{u1} \quad (2.42)$$

oraz na wylocie z wirnika

$$\Gamma_2 = 2\pi r_2 c_{u2} \quad (2.43)$$

Zatem momenty prędkości obrotowych można wyrazić w zależności od krążenia

$$r_1 c_{u1} = \frac{\Gamma_1}{2\pi} \quad (2.44)$$

oraz

$$r_2 c_{u2} = \frac{\Gamma_2}{2\pi} \quad (2.45)$$

Całkowity moment obrotowy, jakim oddziałują wirnik na ciecz wyniesie

$$M = \frac{\gamma}{g} Q(r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1}) = \frac{Q}{2\pi g} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (2.46)$$

Według praw hydromechaniki krążenie można uważać za sumę cząstkowych krążeń występujących wewnątrz rozpatrywanego (zewnątrznego) konturu. W przypadku wirnika pompy wirowej oznaczmy krążenie występujące wokół pojedynczej łopatki, wzdłuż linii $ABCD$, przez Γ_z (rys. 2.6).

Powinna być zatem spełniona równość

$$\Gamma_2 - \Gamma_1 = Z\Gamma_z \quad (2.47)$$

co widać wyraźnie z rys. 2.6 iż obliczając krążenie dla każdej łopatki na odcinkach AB i CD wartości całkowania są równe, lecz mają odmienne znaki, a więc w sumie znoszą się, natomiast pozostaną do scałkowania odcinki BC i DA . Wprowadzając do wzoru (2.46) zależność (omówioną szczegółowo w cz. III)

$$M = \gamma Q H_{th} \quad (2.48)$$

otrzymamy wyrażenie na *teoretyczną wysokość podnoszenia pompy*

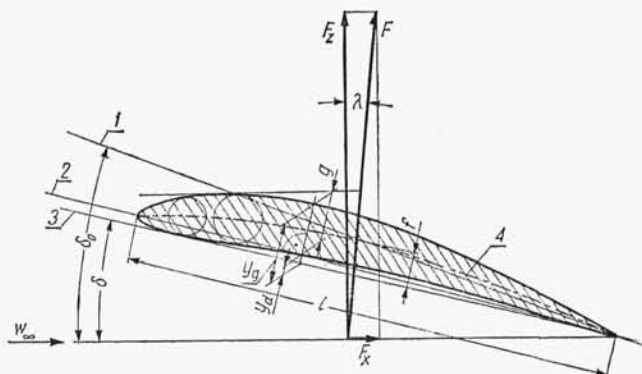
$$H_{th} = \frac{\omega}{2\pi g} (\Gamma_2 - \Gamma_1) = \frac{nZ\Gamma_z}{60g} \quad (2.49)$$

Krażenie znajduje zastosowanie głównie w obliczeniach pomp śmigłowych (rozdz. 13).

2.4.2. Optyw cieczy wzdłuż płata nośnego

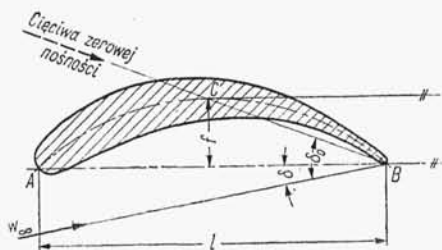
Płat nośny (rys. 2.7) jest to ciało optywowe tak ukształtowane i ustawione w stosunku do kierunku przepływu, iż w wyniku działania cyrkulacji, przy najmniejszym oporze przepływu F_x , wytwarza możliwie dużą siłę nośną F_z . Płat nośny charakteryzują następujące wielkości geometryczne i symbole:

- *profil aerodynamiczny* — kontur przekroju płata płaszczyzną prostopadłą do jego osi skierowanej wzdłuż rozpiętości płata,
- *krawędź przednia* płata zwana *krawędzią natarcia*, *krawędź tylna* — *krawędzią spływu*,



Rys. 2.7. Profil płata nośnego; 1 — cięciwa zerowej siły nośnej, 2 — cięciwa wewnętrzna, 3 — cięciwa zewnętrzna, 4 — szkieletowa profilu

- *szkieletowa lub środkowa linia profilu* — miejsce geometryczne środków kół wpisanych w kontur profilu,
- *cięciwa zewnętrzna profilu* — prosta styczna do spodu profilu,
- *cięciwa wewnętrzna* — prosta przechodząca przez punkt natarcia i spływu profilu,
- *strzałka profilu f* — największa odległość między szkieletową i cięciwą wewnętrzną profilu,
- *grubość profilu g* — odległość między grzbietem a spodem profilu mierzona w kierunku prostopadłym do cięciwy zewnętrznej,
- *rozpiętość płata b* — długość płata w kierunku prostopadłym do powierzchni jego profilu,
- *geometryczny kąt natarcia δ* — kąt między cięciwą (przeważnie zewnętrzną) profilu a kierunkiem przepływu niezakłóconego w_∞ (tzn. dostatecznie daleko od płata),



