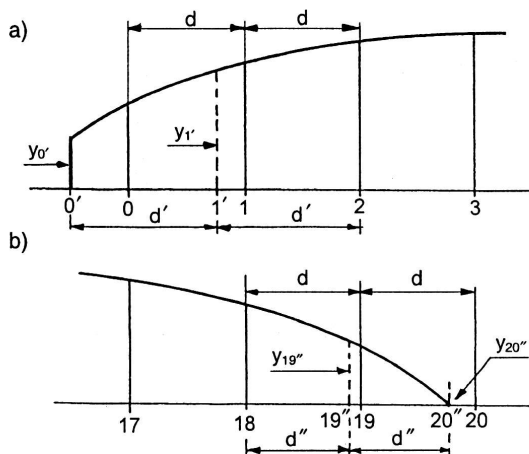


gdzie:

- d' – odstęp między korygowanymi wręgami na rufie statku; 0' i 1' lub 1' i 2,
- d'' – odstęp między korygowanymi wręgami na dziobie jednostki; 18 i 19'' lub 19'' i 20'',
- d – odstęp między wręgami teoretycznymi niekorygowanymi.



Rys. 26. Wodnica statku zaczynająca się przed wręgiem 0, a kończąca się przed wręgiem 20: a) część rufowa wodnicy, b) część dziobowa wodnicy

Skrócony wzór na obliczenie **powierzchni wodnicy** – A_w , pokazanej na rysunku 26, jest następujący:

$$A_w = \frac{4}{3} \cdot d \cdot \sum_{i=0}^{20} C_{Si} \cdot y_i,$$

gdzie:

- y_i – rzędna wręgu teoretycznego o numerze i ,
- i – numer wręgu teoretycznego, od 0 do 20,
- C_{Si} – współczynnik metody Simpsona,
- $C_{Si} = 0,5 \cdot \lambda'$ – dla pierwszej rzędnej (wręg teoretyczny 0'),
- $C_{Si} = 0,5 \cdot \lambda''$ – dla ostatniej rzędnej (wręg teoretyczny 20'),
- $C_{Si} = 2,0 \cdot \lambda'$ – dla drugiej rzędnej (wręg teoretyczny 1'),
- $C_{Si} = 2,0 \cdot \lambda''$ – dla przedostatniej rzędnej (wręg teoretyczny 19'),
- $C_{Si} = 0,5 \cdot \lambda' + 0,5$ – dla trzeciej rzędnej (wręg teoretyczny 2),
- $C_{Si} = 0,5 \cdot \lambda'' + 0,5$ – dla trzeciej od końca rzędnej (wręg teoretyczny 18),
- $C_{Si} = 2,0$ – dla nieparzystych rzędnych (wręgów teoretycznych), prócz 1' i 19',
- $C_{Si} = 1,0$ – dla parzystych rzędnych (wręgów teoretycznych), prócz 0', 2', 18' i 20'.

Powyższy wzór może być również stosowany w wypadkach, gdy wodnica zaczyna się i kończy na teoretycznych wręgach 0 i 20. Wówczas stosowne współczynniki λ' i λ'' będą równe jednności.

Najczęściej obliczeń powierzchni wodnicy dokonuje się w tabeli. Przykład takich obliczeń prezentuje tabela 3, natomiast w załączniku 2 zamieszczono niewypełnioną tabelę do obliczania powierzchni i innych parametrów geometrycznych wodnicy statku.

6.6. Obliczanie parametrów geometrycznych wodnicy

Za pomocą metody całkowania przybliżonego Simpsona I, oprócz powierzchni wodnicy statku – A_W , wyznacza się:

- **odciętą środka powierzchni wodnicy**, odmierzoną od płaszczyzny owręża (najczęściej), lub od pionu rufowego – x_{SO} lub x_{SPR} ,
- **poprzeczny moment bezwładności powierzchni wodnicy**, względem wzdłużnej osi pokrywającej się ze śladem płaszczyzny symetrii – I_B ,
- **wzdłużny moment bezwładności powierzchni wodnicy**, względem poprzecznej osi przechodzącej przez ślad płaszczyzny owręża – I_{LO} lub względem płaszczyzny przechodzącej przez pion rufowy – I_{LPR} .

Wzory na obliczanie wymienionych parametrów wodnicy są następujące:

$$x_{SO} = \frac{M_{SO}}{A_W} \quad \text{lub} \quad x_{SPR} = \frac{M_{SPR}}{A_W},$$

gdzie:

M_{SO} – moment statyczny powierzchni wodnicy względem owręża,

M_{SPR} – moment statyczny powierzchni wodnicy względem pionu rufowego,

$$M_{SO} = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot \sum_{i=0}^{20} (y_i \cdot C_{Si} \cdot x'_{Oi}),$$

lub

$$M_{SPR} = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot \sum_{i=0}^{20} (y_i \cdot C_{Si} \cdot x'_{PRi}),$$

$$I_B = \frac{4}{9} \cdot d \cdot \sum_{i=0}^{20} (y_i^3 \cdot C_{Si}),$$

$$I_{LO} = \frac{4}{3} \cdot d^3 \cdot \sum_{i=0}^{20} (y_i \cdot C_{Si} \cdot x'^2_{Oi}),$$

lub

$$I_{LPR} = \frac{4}{3} \cdot d^3 \cdot \sum_{i=0}^{20} (y_i \cdot C_{Si} \cdot x'^2_{PRi}),$$

gdzie:

x'_{Oi} – bezwymiarowa odległość wręgu i od owręża,

$x'_{Oi} = x_{Oi} / d$,

x'_{PRi} – bezwymiarowa odległość wręgu i od pionu rufowego,

$x'_{PRi} = x_{PRi} / d$.

W wypadkach, gdy wodnica zaczyna się i/lub kończy się nie na wręgach teoretycznych 0 i/lub 20, bezwymiarowe odległości od płaszczyzny owręża skorygowanych wręgów 0', 1', 19' i 20' (wstawiane do tabeli 3) oblicza się w następujący sposób:

$$\begin{aligned}x'_{0'0'} &= -8 - 2 \cdot \lambda', \\x'_{0'1'} &= -8 - \lambda', \\x'_{0'19'} &= 8 + \lambda'', \\x'_{0'20'} &= 8 + 2 \cdot \lambda''.\end{aligned}$$

Gdy wzdłużny moment bezwładności i moment statyczny powierzchni wodnicy wyznaczane są względem płaszczyzny pionu rufowego, bezwymiarowe odległości skorygowanych wręgów są równe:

$$\begin{aligned}x'_{PR0'} &= 2 - 2 \cdot \lambda', \\x'_{PR1'} &= 2 - \lambda', \\x'_{PR19'} &= 18 + \lambda'', \\x'_{PR20'} &= 18 + 2 \cdot \lambda''.\end{aligned}$$

Na podstawie wzdłużnego momentu bezwładności powierzchni wodnicy, obliczonego względem płaszczyzny owręża – I_{LO} , lub płaszczyzny pionu rufowego – I_{LPR} , wyznacza się, zgodnie z **twierdzeniem Steinera**, **wzdłużny moment bezwładności powierzchni wodnicy** względem osi poprzecznej przechodzącej przez środek powierzchni wodnicy – I_L :

$$I_L = I_{LO} - A_W \cdot x_{SO}^2,$$

gdy moment bezwładności jest liczony względem płaszczyzny owręża lub

$$I_L = I_{LPR} - A_W \cdot x_{SPR}^2,$$

gdy moment bezwładności jest liczony względem płaszczyzny pionu rufowego, gdzie:

- x_{SO} – odległość środka powierzchni wodnicy od owręża,
- x_{SPR} – odległość środka powierzchni wodnicy od pionu rufowego.

Momenty bezwładności powierzchni wodnicy są ważnymi parametrami przy wyznaczaniu poprzecznej i wzdłużnej stateczności statku, czyli jego odporności na wytrącanie ze stanu równowagi.

Opisane wyżej parametry wodnic A_W , x_{SO} (lub x_{SPR}), I_B i I_L wyznacza się dla wielu zanurzeń statku. Taki zbiór danych stanowi podstawę do opracowania charakterystyk geometrycznych jego kadłuba, zwanych **danymi hydrostatycznymi**.

Tabela 3

Przykład obliczenia parametrów wodnicy statku metodą całkowania przybliżonego Simpsona I

Numer wręgu	y_i [m]	C_{Si}	$y_i \cdot C_{Si}$	x'_{oi}	$y_i \cdot C_{Si} \cdot x'_{oi}$	$y_i \cdot C_{Si} \cdot x'^2_{oi}$	$y_i^3 \cdot C_{Si}$
0'	0,20	0,38	0,076	-9,52	-0,724	6,892	0,003
1'	0,45	1,52	0,684	-8,76	-5,992	52,490	0,139
2	0,85	0,88	0,748	-8	-5,984	47,872	0,540
3	1,60	2	3,200	-7	-22,400	156,800	8,192
4	2,52	1	2,520	-6	-15,120	90,720	16,003
5	3,47	2	6,940	-5	-34,700	173,500	83,564
6	4,23	1	4,230	-4	-16,920	67,680	75,687
7	4,70	2	9,400	-3	-28,200	84,600	207,646
8	4,92	1	4,920	-2	-9,840	19,680	119,095
9	5,00	2	10,000	-1	-10,000	10,000	250,000
10	5,00	1	5,000	0	0,000	0,000	125,000
11	5,00	2	10,000	1	10,000	10,000	250,000
12	4,96	1	4,960	2	9,920	19,840	122,024
13	4,75	2	9,500	3	28,500	85,500	214,344
14	4,63	1	4,630	4	18,520	74,080	99,253
15	4,32	2	8,640	5	43,200	216,000	161,243
16	3,80	1	3,800	6	22,800	136,800	54,872
17	3,07	2	6,140	7	42,980	300,860	57,869
18	2,02	0,87	1,757	8	14,056	112,448	7,196
19'	1,12	1,48	1,658	8,74	14,491	126,651	2,080
20'	0,00	0,37	0,000	9,48	0,000	0,000	0,000
			Σ_1		Σ_2	Σ_3	Σ_4
			98,803		58,587	1792,513	1845,860

Dla odstępów między teoretycznymi wręgami:

$$d = L_{pp} / 20 = 50 / 20 = 2,5 \text{ m},$$

otrzymano na podstawie obliczeń w tabeli 3 następujące parametry geometryczne wodnicy:

- powierzchnię wodnicy

$$A_w = (4 / 3) \cdot d \cdot \Sigma_1 = (4 / 3) \cdot 2,5 \cdot 98,803 = 392,34 \text{ m}^2,$$

- odciętą środka powierzchni wodnicy, obliczoną względem płaszczyzny owręża

$$x_{SO} = d \cdot \Sigma_2 / \Sigma_1 = 2,5 \cdot 54,857 / 98,803 = 1,381 \text{ m},$$

- wzdlużny moment bezwładności powierzchni wodnicy, obliczony względem poprzecznej osi leżącej w płaszczyźnie owręża

$$I_{LO} = 4 \cdot d^3 \cdot \Sigma_3 / 3 = (4 / 3) \cdot 2,5^3 \cdot 1792,513 = 37\,344 \text{ m}^4,$$

- wzdlużny moment bezwładności powierzchni wodnicy względem poprzecznej osi przechodzącej przez środek powierzchni wodnicy, obliczony za pomocą twierdzenia Steinera

$$I_L = I_{LO} - A_W \cdot x_{SO}^2 = 37\,344 - 329,34 \cdot 1,381^2 = 36\,715,9 \text{ m}^4,$$

- poprzeczny moment bezwładności powierzchni wodnicy, obliczony względem płaszczyzny symetrii

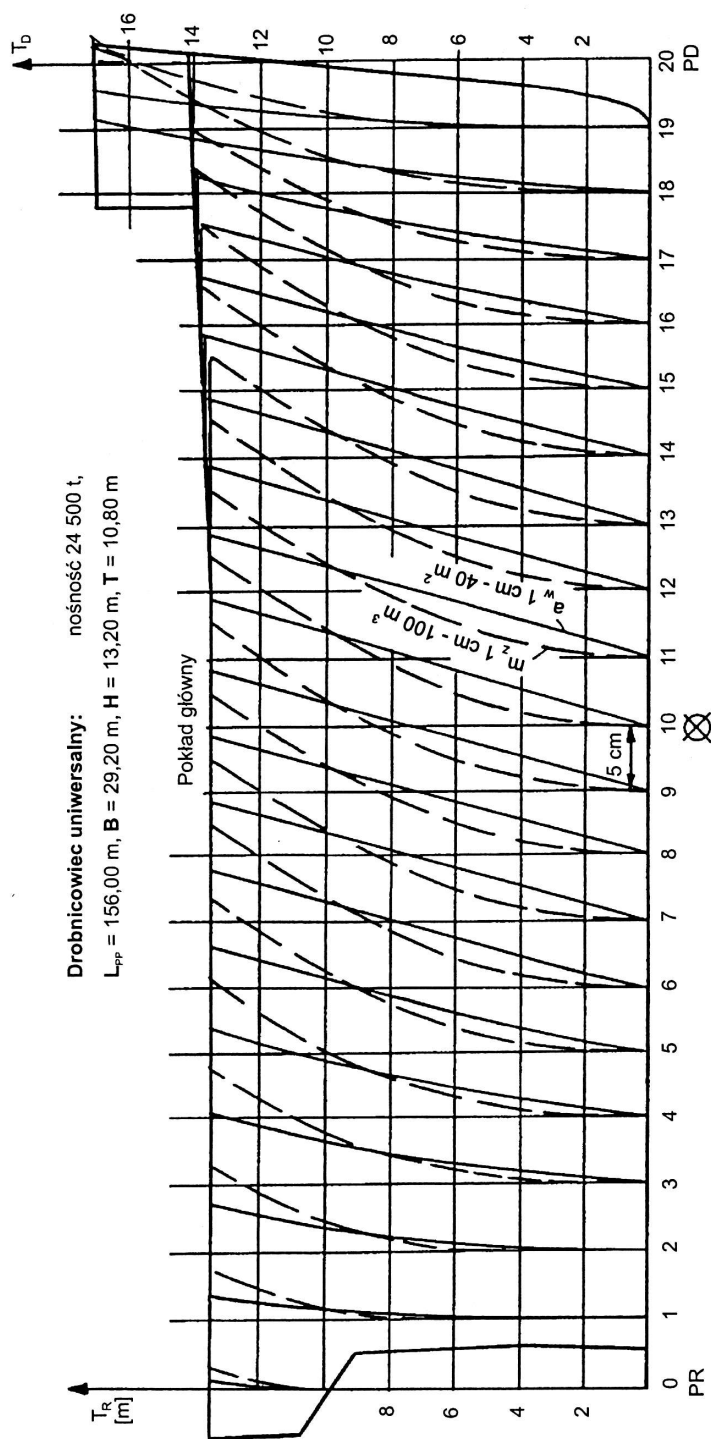
$$I_B = (4 / 9) \cdot d \cdot \Sigma_4 = (4 / 9) \cdot 2,5 \cdot 1845,86 = 2050,95 \text{ m}^4.$$

6.7. Obliczanie parametrów podwodnej części kadłuba

Oprócz obliczeń parametrów geometrycznych wodnic kadłuba statku wyznacza się również parametry geometryczne wręgów teoretycznych dla wielu zanurzeń kadłuba. Są to: **powierzchnie wręgów** – a_W i **momenty statyczne powierzchni wręgów względem płaszczyzny podstawowej statku** – m_Z . Te dane pozwalają wyznaczyć dla każdego teoretycznego wręgu zależności między jego powierzchnią i momentem statycznym tej powierzchni (liczonym względem płaszczyzny podstawowej) a zanurzeniem statku w płaszczyźnie tego wręgu. Zbiorczy wykres takich zależności, prezentowanych w postaci geometrycznej, nosi nazwę **skali Bonjeana**.

Przykład skali Bonjeana prezentuje rysunek 27.

Współcześnie dane nanoszone na skalę mogą być opracowane w postaci tabeli przedstawiającej zależności powierzchni i momentów statycznych powierzchni wręgów teoretycznych dla zanurzeń zmieniających się najczęściej co 1 cm. Taka forma danych jest łatwiejsza do wprowadzenia do pamięci komputera pokładowego.



Rys. 27. Skala Bonjeana dla drobnicowca o nośności 24 500 t

Niezależnie od formy opisanych powyżej danych służą one do wyznaczania, dla dowolnych zanurzeń dziobu i rufy statku, takich jego parametrów jak: **objętość podwodnej części kadłuba** – V , **odcięta** (odmierzana od owręża lub od pionu rufowego) – x_{FO} lub x_{FPR} i **rzędna** (odmierzana od płaszczyzny podstawowej) – z_F **środka objętości podwodnej części kadłuba**. Te dwie współrzędne są jednocześnie **współrzędnymi środka wyporu statku**.

Objętość podwodzia i współrzędne środka wyporu oblicza się metodą całkowania przybliżonego Simpsona I na podstawie otrzymanych ze skali Bonjeana (ewentualnie z tabeli zawierającej te same dane, co ta skala): powierzchni – a_{wi} i momentów statycznych powierzchni (względem płaszczyzny podstawowej) – m_{zi} pól wręgów teoretycznych dla zanurzeń odciętych wodnicą pływania w płaszczyźnie każdego z tych wręgów.

Sposób odczytu tych danych ze skali Bonjeana pokazany jest na rysunku 28.

Obliczeń parametrów statku dla przyjętej wodnicy pływania dokonuje się z wykorzystaniem tabeli 4. Przykładową niewypełnioną tabelę tego typu zawiera załącznik 3.

W wypadkach, gdy na rozpatrywanej wodnicy statku jej początek i koniec nie pokrywają się z wręgami teoretycznymi **0** i **20**, wprowadza się skorygowane wręgi: **0'**, **1'**, **19'** i **20'** oraz wyznacza się ich powierzchnie, podobnie jak to opisano wcześniej przy omawianiu obliczania pola powierzchni wodnicy.

Objętość podwodnej części kadłuba statku – V , odciętą i rzędną środka wyporu – x_{FO} (lub x_{FPR}) i z_F statku wyznacza się z następujących wzorów:

$$V = \frac{2}{3} \cdot d \cdot \sum_{i=0}^{20} (a_{wi} \cdot C_{Si}),$$

$$x_{FO} = \frac{M_{XVO}}{V} \quad \text{lub} \quad x_{FPR} = \frac{M_{XVPR}}{V}$$

$$z_F = \frac{M_{ZV}}{V},$$

gdzie:

M_{XVO} – moment statyczny objętości podwodzia liczony względem płaszczyzny owręża,

M_{XVPR} – moment statyczny objętości podwodzia liczony względem płaszczyzny pionu rufowego,

M_{ZV} – moment statyczny objętości podwodzia liczony względem płaszczyzny podstawowej,

$$M_{XVO} = \frac{2}{3} \cdot d^2 \cdot \sum_{i=0}^{20} (a_{wi} \cdot C_{Si} \cdot x'_{Oi})$$

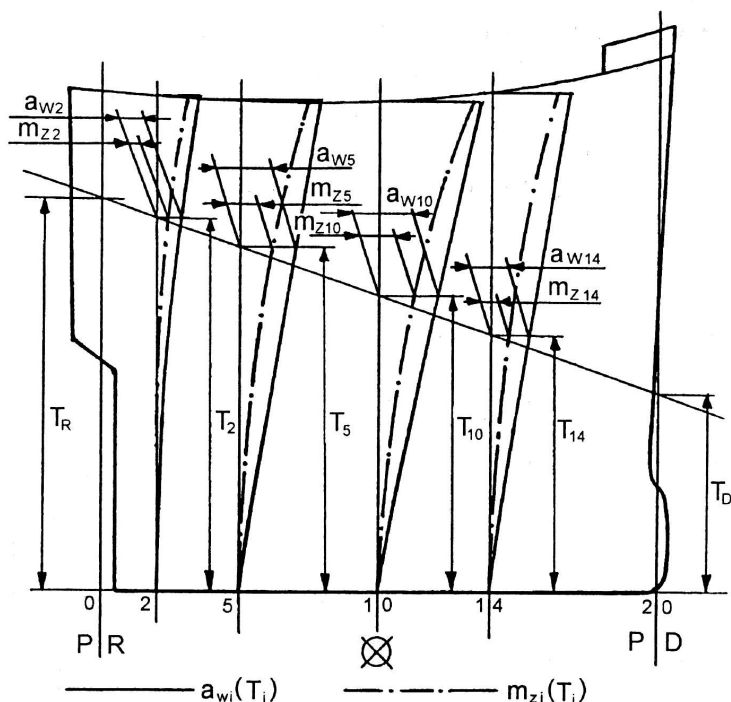
$$\text{lub} \quad M_{XVPR} = \frac{2}{3} \cdot d^2 \cdot \sum_{i=0}^{20} (a_{wi} \cdot C_{Si} \cdot x'_{PRi}),$$

$$M_{ZV} = \frac{2}{3} \cdot d \cdot \sum (m_{zi} \cdot C_{Si}),$$

gdzie:

a_{wi} – odczytana ze skali Bonjeana powierzchnia wręgu i dla zanurzenia na tym wręgu,

m_{zi} – odczytany ze skali Bonjeana moment statyczny powierzchni wręgu i , liczony względem płaszczyzny podstawowej, dla zanurzenia na tym wręgu.



Rys. 28. Przykład odczytu ze skali Bonjeana powierzchni wręgu i momentu statycznego powierzchni wręgu względem płaszczyzny symetrii

Dla odstępu między teoretycznymi wręgami:

$$d = L_{PP} / 20 = 120 / 20 = 6 \text{ m},$$

otrzymano na podstawie obliczeń w tabeli 4 następujące parametry geometryczne podwodnej części kadłuba:

- objętość podwodnej części kadłuba,

$$V = (2 / 3) \cdot d \cdot \Sigma_1 = (2 / 3) \cdot 6 \cdot 3074,6 = 12\,298,4 \text{ m}^3,$$

- rzędną środka objętości podwodnej części kadłuba, równą rzędnej środka wyporu,

$$z_F = \Sigma_2 / \Sigma_1 = 13\,454,9 / 3074,6 = 4,38 \text{ m},$$

- odciętą środka objętości podwodnej części kadłuba, obliczoną względem płaszczyzny owręza, równą odciętej środka wyporu,

$$x_{FO} = d \cdot \Sigma_3 / \Sigma_1 = 6 \cdot (-406,1) / 3074,6 = -0,79 \text{ m}.$$

Wyznaczone w wyżej przedstawiony sposób parametry podwodnej części kadłuba, dla wielu zanurzeń dla statku niemającego przegłębienia, wchodzi w skład danych hydrostatycznych jednostki. Natomiast takie parametry, wyznaczone dla różnych zanurzeń i różnych przegłębień statku, stanowią podstawę do opracowania innego dokumentu, zwanego **krzywymi hydrostatycznymi statku przegłębionego** lub **wykresem Firsowa**.

Tabela 4

Przykład obliczania parametrów podwodnej części kadłuba metodą Simpsona I, na podstawie danych odczytanych ze skali Bonjeana

Numer wręgu	$a_{wi} [m^2]$	$m_{zi} [m^3]$	$x_{oi}' [m]$	C_{Si}	$a_{wi} \cdot C_{Si}$	$m_{zi} \cdot C_{Si}$	$a_{wi} \cdot x_{oi}' \cdot C_{Si}$
0'	0,0	0,0	-10,60	0,65	0,0	0,0	0,0
1'	30,6	172,1	-9,30	2,60	79,4	444,8	-730,6
2	74,5	387,4	-8	1,15	85,6	387,4	-684,8
3	98,8	473,3	-7	2	197,6	946,6	-1383,3
4	114,6	504,2	-6	1	114,6	504,2	-687,6
5	122,8	515,8	-5	2	245,6	1031,6	-1228,0
6	127,4	522,3	-4	1	127,4	522,3	-509,6
7	129,8	525,0	-3	2	259,6	1050,0	-778,8
8	130,0	526,0	-2	1	130,0	526,0	-260,0
9	130,0	526,0	-1	2	260,0	1052,0	-260,0
10	130,0	526,8	0	1	130,0	526,0	0,0
11	130,0	526,0	1	2	260,0	1052,0	260,0
12	130,0	526,0	2	1	130,0	526,0	260,0
13	128,8	525,4	3	2	257,6	1050,8	772,8
14	125,3	525,0	4	1	125,3	525,0	501,2
15	120,2	524,2	5	2	240,4	1048,4	1202,0
16	110,3	512,8	6	1	110,3	512,8	661,8
17	92,2	479,0	7	2	184,4	958,0	1290,8
18	65,6	367,4	8	1,08	70,7	396,0	565,7
19'	28,6	171,6	9,11	2,31	66,1	395,0	602,2
20'	0,0	0,0	10,31	0,58	0,0	0,0	0,0
					Σ_1	Σ_2	Σ_3
					3074,6	13454,9	-406,1

7. DOKUMENTACJA HYDROSTATYCZNA STATKU

7.1. Dane hydrostatyczne statku nieprzegłębionego

Parametry geometryczne kadłuba statku, obliczone na podstawie przekrojów wodnicowych lub wręgowych kadłuba dla różnych zanurzeń i przegłębień jednostki, za pomocą prezentowanych wyżej metod całkowania przybliżonego, służą do wyznaczania wielkości hydrostatycznych statku. Taka dokumentacja jest niezbędna przy wyznaczaniu parametrów stanu jednostki jak: zanurzenia, przegłębienie, zapas pływalności, służy również do obliczania stateczności.

Najważniejszym dokumentem zawierającym dane o parametrach geometrycznych jednostki są **dane hydrostatyczne statku nieprzegłębionego**, zwane w skrócie **danymi hydrostatycznymi**. Na współczesnych statkach, wyposażonych w komputery pokładowe, takie dane mają postać tabelaryczną.

Przykład tabeli danych (zawierającej tylko najważniejsze parametry geometryczne kadłuba, pozwalające na obliczenie stateczności i zanurzenia jednostki) prezentowany jest w załączniku 4.

Na starszych jednostkach spotyka się wykreślną postać tych danych, zwaną **krzywymi hydrostatycznymi**.

Tego typu wykres danych hydrostatycznych pokazany jest na rysunku 29.

W funkcji zanurzenia wypornościowego, naniesionego na pionowej osi współrzędnych, wykreślone są krzywe zmienności parametrów geometrycznych: wodnicy, podwodnej części kadłuba oraz pochodne z tych parametrów dla statku pływającego bez przegłębienia. Wspomniane **zanurzenie wypornościowe** – **T** jest to zanurzenie statku o zadanej całkowitej masie, pływającego bez przegłębienia.

Pełny zestaw parametrów geometrycznych kadłuba tworzą następujące dane:

- powierzchnia wodnicy pływania – $A_W(T)$ [m^2],
- odcięta środka powierzchni wodnicy, wyznaczona względem owręża – $x_{SO}(T)$ [m] lub względem pionu rufowego – $x_{SPR}(T)$ [m],
- poprzeczny i wzdłużny moment bezwładności powierzchni wodnicy pływania – $I_B(T)$ [m^4], i $I_L(T)$ [m^4], obliczone względem osi przechodzących przez środek powierzchni wodnicy,
- objętość podwodnej części kadłuba – $V(T)$ [m^3],
- odcięta wyznaczona względem owręża (lub względem pionu rufowego) i rzędna środka wyporu (równe odciętej i rzędnej środka objętości podwodnej części kadłuba) – $x_{FO}(T)$, (lub $x_{FPR}(T)$) [m] i $z_F(T)$ [m].