Rys. 2.8
Cięciwa zerowej nośności profilu













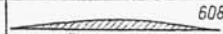






— *cięciwa zerowej nośności* — taki kierunek przepływu niezakłóconego, przy którym siła nośna płata $F_z = 0$ (rys. 2.8),

— *aerodynamiczny kąt natarcia δ_0* — kąt zawarty między cięciwą zerowej nośności a kierunkiem przepływu niezakłóconego,

— *długość profilu l* — długość równa długości cięciwy wewnętrznej,

— *wydłużenie płata λ* — stosunek rozpiętości płata do długości profilu $\lambda = b/l$.

Niektóre placówki naukowe, jak Instytut Aerodynamiczny w Getyndze w RFN, Laboratorium aerodynamiczne NACA w USA, Gidromasz w Moskwie w ZSRR opracowały szereg profili i doświadczalnie zbadały ich właściwości. Kilkanaście profili, mających zastosowanie w projektowaniu łopatek pomp śmigłowych, przedstawiono na rys. 2.9, zaś ich wymiary w tabl. 2.1.

	428		682		364		480	
	408		490		436		387	
	622		623		624		384	
		608			609			610
$y_{max} = 0,045 \quad \frac{c}{f} = 2,8$		$y_{max} = 0,0514 \quad \frac{c}{f} = 2,45$		$y_{max} = 0,0697 \quad \frac{c}{f} = 1,9$				
	593						417	
	443	NACA 23012		Munk 6			587	

Rys. 2.9. Profile płatów nośnych

2.4.3. Dynamika płata nośnego

Przy opływie płata nośnego przez strumień płynu (rys. 2.7) powstaje *siła aerodynamiczna F* , którą można rozłożyć na dwie składowe: *siłę nośną F_z* , prostopadłą do kierunku przepływu niezakłóconego, i *opór aerodynamiczny F_x* , równoległy do kierunku prędkości przepływu niezakłóconego w_∞ .

Siłę nośną F_z , powstającą wskutek różnicy ciśnień po obu stronach płata, określamy wzorem

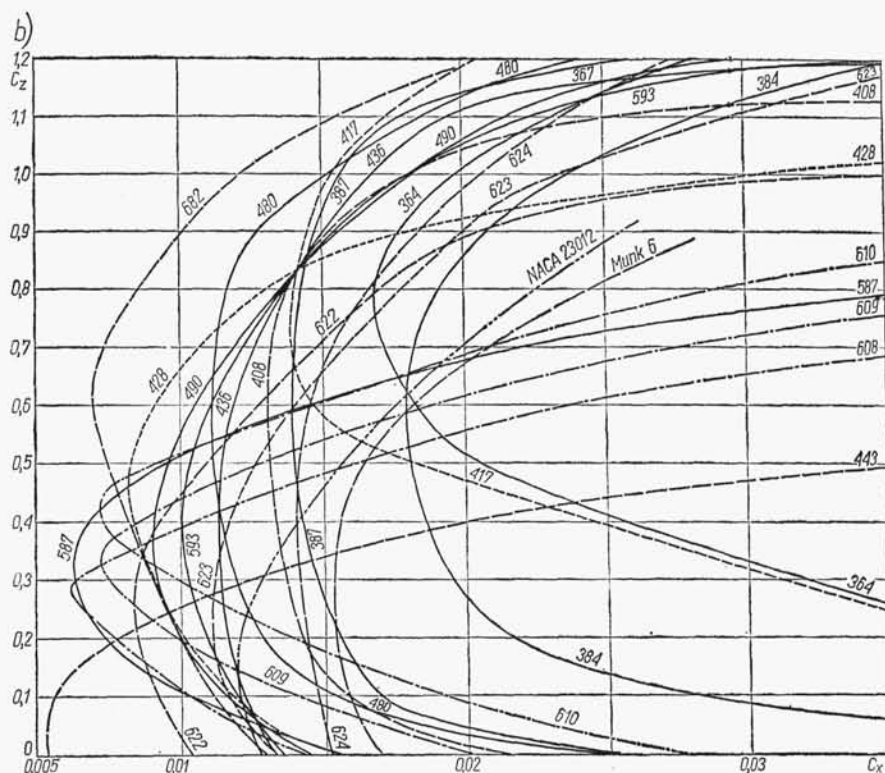
$$F_z = C_z \frac{\rho w_\infty^2}{2} b l \quad (2.50)$$

gdzie C_z — bezwymiarowy współczynnik siły nośnej.