Z powyżej prezentowanych parametrów, bezpośrednio obliczonych na podstawie kształtu kadłuba, wyznacza się parametry pochodne. Przedstawiono je poniżej z podaniem formuł ich wyznaczania.

Wyporność statku w wodzie morskiej (o normatywnej gęstości) – **D (T) [t]**:

$$D(T)[t] = V(T)[m^3] \cdot \rho_N[t/m^3] \cdot k[-],$$

gdzie:

$\rho_N = 1,025 \text{ t/m}^3$ – normatywna gęstość wody morskiej,

k [-] – **współczynnik udziału poszycia w wyporności statku** – dla statków wykonywanych metodami montażu poszycia do usztywnień, dla których linie teoretyczne kadłuba wyznaczane są po wewnętrznej stronie poszycia (statki drewniane, ze stali i ze stopów aluminium), wartość tego współczynnika powinna być podana w dokumentacji jednostki:

k = 1,005 dla statków jak wyżej, gdy dokładna wartość tego współczynnika nie jest podana w ich dokumentacji,

k = 1,00 dla jednostek, których linie teoretyczne wyznaczane są po zewnętrznej stronie poszycia – statki z kompozytów (z betonu i z laminatów).

Przyrost wyporności na 1 cm wzrostu zanurzenia statku – TPC (T) [t/cm], ewentualnie na 1 m – **(TPM (T) [t/m]**, lub 1 cal – **TPI (T) [t/cal]**):

$$TPC(T)[t/cm] = 0,01[m/cm] \cdot A_w(T)[m^2] \cdot \rho[t/m^3] \cdot k[-],$$

$$TPM(T)[t/m] = A_w(T)[m^2] \cdot \rho[t/m^3] \cdot k[-],$$

$$\text{lub } TPI(T)[t/cal] = 0,0254[m/cal] \cdot A_w(T)[m^2] \cdot \rho[t/m^3] \cdot k[-].$$

Poprzeczny promień metacentryczny – r_B (T) [m]:

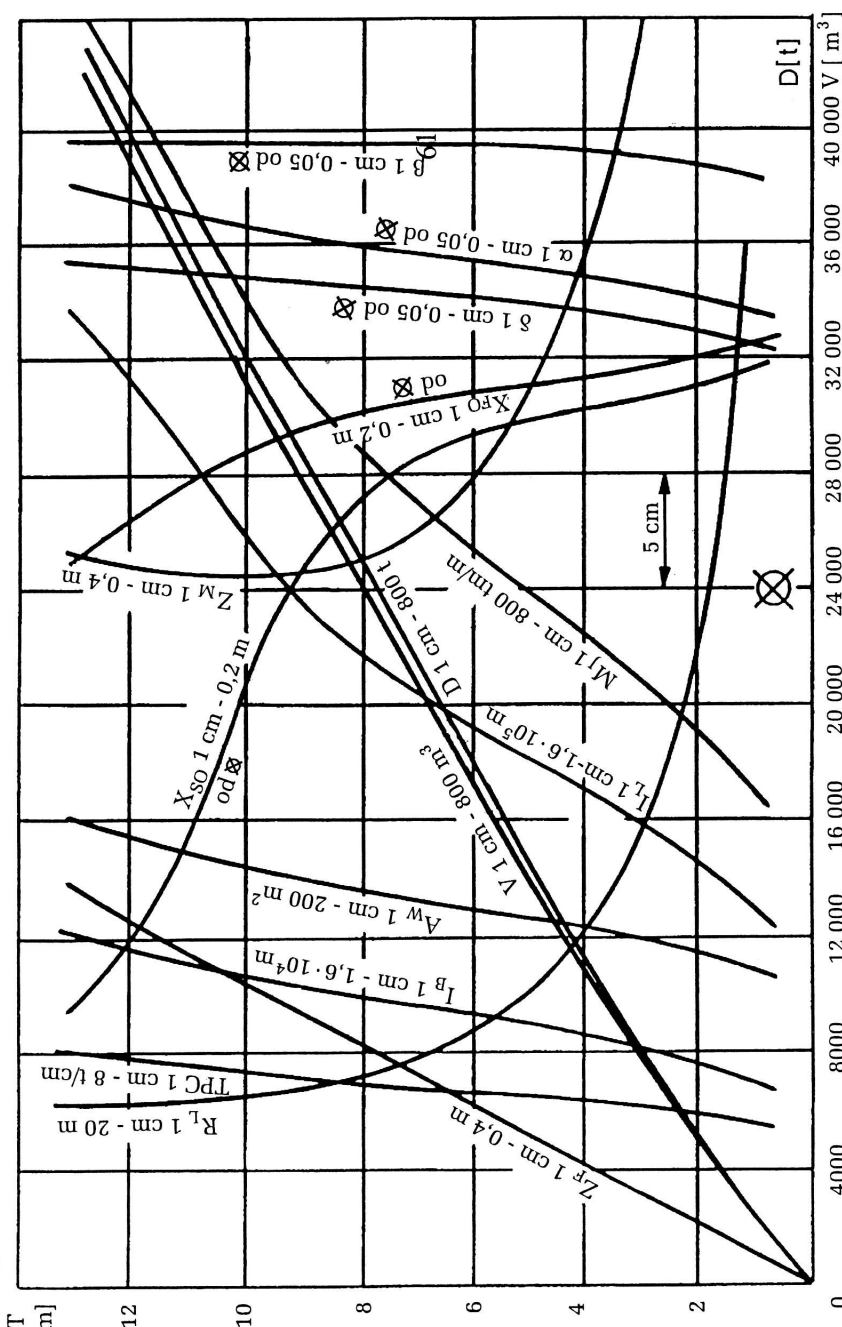
$$r_B(T)[m] = \frac{I_B(T)[m^4]}{V(T)[m^3]}.$$

Ten parametr nie jest bezpośrednio przedstawiony w danych hydrostatycznych, ale jest dodany do rzędnej środka wyporu – $z_F(T)$, tworząc w sumie rzędną metacentrum poprzecznego opisaną poniżej.

Rzędna metacentrum poprzecznego – z_M (T) [m]:

$$z_M(T)[m] = z_F(T)[m] + r_B(T)[m].$$

nośność 24 500 t,



Rys. 29. Krzywe hydrostatyczne drobnicowca o nośności 24 500 t

Wzdłużny moment metacentryczny – $R_L(T)$ [m]:

$$R_L(T)[m] = \frac{I_L(T)[m^4]}{V(T)[m^3]}.$$

Jednostkowy moment przegłębiający – $M_J(T)$, czyli moment, który przyłożony w płaszczyźnie wzdłużnej do statku wywołuje zmianę jego przegłębienia o 1 m:

$$M_J(T)[tm/m] = \frac{D(T)[t] \cdot R_L(T)[m]}{L_{pp}[m]} = \frac{I_L(T)[m^4] \cdot \rho_N[t/m^3] \cdot k[-]}{L_{pp}[m]}.$$

Współczynnik pełnotliwości wodnicy – $\alpha(T)$ [-]:

$$\alpha(T)[-] = \frac{A_w(T)[m^2]}{L_w[m] \cdot B[m]},$$

gdzie L_w [m] – długość kadłuba na wodnicy.

Współczynnik pełnotliwości owręża – $\beta(T)$ [-]:

$$\beta(T)[-] = \frac{A_o(T)[m^2]}{T[m] \cdot B[m]},$$

gdzie $A_o(T)$ [m²] – pole powierzchni podwodnej części owręża.

Współczynnik pełnotliwości kadłuba – $\delta(T)$ [-]:

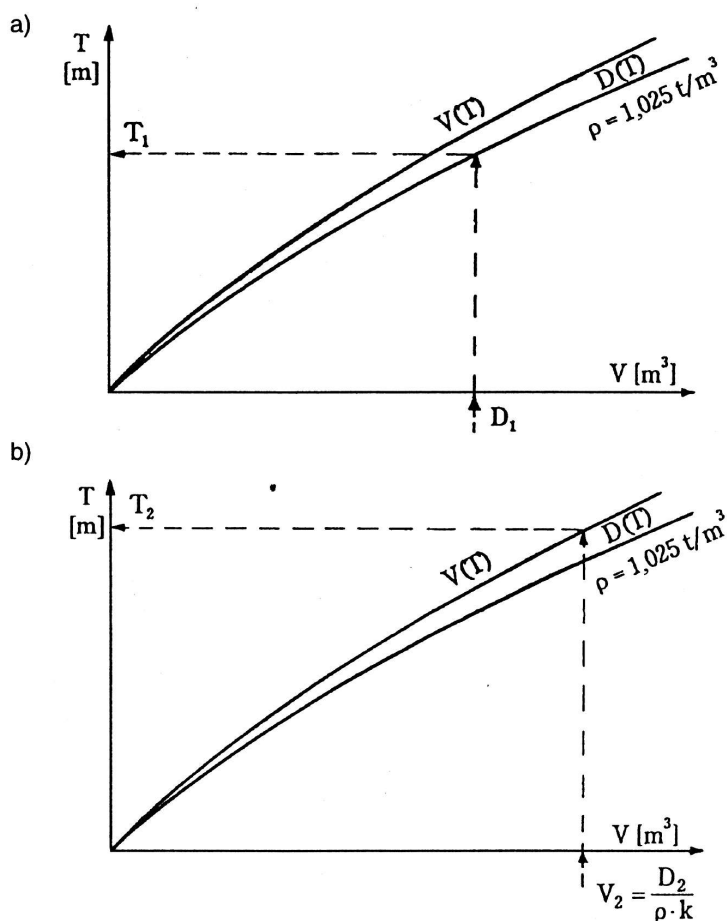
$$\delta(T)[-] = \frac{V(T)[m^3]}{L_w[m] \cdot B[m] \cdot T[m]}.$$

7.2. Zasady korzystania z danych hydrostatycznych

Niezależnie od formy danych hydrostatycznych jednostki (krzywe lub tabela), wykorzystanie ich do obliczeń stanu statku polega na odczytaniu potrzebnych parametrów w funkcji zanurzenia wypornościowego – **T**. To zaś zanurzenie zależy od wyporności statku – **D**. Jeżeli jednostka pływa w wodzie morskiej, której gęstość pomijalnie mało różni się od normatywnej gęstości

wody, dla której wyznaczona jest w danych hydrostatycznych wyporność, to zanurzenie wypornościowe odczytuje się dla zadanej wyporności statku.

Graficzny sposób odczytu tego zanurzenia prezentowany jest na rysunku 30a.



Rys. 30. Wyznaczanie z krzywych hydrostatycznych zanurzenia wypornościowego: a) dla wody o gęstości $\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$, b) dla wody o dowolnej gęstości

W odniesieniu do jednostek pływających w wodzie o gęstości różnej od normatywnej:

$$\rho \neq 1,025 \text{ t/m}^3,$$

należy na podstawie wyporności statku obliczyć objętość podwodnej części kadłuba – V :

$$V = \frac{D}{\rho \cdot k},$$

gdzie ρ – rzeczywista gęstość wody, w której pływa statek.

Zanurzenie wypornościowe trzeba odczytać z krzywej $V(T)$ lub znaleźć w danych tabelarycznych zanurzenie odpowiadające liczbowej wartości objętości podwodzia kadłuba.

Wyznaczanie zanurzenia wypornościowego w opisywanym wypadku, na krzywych hydrostatycznych, pokazane jest na rysunku 30b.

Dalsze postępowanie jest niezależne od warunków pływania jednostki, dla znanego zanurzenia wypornościowego – T odczytuje się z danych hydrostatycznych parametry potrzebne do obliczeń stanu statku.

Dla stabelaryzowanych danych hydrostatycznych przyjęto zasadę, że jeżeli dane statku podawane są co centymetr zanurzenia, nie przeprowadza się interpolacji dla wyznaczenia zanurzenia odpowiadającego dokładnie wartości wyporności lub objętości podwodzia, lecz przyjmuje się najbliższą, wyższą wartość zanurzenia.

Dane hydrostatyczne w dowolnej formie (krzywe lub tabela), zgodnie z przepisami towarzystw klasyfikacyjnych, powinny być zawsze zawarte w dokumentacji statku.

7.3. Dane hydrostatyczne statku przegłębionego

Drugim dokumentem umożliwiającym wyznaczanie stanu statku w trakcie jego eksploatacji są dane hydrostatyczne statku przegłębionego. Przeważnie prezentowane są w postaci wykreślnej jako tzw. wykres Firsowa lub krzywe hydrostatyczne statku przegłębionego. Na nowych jednostkach coraz częściej opisywane dane mają postać zestawu tabel, w których parametry geometryczne jednostki przedstawia się w funkcji zanurzenia wypornościowego dla wielu wartości przegłębień, różniących się od siebie z reguły o 0,5 m, oraz obejmujących cały zakres przegłębień, jaki może występować w warunkach normalnej eksploatacji statku. Z reguły jest to zakres sięgający od przegłębienia 1 m na dziób do przegłębienia na rufę rzędu dopuszczalnego zanurzenia jednostki. Tego typu tabelaryczne dane statku przegłębionego umożliwiają łatwe wprowadzenie ich do programów komputerowych obliczania stanów statku w eksploatacji.

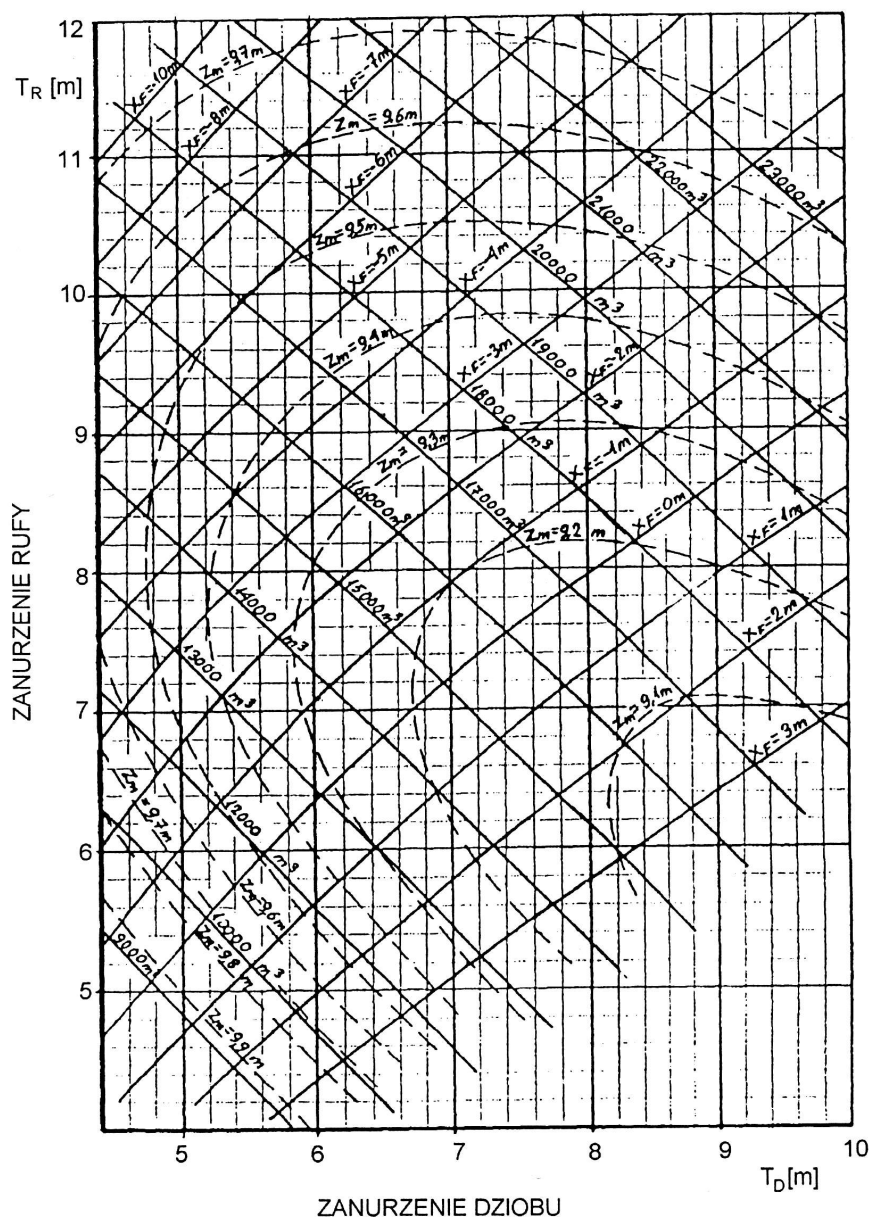
Na rysunku 31 prezentowane są dane hydrostatyczne statku przegłębionego w formie graficznej, najczęściej spotykanej na jednostkach. W polu zawartym między współrzędnymi kartezjańskimi, z których jedna przedstawia zanurzenia dziobu – T_D , a druga rufy – T_R , naniesione są linie stałych wartości:

- objętości podwodnej części kadłuba – $V = \text{const} (T_D, T_R)$,
- odciętej środka wyporu, odmierzanej od owręża – $x_{FO} = \text{const} (T_D, T_R)$ lub od pionu rufowego – $x_{FPR} = \text{const} (T_D, T_R)$,
- rzędnej metacentrum – $z_M = z_F + r_B = \text{const} (T_D, T_R)$ jako sumy rzędnej środka wyporu i poprzecznego promienia metacentrycznego.

Tak skonstruowane krzywe umożliwiają wyznaczenie zanurzeń dziobu i rufy statku na podstawie informacji o całkowitej masie statku i współrzędnych jego środka masy. Wyporność statku jest równa jego masie, a wykorzystując wyporność można, dla znanej gęstości wody, obliczyć objętość podwodnej części kadłuba:

$$D = m_{ST}, \text{ a dla znanej wyporności } - V = \frac{D}{\rho \cdot k},$$

gdzie m_{ST} – masa statku.



Rys. 31. Krzywe hydrostatyczne statku przegiębionego. Drobnicowiec uniwersalny o nośności 13 600 t [24]

Linie działania siły ciężkości (zaczepionej w środku masy statku) i siły wyporu muszą się pokrywać, toteż można, z zadowalającą dokładnością, przyrównać odciętą środka wyporu do odciętej środka masy jednostki:

$$x_{FO} \approx x_{GO},$$

gdzie:

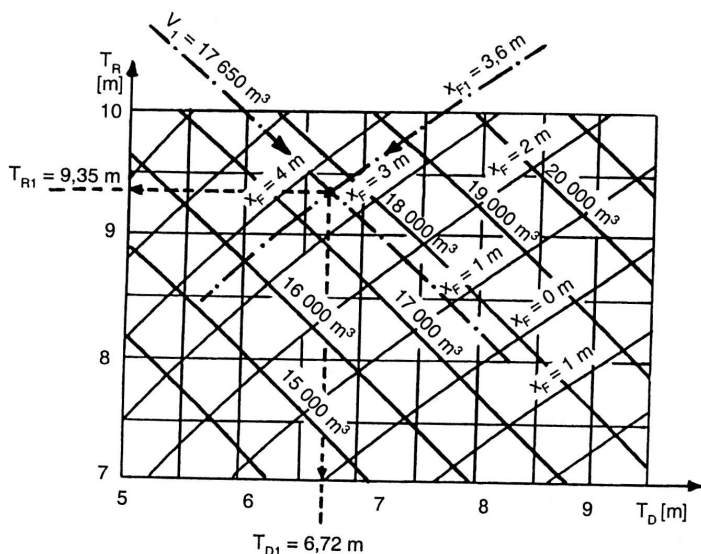
$$x_{GO} = x_G - \frac{L_{PP}}{2},$$

$$\text{lub } x_{FPR} \approx x_G,$$

gdy na krzywych hydrostatycznych statku przegłębionego odcięta środka wyporu jest odczytywana od pionu rufowego.

Na podstawie pary danych V , x_{FO} (lub x_{FPR}), z krzywych hydrostatycznych odczytuje się zanurzenia dziobu – T_D i rufy statku – T_R .

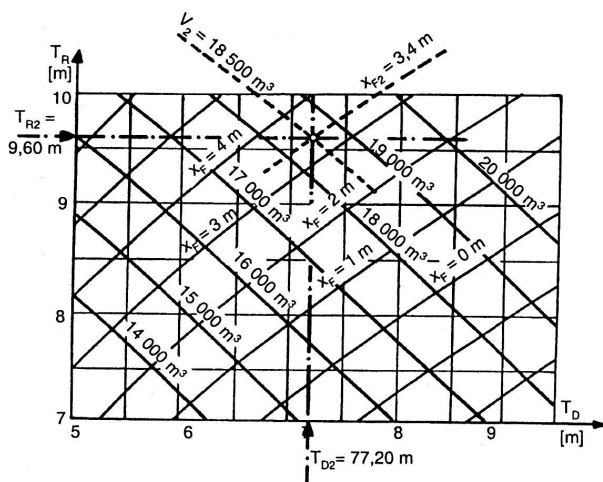
Taki sposób wyznaczania zanurzeń statku prezentuje rysunek 32.



Rys. 32. Wyznaczanie zanurzeń dziobu i rufy na podstawie krzywych hydrostatycznych statku przegłębionego

Z opisywanych krzywych można korzystać również w odwrotny sposób – na podstawie znanych zanurzeń dziobu i rufy wyznaczyć masę i odciętą środka masy statku. Dla pary danych T_D i T_R odczytuje się z krzywych hydrostatycznych objętość podwodnia jednostki V i odciętą środka wyporu x_{FO} (lub x_{FPR}). Z objętości V oblicza się dla znanej gęstości wody – ρ wyporność statku – D równą jego masie – m_{ST} , natomiast odcięta środka masy jednostki – x_{GO} (lub x_G) jest w przybliżeniu równa odciętej jej środka wyporu – x_{FO} (lub x_{FPR}).

Ten sposób korzystania z krzywych hydrostatycznych statku przegłębionego pokazuje rysunek 33.



Rys. 33. Określanie parametrów jednostki za pomocą krzywych hydrostatycznych statku przegłębionego. Wyznaczanie objętości podwodzia i odciętej środka masy statku na podstawie zanurzenia dziobu i rufy

7.4. Skala załadowania

Trzecim dokumentem, opracowanym na podstawie geometrii kadłuba, a współcześnie już rzadko spotykanym na nowych statkach, jest **skala ładunkowa** (lub **skala załadowania**). W odróżnieniu od wyżej opisanych dokumentów występuje ona wyłącznie w postaci graficznej. Ta skala umożliwia wyznaczanie niektórych parametrów statku dla dowolnych gęstości wody na podstawie jego zanurzenia wypornościowego.

Przykład skali ładunkowej zawiera rysunek 34.

Ten dokument składa się z kilkunastu równoległych linii z naniesionymi wartościami następujących parametrów:

- zanurzenie wypornościowe – **T** (odmierzone od dolnej krawędzi stępki),
- wyporności dla różnych gęstości wody – **D** (dla $\rho = 1,000; 1,005; 1,010; 1,015; 1,020$ i $1,025 \text{ t/m}^3$),
- nośności – **N** (sumarycznej masy ładunków, zapasów i balastu na statku), dla podobnych gęstości wody co linie wyporności,
- przyrostu wyporności na 1 cm wzrostu zanurzenia statku – **TPC** (lub 1 m – **TPM**, czy 1 cal – **TPI** wzrostu zanurzenia),
- jednostkowego momentu przegłębającego – **M_I**,
- rzędnej metacentrum – **z_M**,
- odciętej środka powierzchni wodnicy – **x_{SO}**,
- odciętej środka wyporu statku – **x_{FO}**.

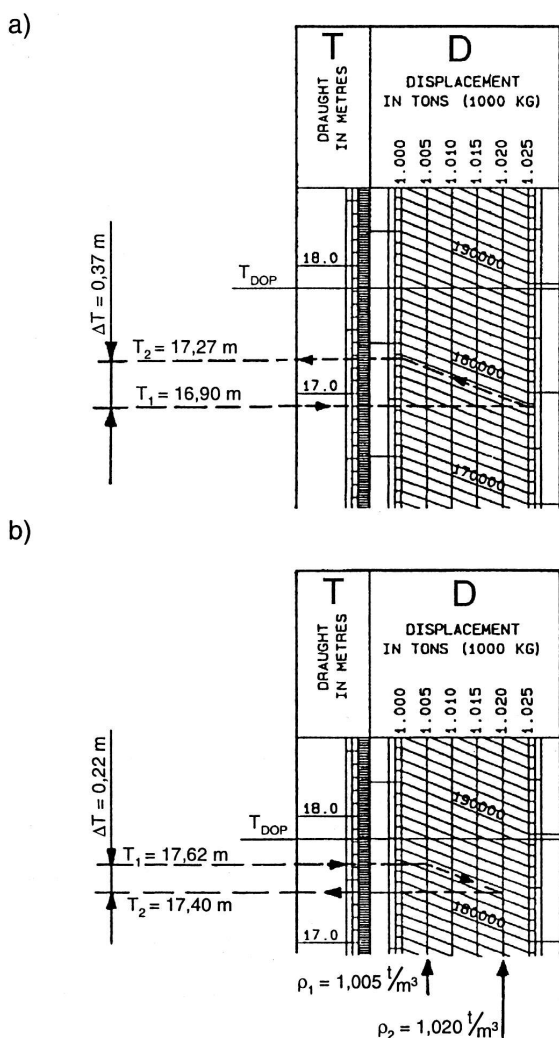
HYDROSTATIC CALIBRATION TABLES

T	D	N	TPC	M ₁	Z _M	X _{FO}	X _{SO}	T
DRAUGHT IN METRES	DISPLACEMENT IN TONS (1000 KG)	DEADWEIGHT IN TONS (1000 KG)	TONS PER CM SALT WATER	MOMENT TO CHANGE TRIM (tm/cm)	METACENTRIC HEIGHT ABOVE BP IN METRE	CENTRE OF BUOYANCY FROM MIDSHIP IN METRES	CENTRE OF FLOTATION FROM MIDSHIP IN METRES	DRAUGHT IN METRES
18.0	190000	10000	118	2440		7.5		
				2420		7.6		
						7.7	-1.0	18.0
						7.8		
17.0	180000	10000	117	2400		7.9		
				2380		8.0		
						8.1	-0.5	
				2360	18.81 MIN	8.2		17.0
				2340		8.3		
						8.4	-0.0	
				2320		8.5		
16.0	170000	10000	116	2300		8.6	0.5	
						8.7		
				2280		8.8		16.0
						8.9		
				2260		9.0	1.0	
15.0	160000	10000	115	2240		9.1		
						9.2	1.5	
				2220		9.3		15.0
						9.4	2.0	
				2200		9.5		
14.0	150000	10000	114	2180		9.6	2.5	
						9.7		
				2160		9.8	3.0	
						9.9		14.0
				2140		10.0	3.5	
						10.1		
				2120		10.2	4.0	
13.0	140000	10000	113	2100		10.3		
						10.4	4.5	
				2080		10.5		13.0
						10.6	5.0	
				2060		10.7		
						10.8	5.5	
12.0	130000	10000	112	2040		10.9		
						11.0	6.0	12.0
				2020		11.1		
						11.2	6.5	
				2000			7.0	
11.0	120000	10000	111	1980				
								11.0
				1960				
				1940				
				1920				

Rys. 34. Skala załadowania masowca o nośności 150 000 t. Wycinek

Wykorzystując skalę załadowania dla statku pływającego bez przegłębienia, można na podstawie zanurzenia odczytanego ze znaków zanurzeń wyznaczyć wyporność i nośność jednostki dla rzeczywistej (pomierzonej) gęstości wody oraz obliczyć jej stateczność przy małych kątach przechyłu i zanurzenia dziobu i rufy. Dodatkowo, za pomocą skali ładunkowej można szybko wyznaczyć zmiany zanurzenia statku przy zmianie gęstości wody za burtą.