Tablica 2.1. Wymiary profilów aerodynamicznych

x	0	1,25	2,5	5,0	7,5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
364	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,85 0,85	4,05 0,00	5,45 0,05	7,30 0,35	9,65 0,65	11,00 1,05	11,85 1,30	12,50 1,70	12,10 1,85	11,10 1,80	9,50 1,55	7,55 1,25	5,35 0,90	2,90 0,45	1,55 0,20	0,10 0,10
384	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	4,15 4,15	7,25 2,25	8,95 1,55	11,45 1,10	14,95 0,55	17,15 0,30	18,55 0,15	19,70 0,00	19,15 0,00	17,55 0,00	14,95 0,00	11,80 0,00	8,05 0,00	4,15 0,00	2,15 0,00	0,00 0,00
387	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	3,20 3,20	6,25 1,50	7,65 1,05	9,40 0,55	11,95 0,10	13,40 0,00	14,40 0,00	15,05 0,20	14,60 0,40	13,35 0,45	11,35 0,50	8,90 0,45	6,15 0,30	3,25 0,15	1,75 0,05	0,15 0,15
408	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	1,15 1,15	2,95 0,25	3,80 0,00	5,00 0,20	6,70 0,65	7,70 1,00	8,40 1,20	9,05 1,30	8,95 1,30	8,40 1,20	7,45 1,05	6,25 0,85	4,95 0,60	3,45 0,30	2,50 0,10	0,75 0,75
417	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,65 0,65	2,50 0,05	3,75 0,25	5,05 0,70	7,05 1,10	8,15 2,20	8,85 2,55	9,30 3,65	9,15 3,90	8,55 3,65	7,55 3,20	6,25 2,50	4,50 1,70	2,40 0,80	1,20 0,40	0,00 0,00
428	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	1,25 1,25	2,75 0,30	3,50 0,20	4,80 0,10	6,50 0,00	7,55 0,05	8,20 0,15	8,55 0,30	8,35 0,40	7,80 0,40	6,80 0,35	5,50 0,25	4,20 0,15	2,15 0,05	1,20 0,00	0,00 0,00
436	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	2,50 2,50	4,70 1,00	5,70 0,20	7,00 0,10	8,90 0,05	10,05 0,00	10,25 0,00	11,00 0,00	10,45 0,00	9,55 0,00	8,20 0,00	6,60 0,00	4,60 0,00	2,45 0,00	1,25 0,00	0,00 0,00
443	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,00 0,00	0,60 0,60	0,85 0,85	1,15 1,15	1,45 1,45	1,90 1,90	2,15 2,15	2,50 2,50	2,50 2,50	2,35 2,35	2,05 2,05	1,60 1,60	1,15 1,15	0,65 0,65	0,30 0,30	0,00 0,00
480	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	2,55 2,55	5,10 0,80	6,15 0,30	7,65 0,05	8,85 0,00	11,25 0,45	12,10 0,70	12,85 1,10	12,60 1,45	11,60 1,55	10,00 1,50	7,85 1,25	5,45 0,85	2,85 0,40	1,45 0,20	0,00 0,00
490	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	2,00 2,00	3,60 0,85	4,60 0,50	5,95 0,15	7,70 0,00	8,65 0,20	9,20 0,40	9,60 0,95	9,05 0,80	8,55 0,80	7,45 0,60	6,05 0,40	4,40 0,15	2,50 0,00	1,45 0,05	0,15 0,15
587	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,60 0,60	1,65 0,10	2,10 0,00	2,90 0,05	3,60 0,15	4,15 0,30	5,85 0,70	6,55 0,85	6,60 0,80	6,10 0,45	5,40 0,20	4,50 0,00	3,45 0,05	2,35 0,00	1,80 0,85	1,05 1,05
593	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	3,00 3,00	5,50 1,80	6,50 1,35	7,85 0,85	8,90 0,55	10,95 0,25	11,50 0,15	12,00 0,10	11,70 0,00	10,85 0,00	9,45 0,00	7,65 0,00	5,50 0,00	3,00 0,00	1,65 0,00	0,00 0,00
622	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	2,40 2,40	3,75 1,45	4,50 1,05	5,45 0,60	6,15 0,35	7,30 0,15	7,70 0,05	8,00 0,00	7,80 0,00	7,10 0,00	6,15 0,00	5,00 0,00	3,55 0,00	1,95 0,00	1,15 0,00	0,20 0,00
623	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	3,25 3,25	5,45 1,95	6,45 1,50	7,90 0,90	9,05 0,35	10,95 0,20	11,55 0,05	12,00 0,00	11,70 0,00	10,65 0,00	9,15 0,00	7,35 0,00	5,15 0,00	2,80 0,00	1,60 0,00	0,30 0,00
624	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	4,00 4,00	7,15 2,25	8,50 1,65	10,40 0,95	11,75 0,60	14,35 0,15	15,30 0,05	16,00 0,00	15,40 0,00	14,05 0,00	12,00 0,00	9,50 0,00	6,60 0,00	3,55 0,00	2,00 0,00	0,50 0,00
682	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	2,50 2,50	4,55 1,05	5,55 0,60	7,00 0,25	8,05 0,10	10,00 0,05	10,65 0,20	11,20 0,55	10,90 0,75	10,05 0,80	8,65 0,85	6,90 0,75	4,85 0,60	2,55 0,35	1,35 0,15	0,00 0,00
NACA 23012	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,00 0,00	2,67 -1,23	3,61 -1,71	4,91 -2,26	5,80 -2,61	7,19 -3,50	7,50 -3,97	7,55 -4,46	7,14 -4,48	6,41 -4,17	5,47 -3,67	4,36 -3,00	3,08 -2,16	1,68 -1,23	0,92 -0,70	0,00 0,00
Munk 6	$\begin{Bmatrix} y_0 \\ y_4 \end{Bmatrix}$	0,00 0,00	1,98 -1,76	2,81 -2,20	4,03 -2,73	4,94 -3,03	5,71 -3,24	6,82 -3,47	7,55 -3,62	8,05 -3,90	7,26 -3,94	6,03 -3,82	4,58 -3,48	3,06 -2,83	1,55 -1,77	0,88 -1,08	0,00 0,00