Operację tę zaprezentowano na rysunku 35.



Rys. 35. Wyznaczanie za pomocą skali załadowania zmiany zanurzenia statku przy zmianie gęstości wody: a) przejście statku z wody morskiej $\rho = 1,025$ t/m³ do wody słodkiej, b) wzrost gęstości wody morskiej; ΔT – zmiana zanurzenia statku

Opisane wyżej trzy rodzaje dokumentów statków nie wyczerpują listy dokumentów pomocnych do wyznaczania parametrów jednostek w czasie eksploatacji. Niektóre z dokumentów stosowanych w praktyce żeglugowej opisane są w dalszych rozdziałach.

8. OBLICZANIE MASY STATKU I WSPÓŁRZĘDNYCH JEJ ŚRODKA

8.1. Bazy odniesienia współrzędnych środka masy statku

Wyznaczenie parametrów stanu statku w czasie jego eksploatacji oraz takich jego cech, jak na przykład stateczność, nie jest możliwe bez znajomości wielkości i położenia siły ciężkości czyli ciężaru jednostki. Do obliczenia wszystkich parametrów wektora siły ciężkości konieczna jest znajomość całkowitej masy statku – m_{ST} i współrzędnych jego środka masy, czyli: **rzędnej** (odmierzanej od płaszczyzny podstawowej) – z_G , **odciętej** (odmierzanej od płaszczyzny pionu rufowego) – x_G i **współrzędnej poprzecznej** (odmierzanej od płaszczyzny symetrii) – y_G . Niekiedy odciętą środka masy statku odmierza się od płaszczyzny owręża – x_{GO} , ale w większości wypadków jest ona wyznaczana względem pionu rufowego. Przeliczenia odciętej środka masy z jednej bazy na drugą dokonuje się za pomocą poniższych formuł:

$$x_{GO} = x_G - \frac{L_{PP}}{2}, \quad x_G = x_{GO} + \frac{L_{PP}}{2}.$$

8.2. Wyznaczanie masy statku

Całkowita **masa statku** – m_{ST} równa jest sumie mas: pustego statku – m_O , wszystkich zapasów (cieczy zużywanych w czasie eksploatacji jednostki) – m_S , balastów – m_B , ścieków gromadzących się w czasie eksploatacji – m_U , wszystkich ładunków na statkach towarowych – m_C , pasażerów na statkach pasażerskich – m_P oraz załogi, jej bagażu i prowiantu – m_{CBP} . Po kilku latach eksploatacji masa pustego statku różni się od podanej w dokumentacji jednostki, dlatego też zmiany w wielkości tej masy uwzględniane są w dodatkowym składniku, zwanym **stałą statkową** lub **konstantą** – c . Wyrażenie na masę statku ma postać:

$$m_{ST} = m_O + m_Z + m_U + m_C + m_P + m_{CBP} + c.$$

Każda z mas w powyższym wyrażeniu jest z kolei sumą elementarnych mas: części składowych statku (elementów jego kadłuba, mechanizmów, wyposażenia), zapasów, ścieków i balastów w poszczególnych zbiornikach, ładunków w przedziałach ładunkowych, pasażerów, członków załogi itd.

8.3. Równanie momentów statycznych mas na statku

Jednocześnie z obliczaniem całkowitej masy statku, poprzez sumowanie mas składowych wyznacza się położenie jego środka masy. Współrzędne tego środka obliczane są za pomocą **równania momentów statycznych mas**. Według tego równania moment statyczny sumarycznej masy statku, jako obiektu złożonego z wielu mas składowych, obliczony względem dowolnej płaszczyzny w przestrzeni, równy jest sumie momentów statycznych (liczonych względem tej samej płaszczyzny) elementarnych składowych mas, tworzących statek jako całość. Matematyczny zapis tego równania ma postać:

$$m_{ST} \cdot w_G = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot w_i),$$

gdzie:

- m_i – elementarna masa składowa; pusty statek, ciecz w zbiorniku, ładunek lub grupa takich samych ładunków w jednym przedziale ładunkowym, grupa pasażerów, itd.,
- w_i – współrzędna elementarnej masy, czyli odległość środka tej masy od wybranej płaszczyzny,
- i – numer elementarnej masy,
- n – liczba elementarnych mas,
- w_G – poszukiwana współrzędna środka masy statku, czyli odległość tego środka od wybranej płaszczyzny.

Dla prostokątnego układu współrzędnych związanego ze statkiem, współrzędna w oznacza: odciętą – x , rzędną – z , i współrzędną poprzeczną – y .

Momenty statyczne w powyższym równaniu oblicza się dla związanego ze statkiem prostokątnego układu płaszczyzn, których punkt przecięcia leży w płaszczyźnie symetrii jednostki, w miejscu przecięcia się śladu płaszczyzny podstawowej z pionem rufowym. Rzędne środków mas: całego statku i mas składowych odmierzone są od płaszczyzny podstawowej. Odcięte odmierza się od płaszczyzny wręgu teoretycznego nr 0, na której leży pion rufowy, natomiast współrzędne poprzeczne mierzone są od płaszczyzny symetrii i mają dodatnie wartości w kierunku prawej burty, a ujemne w stronę lewej burty.

Przy takim wyborze płaszczyzn odniesienia, rzędną, odciętą i współrzędną poprzeczną środka masy całego statku wylicza się na podstawie następujących zależności:

$$z_G = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot z_i)}{m_{ST}},$$

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot x_i)}{m_{ST}},$$

$$y_G = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot y_i)}{m_{ST}},$$

gdzie $m_{ST} = \sum_{i=1}^n m_i$ – całkowita masa statku, jako suma elementarnych mas składowych statku.

W praktyce, współrzędnej poprzecznej y_G nie oblicza się – statek ładuje się w taki sposób, aby nie miał widocznego przechyłu po skończonym załadunku i w trakcie rejsu, a takie położenie zachodzi wyłącznie, gdy środek masy załadowanej jednostki leży w płaszczyźnie symetrii. Jeżeli na statku zostały niesymetrycznie rozmieszczone ładunki lub zapasy, to wywołany tym przechył należy zlikwidować odpowiednim rozmieszczeniem innych ładunków lub zapasów, ewentualnie poprzez napełnienie (lub opróżnienie) zbiorników balastowych na jednej z burt.

Dane o elementarnych masach i położeniach ich środków uzyskuje się poniżej opisanymi metodami.

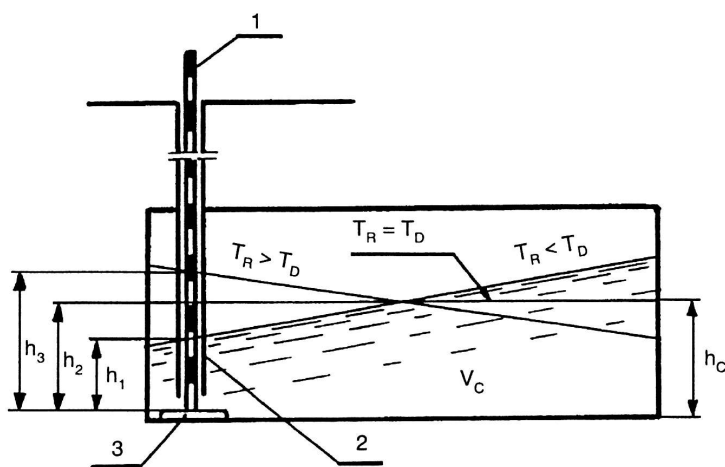
8.4. Masa pustego statku i współrzędne jej środka

Masa pustego statku – m_0 i współrzędne jej środka – x_{GO} i z_{GO} podane są w dokumentacji statku. Te dane otrzymuje się na podstawie tzw. **próby nośności** i **próby przechyłu**, wykonanych przed oddaniem statku do eksploatacji. Reasumując, próba nośności polega na wyznaczeniu wyporności statku bez ładunku na podstawie odczytu zanurzeń jego dziobu i rufy. Od tej wyporności, równej masie statku, odejmuje się masy zapasów, ścieków i balastów, które znajdują się na jednostce w trakcie przeprowadzania próby – daje to w ostateczności masę pustej jednostki. Z kolei na podstawie różnicy w zanurzeniach dziobu i rufy wyznacza się odciętą środka masy jednostki w trakcie próby oraz za pomocą równania momentów statycznych masy statku względem płaszczyzny pionu rufowego wyznacza się **odciętą środka masy pustego statku** – x_{GO} . Moment statyczny pustego statku jest równy momentowi statycznemu statku w czasie próby pomniejszonemu o momenty statyczne mas niewchodzących w skład pustej jednostki, a więc: zapasów, ścieków i balastu. Natomiast próba przechyłu polega na odchyleniu jednostki od pionu za pomocą znanego momentu przechylającego. Na podstawie informacji o wyporności

statku w czasie próby, momentu przechylającego i otrzymanego kąta przechyłu, wyznacza się tzw. **wysokość metacentryczną**, będącą miarą poprzecznej stateczności jednostki. Na podstawie tej wysokości oblicza się rzędną środka masy statku w czasie próby, z której, za pomocą równania momentu masy statku względem płaszczyzny podstawowej, wyznacza się **rzędną środka masy pustego statku** – z_{GO} .

8.5. Wyznaczanie parametrów cieczy w zbiornikach

Masy cieczy w zbiornikach statku i współrzędne ich środków mas (zapasów, ścieków, balastu i ewentualnie płynnych ładunków) wyznacza się, wykorzystując tzw. **tablice skalowania zbiorników**, oraz dane o poziomie ich zapełnienia i gęstości. Poziom zapełnienia zbiornika określany jest na podstawie odczytanego na sondzie (ewentualnie zdalnie pomierzonego) poziomu cieczy w określonym punkcie zbiornika. Rurociąg sondażowy zbiornika lub urządzenia do zdalnego pomiaru poziomu cieczy umieszczone są z reguły w rufowej części zbiornika i ich wskazania dla tej samej ilości cieczy zależą od przegłębienia statku, co pokazuje rysunek 36. Stąd do dokładnego wyznaczenia objętości cieczy w zbiorniku konieczna jest dodatkowo informacja o przegłębieniu jednostki.



Rys. 36. Zależność wskazań sondy do mierzenia poziomów cieczy w zbiornikach od przegłębienia statku: 1 – sonda, 2 – rurociąg sondażowy, 3 – wzmocnienie dna zbiornika pod rurociągiem sondażowym – stopka, h_1 , h_2 , h_3 – wskazania sondy dla różnych przegłębień statku, h_c – poziom cieczy w zbiorniku na nieprzegłębionym statku, V_c – objętość cieczy w zbiorniku

Do wyznaczania objętości cieczy służą **tablice sondowania zbiorników** – przykład takiego dokumentu pokazany jest w tabeli 5.

Tablica sondowania zbiorników 1 LB i 1 PB
na uniwersalnym drobnicowcu o nośności 13 600 t [24]

Wskazanie sondy h [m]	Przegłębienie statku t [m]					
	0,50	0,00	-0,50	-1,00	-1,50	-2,00
	Objętość cieczy w zbiorniku v_c [m ³]					
0,00	1,1	0,6	0,2	0,1	0,0	0,0
0,10	3,5	2,9	2,3	1,7	0,4	0,2
0,20	6,2	5,5	4,8	4,1	3,5	2,9
0,30	9,2	8,4	7,6	6,9	6,1	5,4
0,40	12,5	11,6	10,7	9,9	9,1	8,3
0,50	15,9	15,0	14,1	13,2	12,3	11,5
0,60	19,5	18,5	17,6	16,6	15,7	14,8
0,70	23,3	22,3	21,3	20,3	19,3	18,4
0,80	27,7	26,2	25,1	24,1	23,1	22,1
0,90	31,3	30,2	29,2	28,1	27,0	26,0
1,00	35,6	34,4	33,3	32,2	31,1	30,0
1,10	39,9	38,7	37,6	36,4	35,3	34,2
1,20	44,4	43,2	42,0	40,8	39,6	38,5
1,30	49,0	47,7	46,5	45,3	44,1	42,9
1,40	53,6	52,4	51,1	49,9	48,6	47,4
1,50	58,4	57,1	55,8	54,6	53,3	52,0
1,60	63,3	62,0	60,7	59,4	58,1	56,8
1,70	68,3	66,9	65,6	64,3	62,2	61,6
1,80	73,3	72,0	70,6	69,3	67,9	66,6
1,90	78,5	77,1	75,7	74,3	73,0	71,6
2,00	83,7	82,3	80,9	79,5	78,1	76,7
2,10	89,0	87,6	86,2	84,7	83,3	81,9
2,20	94,4	92,9	91,5	90,0	88,6	87,2
2,30	99,8	98,4	96,9	95,4	94,0	92,5
2,40	101,9	101,9	101,8	100,7	99,3	97,9
2,50	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,3
2,60	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	101,9

Na podstawie wyznaczonej objętości cieczy w zbiorniku, z **tablicy skalowania** tego zbiornika (przykład tego dokumentu zawiera tabela 6) odczytuje się współrzędne środka objętości tej cieczy – x_{VL} , y_{VL} , z_{VL} .

Tablica skalowania zbiornika oleju opałowego nr 9 LB
na uniwersalnym drobnicowcu o nośności 13 600 t

Poziom cieczy w zbiorniku	Objętość cieczy w zbiorniku	Odcięta środką objętości cieczy	Rzędna środka objętości cieczy	Współrzędna poprzeczna środką objętości cieczy
h [m]	v _c [m ³]	x _v [m]	z _v [m]	y _v [m]
0,20	8,2	65,60	1,57	-5,14
0,40	16,4	65,60	1,67	-5,15
0,60	24,5	65,60	1,77	-5,15
0,80	32,7	65,60	1,87	-5,15
1,00	40,9	65,60	1,97	-5,14
1,20	49,1	65,60	2,07	-5,14
1,40	57,2	65,60	2,17	-5,14
1,60	65,4	65,60	2,27	-5,14
1,80	73,6	65,60	2,37	-5,14
2,00	81,8	65,60	2,47	-5,14
2,20	90,2	65,60	2,57	-5,13
2,40	98,9	65,59	2,67	-5,11
2,60	107,6	65,59	2,78	-5,09
2,80	116,3	65,59	2,88	-5,07
3,00	124,9	65,59	2,99	-5,06
3,20	133,6	65,58	3,09	-5,04
3,40	142,3	65,58	3,19	-5,03
3,60	151,0	65,58	3,29	-5,03
3,80	159,6	65,58	3,39	-5,02
4,00	168,3	65,58	3,50	-5,01
4,20	177,0	65,58	3,60	-5,00
4,40	185,7	65,57	3,70	-5,00
4,60	194,2	65,57	3,80	-4,99
4,80	202,3	65,56	3,89	-4,97
5,00	210,6	65,56	3,99	-4,96
5,20	218,9	65,56	4,09	-4,95
5,40	227,1	65,55	4,19	-4,95
5,60	235,4	65,55	4,28	-4,94
5,80	243,7	65,55	4,38	-4,93
6,00	252,0	65,54	4,48	-4,92
6,20	258,5	65,55	4,56	-4,92
6,40	261,6	65,56	4,59	-4,91
6,60	264,7	65,58	4,63	-4,91
6,80	267,7	65,59	4,67	-4,91
6,93	269,8	65,60	4,70	-4,91

Ciecze występujące na statkach są płynami jednorodnymi i barotropowymi (o stałej, niezależnej od ciśnienia hydrostatycznego, gęstości), toteż środki ich mas pokrywają się ze środkami objętości:

$$x_L = x_{VL}, \quad y_L = y_{VL}, \quad \text{ i } \quad z_L = z_{VL},$$

gdzie: x_L, y_L, z_L – współrzędne środka masy cieczy w zbiorniku,
 x_{VL}, y_{VL}, z_{VL} – współrzędne środka objętości cieczy w zbiorniku,
indeks $L \Rightarrow_B$ – gdy ciecz w zbiorniku jest balastem,
 $L \Rightarrow_S$ – gdy ciecz w zbiorniku jest zapasem,
 $L \Rightarrow_C$ – gdy ciecz w zbiorniku jest płynnym ładunkiem,
 $L \Rightarrow_U$ – gdy ciecz w zbiorniku jest ściekiem.

Masę cieczy w zbiorniku – m_L oblicza się, mnożąc jej objętość – v_L razy gęstość – ρ_L :

$$m_L[t] = v_L[m^3] \cdot \rho_L[t/m^3].$$

Gęstość cieczy, gdy nie jest dokładnie znana, mierzy się za pomocą gęstościomierza (aerometru). W wypadku paliw, oleju smarowego czy płynnych ładunków gęstości tych cieczy można wyznaczyć na podstawie gęstości deklarowanych przez dostawców (podane w dokumencie dostawy, dla określonej temperatury – najczęściej 15°C), po ewentualnej korekcie, gdy w zbiorniku jest inna temperatura.

8.6. Wyznaczanie parametrów ładunków

Masy i współrzędne środków mas ładunków w poszczególnych przedziałach, prócz ładunków płynnych przewożonych w zbiornikach ładunkowych, wyznacza się w różny sposób, zależnie od tego: czy w przedziale jest jednorodny ładunek, czy są w nim różne ładunki. Parametry ładunków różnorodnych (w tym również: kontenerów, dużych ciężkich ładunków, pojazdów i ładunków na pojazdach) wyznacza się, wykorzystując **plan ładunkowy (sztauplan)** statku i **listę przewożonych ładunków**. Natomiast dane ładunków jednorodnych ustala się na podstawie **tablic skalowania przedziałów ładunkowych**.

Plan ładunkowy jest to wykonany na rysunku rozkładu przestrzeni ładunkowych jednostki szkic rozmieszczenia ładunków. W celu ułatwienia analizy stanu załadowania statku sąsiadujące ze sobą ładunki oznaczone są na planie różnymi kolorami. Z takiego dokumentu wyznaczane są współrzędne

środków mas poszczególnych ładunków – ich masy najczęściej podaje się w **dokumentach przewozowych**.

Wzmiankowane wyżej tablice skalowania wykonuje się wyłącznie dla przedziałów ładunkowych załadowywanych w kierunku pionowym, jak ładownie i międzypokłady. Zawierają one, w funkcji wysokości napełnienia ładunkiem przedziału: objętość zajęta przez ładunek – v_C , rzędną – z_{VC} , odciętą – x_{VC} , a dla niesymetrycznie umieszczonych przedziałów również współrzędną poprzeczną środka objętości ładunku – y_{VC} . Ze względu na różny sposób zapełnienia wnętrza przedziałów przez ładunki przewożone luzem (zwane ładunkami masowymi) i w opakowaniach (popularnie określane jako drobnica), w dokumentacji jednostki są oddzielne tablice skalowania dla tych grup ładunkowych. Tablice dla ładunków masowych określane są jako tablice dla **ziarna** (ang. *grain*), a dla ładunków typu drobnicy tablice te oznacza się terminem **bele** (ang. *bales*).

Wycinki tablic skalowania ładowni na uniwersalnym drobnicowcu zawiera tabela 7 – dla ładunków masowych przewożonych luzem oraz tabela 8 – dla drobnicy.

Zależność między objętością ładowni zajęta przez ładunek a jego masą uwzględnia **współczynnik załadowania**, zwany również **współczynnikiem sztauerskim K**. Określa on, ile metrów sześciennych (lub stóp sześciennych) przedziału ładunkowego statku zajmuje jedna tona ładunku.

W tabeli 9 przedstawiono współczynniki sztauerskie dla kilkudziesięciu ładunków często transportowanych na statkach morskich. Wartości tych współczynników dla wszystkich spotykanych w transporcie morskim ładunków podawane są w wyspecjalizowanych katalogach, corocznie uaktualnianych.

Ładunki w opakowaniach (drobnica) i ładunki jednostkowe jak: kontenery, palety, pakiety, pojazdy i ładunki na pojazdach oraz duże ciężkie ładunki (maszyny, konstrukcje i urządzenia przemysłowe) mają zazwyczaj podaną masę.

Przy przewozie drobnicy, na podstawie jej masy – m_C (podanej w liście przewozowym) i współczynnika sztauerskiego – **K** (zaczepniętego z odpowiednich katalogów lub podanego przez dostawcę ładunku) obliczana jest objętość przedziału zajęta przez ładunek – v_C :

$$v_C[m^3] = \frac{m_C[t]}{K[\frac{m^3}{t}]}$$

Następnie z tablicy skalowania danego przedziału (dla drobnicy) odczytuje się: wysokość zapełnienia przedziału – **h**, współrzędne środka objętości ładunku – x_{VC} , y_{VC} i z_{VC} , równoważne współrzędnym środka jego masy:

$$x_C = x_{VC}, y_C = y_{VC}, z_C = z_{VC}.$$

Tabela 7

Tablica skalowania ładowni nr 3 dla ziarna (dla ładunku masowego luzem)
na uniwersalnym drobnicowcu o nośności 13 600 t [24]

Poziom zapełnienia ładowni	Objętość ładunku w ładowni	Odcięta środka objętości ładunku	Rzędna środka objętości ładunku	Współrzędna poprzeczna środka objętości ładunku
h [m]	v_c [m ³]	x_{vc} [m]	z_{vc} [m]	y_{vc} [m]
0,20	98,8	81,21	1,57	0,00
0,40	197,5	81,21	1,67	0,00
0,60	296,3	81,21	1,77	0,00
0,80	395,0	81,21	1,87	0,00
1,00	493,8	81,21	1,97	0,00
1,20	592,5	81,21	2,07	0,00
1,40	691,2	81,21	2,17	0,00
1,60	790,0	81,21	2,27	0,00
1,80	888,7	81,21	2,37	0,00
2,00	987,5	81,21	2,47	0,00
2,20	1086,2	81,21	2,57	0,00
2,40	1185,0	81,21	2,67	0,00
2,60	1283,7	81,21	2,77	0,00
2,80	1382,5	81,21	2,87	0,00
3,00	1480,7	81,21	2,97	0,00
3,20	1577,8	81,20	3,06	0,00
3,40	1674,8	81,20	3,16	0,00
3,60	1771,9	81,20	3,26	0,00
3,80	1869,0	81,20	3,36	0,00
4,00	1966,1	81,20	3,46	0,00
4,20	2063,1	81,19	3,56	0,00
4,40	2160,2	81,19	3,66	0,00
4,60	2257,3	81,19	3,77	0,00
4,80	2354,9	81,19	3,87	0,00
5,00	2451,4	81,19	3,96	0,00
5,20	2597,0	81,19	4,06	0,00
5,40	2694,1	81,19	4,16	0,00
5,60	2742,6	81,19	4,25	0,00
5,80	2839,7	81,19	4,35	0,00
6,00	2936,8	81,19	4,45	0,00
6,20	3033,9	81,19	4,55	0,00
6,40	3130,9	81,19	4,65	0,00
6,47	3164,9	81,19	4,69	0,00
6,60	3173,7	81,19	4,70	0,00
6,80	3187,3	81,19	4,71	0,00
6,93	3196,4	81,19	4,72	0,00

Uwaga. Wiersz z pogrubionymi liczbami oznacza parametry ładunku sięgającego do dolnej krawędzi zrębnicy luku.

Tablica skalowania ładowni nr 3 dla drobnicy na uniwersalnym
drobnicowcu o nośności 13 600 t [24]

Poziom zapełnienia ładowni	Objętość ładunku w ładowni	Odcięta średka objętości ładunku	Rzędna średka objętości ładunku	Współrzędna poprzeczna średka objętości ładunku
h [m]	v _c [m ³]	x _{vc} [m]	z _{vc} [m]	y _{vc} [m]
0,20	98,3	81,21	1,57	0,00
0,40	196,6	81,21	1,67	0,00
0,60	294,9	81,21	1,77	0,00
0,80	393,1	81,21	1,87	0,00
1,00	491,4	81,21	1,97	0,00
1,20	589,7	81,21	2,07	0,00
1,40	688,0	81,21	2,17	0,00
1,60	786,4	81,21	2,27	0,00
1,80	884,5	81,21	2,37	0,00
2,00	982,8	81,21	2,47	0,00
2,20	1032,0	81,21	2,57	0,00
2,40	1179,4	81,21	2,67	0,00
2,60	1277,7	81,21	2,77	0,00
2,80	1375,9	81,21	2,87	0,00
3,00	1473,7	81,21	2,97	0,00
3,20	1570,4	81,20	3,06	0,00
3,40	1667,2	81,20	3,16	0,00
3,60	1763,9	81,20	3,26	0,00
3,80	1860,6	81,20	3,36	0,00
4,00	1957,4	81,20	3,46	0,00
4,20	2054,1	81,20	3,56	0,00
4,40	2150,8	81,19	3,66	0,00
4,60	2247,5	81,19	3,77	0,00
4,80	2344,3	81,19	3,87	0,00
5,00	2441,0	81,19	3,96	0,00
5,20	2357,7	81,19	4,06	0,00
5,40	2634,4	81,19	4,16	0,00
5,60	2731,2	81,19	4,25	0,00
5,80	2827,9	81,19	4,35	0,00
6,00	2924,6	81,19	4,45	0,00
6,20	3021,4	81,19	4,55	0,00
6,40	3118,1	81,19	4,65	0,00
6,47	3151,9	81,19	4,69	0,00
6,60	3155,0	81,19	4,69	0,00
6,78	3158,0	81,19	4,69	0,00

Uwaga. Wiersz z pogrubionymi liczbami oznacza parametry ładunku sięgającego do dolnej krawędzi zrębnicy luku.