Współczynnik poślizgu ε może być wyznaczony z ogólnej zależności

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \lambda = 0,012 + 0,02 g_{\max}/l + 0,08 f/l \quad (2.54)$$

Wyrażenie to wyraźnie wskazuje, że zarówno zwiększanie maksymalnej grubości profilu, jak również krzywizny linii szkieletowej powoduje zwiększenie współczynnika poślizgu $\varepsilon = \operatorname{tg} \lambda$, a w konsekwencji zwiększenie współczynnika oporu C_x .

Dla grupy dwunastu (górnych) profili z rys. 2.9 można przyjąć zależności: $g_{\max} = y_{\max}$, $f = 1/2 y_{\max}$, wtedy wzór (2.42) przyjmie prostszą postać

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \lambda = 0,012 + 0,06 y_{\max}/l \quad (2.55)$$

Istnieją wzory umożliwiające przeliczenie wartości współczynnika siły nośnej C_z lub kąta natarcia δ dla różnych wartości f/l , y_{\max}/l lub różnych grubości g_{\max} :

— dla profili wg rys. 2.9 i 2.10, o szkieletowej w kształcie łuku koła, przy $f/l < 0,1$ (co praktycznie zawsze ma miejsce)

$$C_z = 9,0 f/l + 0,094 \delta^\circ \quad (2.56)$$

— dla profili 428, 682, 364, 480

$$C_z = 4,8 y_{\max}/l + 0,092 \delta^\circ \quad (2.57)$$

— dla profili 408, 490, 436, 387

$$C_z = 4,4 y_{\max}/l + 0,092 \delta^\circ \quad (2.58)$$

— dla profili 622, 623, 624, 384

$$C_z = 4,0 y_{\max}/l + 0,092 \delta^\circ \quad (2.59)$$

— dla profili o kształcie odcinka kołowego, jak np. 608, 609, 610

$$C_z = 5,0 y_{\max}/l + 0,092 \delta^\circ \quad (2.60)$$

— dla profilu Munk 6

$$C_z = 1,30 g_{\max}/l + 0,106 \delta^\circ \quad (2.61)$$

— dla profilu NACA 23012

$$C_z = 1,08 g_{\max}/l + 0,106 \delta^\circ \quad (2.62)$$

— dla profili symetrycznych, jak np. 443

$$C_z = 0,095 \delta^\circ \quad (2.63)$$

Powyższe wzory umożliwiają zmianę grubości profilu. Można więc zastosować na łopatkę ten sam profil zgrubiając go przy piąście i ścieniając na końcu. Nie należy jednak przekraczać wartości 0,2 dla stosunku y_{\max}/l lub g_{\max}/l .