Wartości współczynników sztauerskich (załadowania)
dla wybranych ładunków [10]

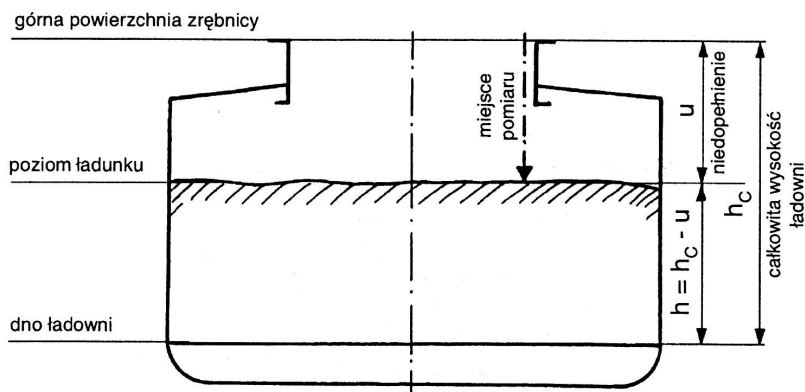
Ładunek i opakowanie		Współczynnik sztauerski K [m ³ /t]	Ładunek i opakowanie		Współczynnik sztauerski K [m ³ /t]
Aluminium	odlew	0,77	Olej jadalny	skrzynki	1,52
Apatyty	luzem	0,46	Ołów	odlew	0,24
Bawełna prasowana	bele	1,90	Owies	luzem	1,96 – 2,40
Boksyty	luzem	0,46	Owoce świeże	skrzynki	2,30
Cement	worki	0,99	Owoce suszone	skrzynki	2,00
Cukier	worki	1,30	Papier	role	2,30
Cyna	odlew	0,24	Pszenica	luzem	1,20 – 1,40
Cynk	odlew	0,24	Ruda manganu	luzem	0,32 – 0,56
Cytrusy	skrzynie	1,15	Ruda miedzi	luzem	0,35 – 0,65
Drewno	pakiety	1,00 – 2,30	Ruda żelaza	luzem	0,29 – 0,67
Farby	puszki	0,70	Rury stalowe	wiązki	1,00 – 3,00
Herbata	skrzynie	2,00 – 3,55	Tytoń prasowany	bele	2,00 – 4,00
Jęczmień	luzem	1,28 – 1,68	Urządzenia przemysłowe	luzem	1,80 – 2,80
Juta	bele	1,60 – 3,00	Urządzenia przemysłowe	skrzynie	4,00 – 5,00
Kable elektryczne	wiązki	0,85	Warzywa świeże	worki	2,00 – 2,40
Kauczuk	bele	1,60	Warzywa suszone	worki	3,00 – 3,60
Kawa	worki	1,60	Węgiel kamienny	luzem	1,00 – 1,40
Koks	luzem	2,40	Wełna	bele	4,40
Konserwy	skrzynki	1,36	Wyroby walcowane	luzem	0,20 – 0,70
Kukurydza	luzem	1,30 – 1,70	Wyroby hutnicze	odlew	0,20 – 0,40
Liny stalowe	zwoje	2,00	Wyroby tekstylne	bele	3,00 – 4,20
Masło	skrzynki	2,70	Ziemniaki	worki	2,10
Mąka	worki	1,45	Żeliwo	odlew	0,20 – 0,28
Mięso mrożone	tusze	2,60	Żyto	luzem	1,30 – 1,50

Ładunki jednostkowe, takie jak: kontenery, ładunki ciężkie, pojazdy i ładunki na pojazdach, mają często podaną wyłącznie masę. Wymagane do obliczeń stanu statku współrzędne środków mas tych ładunków określa się w sposób przybliżony w połowie gabarytowych wymiarów. Wyznaczona w ten sposób, na przykład rzędna środka masy kontenera, mierzona od jego podstawy, leży w połowie jego wysokości, chociaż przy niepełnym kontenerze będzie ona niższa. Rzędna środka masy kontenera względem płaszczyzny podstawowej statku jest wobec tego sumą rzędnej podstawy kontenera i połowy jego wysokości. Podobnie postępuje się wobec ciężkich ładunków, jak: maszyny, konstrukcje czy przemysłowe urządzenia, natomiast w odniesieniu do pojazdów i ładunków na pojazdach przyjmuje się pionowe położenia ich środków mas, zgodnie z danymi producentów pojazdów.

W wypadku ładunków masowych z reguły nie jest znana ich masa. Po napełnieniu przedziału ładunkowego takim ładunkiem i zniwelowaniu

stożka usypowego (czyli **roztrymowaniu** ładunku), jeżeli ładunek nie zapełniał całego przedziału, mierzy się poziom ładunku, najczęściej poprzez pomiar jego niedopełnienia.

Ten sposób określania wysokości ładunku masowego w ładowni statku przedstawia rysunek 37.



Rys. 37. Określenie poziomu napełnienia przedziału ładunkiem masowym poprzez pomiar wysokości jego niedopełnienia, czyli odległości w pionie od zębownicy luku do górnego poziomu ładunku

Wysokość napełnienia przedziału ładunkowego wprowadza się do tablicy skalowania wykonanej dla ładunków masowych, odczytując objętość ładunku – v_C i współrzędne jego środka objętości – x_{VC} , y_{VC} i z_{VC} . Na podstawie objętości ładunku i jego współczynnika sztauerskiego oblicza się masę ładunku:

$$m_C[t] = \frac{v_C[m^3]}{K[\frac{m^3}{t}]},$$

a ponieważ w rozpatrywanym przedziale ładunek jest jednorodny, jako współrzędne środka jego masy przyjmuje się współrzędne środka objętości, odczytane z tablicy skalowania przedziału ładunkowego:

$$x_C = x_{VC}, \quad y_C = y_{VC}, \quad z_C = z_{VC}.$$

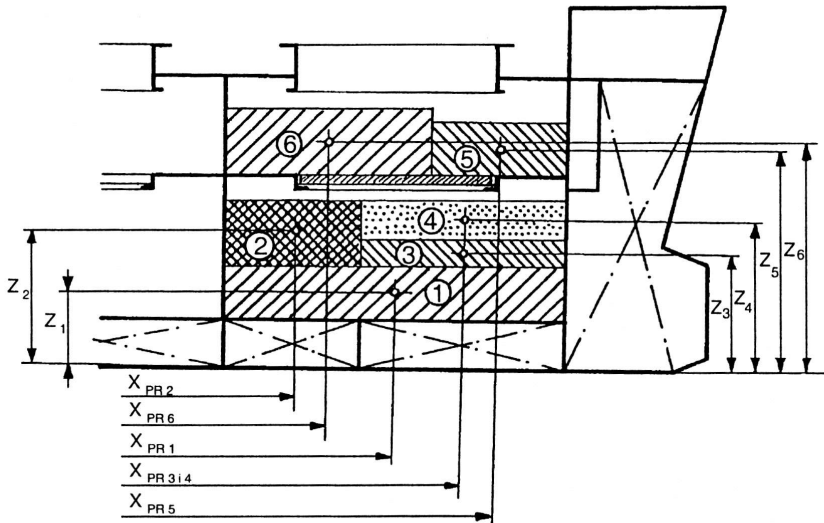
Do takich obliczeń należy wybrać właściwy współczynnik sztauerski, to znaczy wyznaczony dla świeżo usypanego ładunku masowego – ma on większą wartość niż dla tego samego ładunku spoczywającego długi czas na hałdzie.

8.7. Ładowanie warstwowe przedziałów ładunkowych

W wypadkach tzw. ładowania warstwowego, gdy na poziomo roztrymowany dolny ładunek załadowana jest warstwa następnego ładunku, lub dwie, trzy warstwy ładunków o odmiennych współczynnikach sztauerskich, można

postępować dwójako. Mniej dokładny sposób polega na wyznaczeniu mas i współrzędnych środków mas poszczególnych ładunków na podstawie sztauplanu, czyli szkicu wypełnienia przedziałów ładunkowych statku.

Przedstawia to rysunek 38. Mogą jednak wówczas występować duże różnice pomiędzy rzeczywistymi parametrami ładunku a wyznaczonymi na podstawie sztauplanu, zwłaszcza dla dziobowych i rufowych ładowni, których kształty różnią się znacznie od prostopadłościanu.



Rys. 38. Wycinek planu ładunkowego (sztauplanu) dla ładowni i międzypokładu, załadowanych kilkoma ładunkami

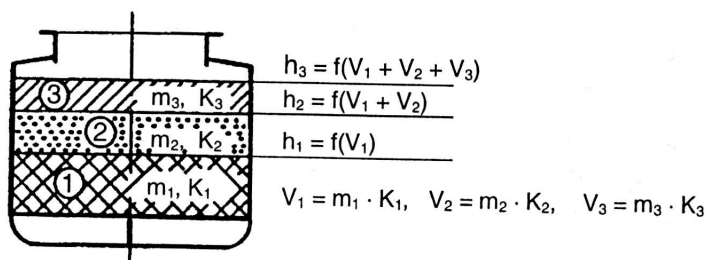
Dokładniejszy sposób wyznaczania mas i współrzędnych środków mas ładunków załadowanych warstwowo stanowi posłużenie się w zmodyfikowany sposób tablicą skalowania wypełnionego w ten sposób przedziału ładunkowego. Polega ono na teoretycznym ładowaniu przedziału zawsze jednorodnym ładunkiem, począwszy od najwyżej położonego, oraz wyładowaniu jego dolnej warstwy zastępującej niżej położone ładunki.

W wypadku na przykład trzech ładunków warstwowo umieszczonych w ładowni należy wpierw: wyznaczyć ich objętości (na podstawie znanych mas i współczynników sztauerskich), a potem określić graniczne poziomy pomiędzy poszczególnymi warstwami ładunków, wykorzystując odpowiednie dla typu ładunku tablice skalowania przedziału. Następnie, obliczeniowo, wypełnia się przedział najwyższym (trzecim w analizowanym przykładzie) ładunkiem do najwyższego poziomu wypełnienia, wyznaczonego dla wszystkich ładunków. Kolejno, znowu obliczeniowo, opróżnia się przedział z najwyższego ładunku do poziomu wyznaczonego dla dwóch dolnych ładunków. Po takiej operacji obliczeniowej w przedziale pozostaje tylko rzeczywista ilość górnego ładunku w rzeczywistym jego położeniu, to znaczy na dolnych ładunkach.

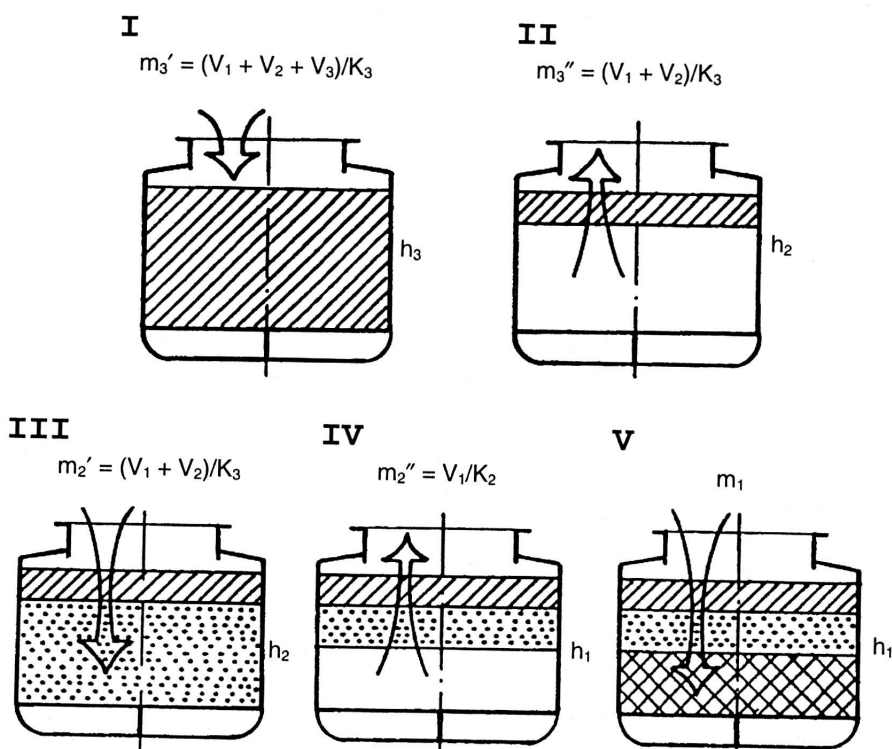
W kolejnym kroku napełnia się opróżnioną część przedziału (pod górnym ładunkiem) środkowym ładunkiem, a następnie usuwa się go z przestrzeni zajętej przez najniższy ładunek. Na koniec zapełnia się najniższą część przedziału właściwym dolnym ładunkiem.

Graficzny obraz takiego postępowania przedstawiony jest na rysunku 39.

a)



b)



Rys. 39. Kolejność postępowania przy wyznaczaniu parametrów trzech ładunków załadowanych warstwowo do przedziału ładunkowego statku: a) poziomy sposób rozgraniczenia ładunków, b) obliczeniowy sposób ładowania przedziału; I – V – etapy ładowania, m'_i – obliczeniowa (zastępcza) masa załadowanego ładunku, m''_i – obliczeniowa (zastępcza) masa wyładowanego ładunku, gdzie indeks $i = 1, 2, 3$ – numer ładunku, od dna ładowni

Obliczenia masy i współrzędnych środka masy statku przeprowadza się zazwyczaj w pomocniczej tabeli lub na komputerze na arkuszu kalkulacyjnym. Przykład tego typu obliczeń prezentowany jest w tabeli 10.

Tabela 10

Obliczenia masowe dla drobnicowca uniwersalnego o nośności 13 600 t

Wyszczególnienie	Masa m [t]	Odcięta x [m]	Rzędna z [m]	Moment masy względem PR M · x [tm]	Moment masy względem PP m · z [tm]
Statek pusty	7174	56,73	10,21	406 981	73 247
Załoga, prowiant, bagaż, konstanta	61	79,39	6,98	4843	426
Zapasy					
Olej opałowy zb. 2 LB	153	102,93	0,78	15 378	119
zb. 2 PB	153	102,93	0,78	15 738	119
zb. 9 LB	244	65,60	4,70	15 974	1144
zb. 9 PB	256	65,64	4,67	16 804	1196
Olej opałowy razem	806	78,83	3,13	65 534	2526
Olej napędowy zb. 5 LB	112	39,36	0,73	4408	82
zb. 5 PB	112	39,43	0,73	4416	82
Olej napędowy razem	224	39,39	0,73	8824	164
Olej smarowy zb. 17	13	19,60	1,00	255	13
zb. 28	28	7,21	10,19	202	285
Olej smarowy razem	41	11,40	7,28	456	298
Woda słodka zb.33 LB	50	0,70	10,84	35	542
zb. 33 PB	50	0,70	10,84	35	542
zb. 35	66	0,28	8,26	18	544
Woda słodka razem	166	0,53	9,81	88	1628
Zapasy razem	1237	60,55	3,73	77 902	4616
Balast wodny zb. 3 L i PB	398	81,20	0,72	32 318	287
zb. 3 A L i PB	279	80,66	0,79	16 878	208
zb. 6 L i PB	240	120,06	4,17	28 814	1001
Balast wodny razem	917	99,19	3,09	78 010	1496
Ładunek Mp. 1A	455	121,17	10,11	55 132	4600
Mp. 1B	483	122,90	14,21	59 361	6863
Ład. 2	1452	103,42	4,73	150 166	6868
Mp. 2	1084	103,80	10,63	112 519	11 523
Ład. 3	2155	81,20	4,69	174 986	10 207
Mp. 3	1606	81,03	10,65	130 134	17 104
Ład. 4	1234	55,68	4,69	68 709	5787
Mp.4	1170	57,76	10,60	65 579	12 402
Ład. 5/1 LB	255	40,65	3,41	10 366	870
Ład. 5/1 PB	249	40,65	3,41	10 122	849
Ład. 5/2 LB	270	40,41	6,48	10 911	1750
Ład. 5/2 PB	265	40,41	6,48	10 509	1717
Mp. 5 LB	205	40,30	10,58	8262	2169
Mp. 5 PB	195	40,30	10,58	7858	2063
Ładunek razem	11 078	78,95	6,89	874 614	76 308
Statek załadowany	20 467	70,47	8,04	1 442 350	164 557

Z kolei w tabeli 11 przedstawiono warstwowe wypełnienie ładowni trzema ładunkami, podobnie jak to graficznie pokazuje rysunek 39.

Tabela 11

Przykład zakresu obliczeń w wypadku ładowania warstwowego trzech ładunków masowych do ładowni nr 3 na drobnicowcu uniwersalnym o nośności 13 600 t

Wyszczególnienie	Masa m [t]	Odcięta x [m]	Rzędna z [m]	Moment masy względem PR m · x [tm]	Moment masy względem PP m · z [tm]
Statek przed załadunkiem	14 350	65,32	8,52	937 342	122 262
Ładunek nr 3 załadowany do wys. $h_3 = 6,30$ m	1427	81,19	4,60	115 858	6564
Ładunek nr 3 wyładowany do wys. $h_2 = 3,85$ m	-877	81,20	3,39	-71 212	-2973
Ładunek nr 2 załadowany do wys. $h_2 = 3,85$ m	1157	81,20	3,39	93 948	3932
Ładunek nr 2 wyładowany do wys. $h_1 = 2,25$ m	-677	81,21	2,59	-54 979	-1753
Ładunek nr 1 załadowany do wys. $h_1 = 2,25$ m	800	81,21	2,59	64 968	2072
Statek po załadunku	16 180	67,12	8,04	1 085 925	130 094

8.8. Informacje dodatkowe

Na współczesnych statkach obliczeń masy statku i współrzędnych jej środka dokonuje się za pomocą programu komputerowego, służącego do wyznaczania stateczności i zanurzeń jednostki, a niekiedy również do kontroli wytrzymałości jej kadłuba. Obsługującemu program pozostaje tylko wprowadzenie do pamięci komputera danych dotyczących;

- mas lub poziomów i gęstości cieczy w zbiornikach,
- mas, poziomów i współczynników sztauerskich ładunków w poszczególnych przedziałach,
- mas i współrzędnych środków mas: ładunków dużych, kontenerów pojazdów, ładunków na pojazdach i ładunków drobnicowych zajmujących tylko część przedziału.

Pozostałe dane niezbędne do obliczeń, jak masa i współrzędne środka masy: pustego statku, pasażerów, załogi z bagażem i prowiantu, tablice skalowania zbiorników i przedziałów ładunkowych, rzędne: dna w ładowniach, dolnych pokładów i górnego pokładu oraz rzędne pokryw lukowych, gdy na nich są przewożone kontenery lub inne ładunki, wprowadzone są do programu w trakcie jego instalowania.

Na kontenerowcach programy komputerowe służące do obliczeń stanów załadowania mają wprowadzone dane dotyczące współrzędnych stosów, warstw i szeregów kontenerów w ładowniach i na pokładzie, w związku z czym prowadzącemu obliczenia pozostaje tylko przypisanie masy kontenera do **indeksu (kodu) jego położenia na jednostce**. Podobnie jest na statkach do ładunków wtaczanych (np. ro-ro, promy samochodowe i kolejowe). W programach komputerowych obsługi załadunku tych statków zawarte są dane o parametrach pasów parkowania, prowadzący obliczenia ładunkowe wprowadza jedynie dane o pasie i sektorze umieszczenia pojazdu oraz o jego masie.

8.9. Zmiany stanu załadowania statku

Na jednostkach niemających komputerów wyznaczanie parametrów statku (w tym masy i współrzędnych jej środka) w dowolnym etapie rejsu lub postoju w porcie jest pracochłonne, jednak jest wymagane, głównie ze względu na bezpieczeństwo statecznościowe statków. Aby uniknąć konieczności ciągłego powtarzania obliczeń dla wszystkich mas na statku, można przy niewielkich zmianach załadowania jednostki (np. częściowe zużycie zapasów, ich uzupełnienie w porcie, częściowy rozładunek lub przyjęcie nowej partii ładunków), stosować metodę korekty stanu załadowania. Polega ona na wprowadzeniu do początkowego stanu statku (o znanej masie i współrzędnych jej środka) zmian, które nastąpiły w jego załadunku. W tabeli obliczeń masowych od początkowych danych jednostki odejmuje się te pozycje masowe, które zostały zużyte lub wyładowane, natomiast dodaje się pozycje, które przyjęto na statek.

W wypadkach gdy: zużyto w czasie rejsu częściowo zapasy w zbiorniku, uzupełniono te zapasy w porcie, częściowo wyładowano przedział lub kilka przedziałów, dodano ładunki do przedziałów niecałkowicie pustych, obowiązuje następująca zasada obliczeniowa. Przedział, w którym zaszła zmiana jego zapełnienia (zbiornik lub przedział ładunkowy), należy opróżnić obliczeniowo z tego, co się w nim początkowo znajdowało, a następnie napełnić do stanu końcowego.

Przykład takiej korekty stanu załadowania statku, w celu uzupełnienia zapasów paliwa w zbiornikach i częściowego wyładunku jednej ładowni, przedstawia tabela 12.

Przy zmianie stanu jednostki polegającej na umieszczeniu na ładunku, który był w przedziale, dodatkowego ładunku (o takim samym lub innym współczynniku sztauerskim), procedura obliczeniowa jest następująca: dla poziomu w przedziale, do którego sięga dolny ładunek, z właściwej dla typu górnego ładunku tablicy skalowania (ładunek masowy lub drobnica) należy odczytać objętość zajętej części przedziału. Dzieląc tę objętość przez

współczynnik sztauerski górnego ładunku, otrzymuje się jego obliczeniową (zastępczą) masę, która teoretycznie zastąpi dolny ładunek. Do tej masy dodaje się rzeczywistą masę górnego ładunku, przelicza się sumę tych mas na objętość, jaką miałyby górny ładunek, gdyby był tylko sam w przedziale i z tablicy skalowania dla typu górnego ładunku odczytuje się: górny poziom zapełnienia przedziału i odpowiadające temu poziomowi współrzędne środka objętości. Łączną masę (sumę masy rzeczywistej i zastępczej) oraz współrzędne środka tej łącznej masy, równe współrzędnym środka objętości obu ładunków, wprowadza się do tabeli obliczeń masowych. Następnie usuwa się obliczeniową część górnego ładunku, która zastąpiła dolny ładunek w etapie wyznaczania współrzędnych – w tabelę obliczeń masowych tę zbyteczną, zastępczą masę górnego ładunku wprowadza się z ujemnym znakiem.

Tabela 12

Korekta stanu załadowania uniwersalnego drobnicowca
o nośności 13 600 t – zużycie części zapasów w czasie rejsu

Wyszczególnienie	Masa m [t]	Odcięta x [m]	Rzędna z [m]	Moment masy względem PR $m \cdot x$ [tm]	Moment masy względem PP $m \cdot z$ [tm]
Statek przed rejsem	17 116	68,75	8,59	1 176 725	1 470 26
Całkowite opróżnienie zbiornika 9 LB	-243	65,60	4,70	-15941	-1142
Stan końcowy zbiornika 9 LB	143	65,58	3,29	9378	470
Całkowite opróżnienie zbiornika 9 PB	-256	65,64	4,67	-16 804	-1196
Stan końcowy zbiornika 9 PB	156	65,60	3,31	10 234	516
Całkowite opróżnienie zbiornika 33 LB	-50	0,70	10,84	-35	-542
Stan końcowy zbiornika 33 LB	30	0,72	10,25	22	308
Całkowite opróżnienie zbiornika 33 PB	-50	0,70	10,84	-35	-542
Stan końcowy zbiornika 33 PB	20	0,74	9,91	15	198
Statek po rejsie	16 866	68,99	8,60	1 163 558	145 095

W czasie rejsu zużyto: po 100 t oleju opałowego z pełnych zbiorników 9 LB i PB,
20 t wody słodkiej z pełnego zbiornika 33 LB i 30 t z pełnego zbiornika 33 PB

Wyżej opisane skomplikowane procedury obliczeniowe przy: ładowaniu warstwowym oraz doładowywaniu, dopełnianiu i częściowym opróżnianiu przedziałów (zbiorników i przestrzeni ładunkowych) powinny być stosowane, gdyż w tablicach skalowania przedziałów statkowych ujęte są wyłącznie objętości i współrzędne środków objętości zajętych części przedziałów

w funkcji ich zapełnienia, **tylko od dna do określonej wysokości**. Wobec takich ograniczeń wspomnianych tablic środki objętości cieczy lub ładunków zaczynających się wyżej niż dno przedziału, należy wyznaczać opisanymi wyżej pośrednimi drogami. Środki mas pokrywają się ze środkami objętości wyłącznie dla jednorodnych ładunków, dlatego też przy warstwowym ładowaniu obliczeniowo trzeba zawsze doprowadzać do stanów zapełnienia przedziałów ładunkowych tylko jednym ładunkiem.

9. FIZYCZNE PODSTAWY PŁYWALNOŚCI STATKU NAWODNEGO

9.1. Typy obiektów pływających

Wszelkie obiekty pływające można podzielić na trzy podstawowe klasy pod względem ich kontaktu z wodą. Pierwszą klasę stanowią jednostki podwodne, całkowicie zanurzone w toni wodnej, przeznaczone do przemieszczania się lub do wykonywania określonych zadań w zanurzeniu. Drugą, najliczniejszą klasę obiektów pływających reprezentują jednostki nawodne (najczęściej statki), przystosowane konstrukcyjnie do poruszania się i wykonywania innych zadań w położeniu na granicy fazowej ciecz – gaz, jaką stanowi powierzchnia wody. Wreszcie trzecią klasę tworzą obiekty poruszające się nad powierzchnią wody, ale w tak małej od niej odległości, że nie można ich traktować jako obiektów latających. Do tej klasy należą **poduszkowce** i **ekranoplany**. O ile pierwsze z wymienionych rozpowszechniły się jako szybkie jednostki pasażerskie i militarne, to ekranoplany nie znalazły, jak dotąd, praktycznego zastosowania, ich wykorzystanie w żegludze nie wyszło poza zakres prac studialnych. Zarówno jednostki podwodne, jak i nadwodne, gdy nie są w ruchu, znajdują się w stadium jednostek nawodnych – jest to postój przy nabrzeżu, związany z załadunkiem (przyjęciem, zdaniem pasażerów), uzupełnieniem zapasów, remontem lub czasowym wyłączeniem z eksploatacji. Poniżej przedstawiono wyłącznie zagadnienia związane z pływalnością statków nawodnych.

9.2. Prawa mechaniki w pływaniu statków nawodnych

Zachowanie się statków nawodnych w trakcie ich pływania można opisać prawami: powszechnego ciążenia, mechaniki klasycznej i hydromechaniki. Pierwsze z wymienionych praw – **prawo powszechnego ciążenia** dotyczy

wszystkich obiektów fizycznych mających masę. W polu grawitacyjnym Ziemi są one przyciągane w kierunku jej środka z siłą, zwaną **siłą ciężkości**, **ciężarem** lub **wagą**. Wielkość tej siły wynosi:

$$Q = m \cdot g \text{ [kN]},$$

gdzie:

m – masa obiektu [t],

$g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie.

Zachowanie się ciał pod wpływem sił opisują prawa mechaniki, popularnie określane jako **prawa Newtona**. Zostały one sformułowane dla tzw. punktów materialnych, czyli hipotetycznych tworów obdarzonych masą, ale niemających wymiarów. Rzeczywiste ciała fizyczne, w tym również statki, mają niezerowe wymiary, są więc obiektami materialnymi o określonej masie, zajmującymi pewną część przestrzeni. W odniesieniu do takich ciał, prawa Newtona muszą być uzupełnione dodatkowymi warunkami, które przedstawiono przy omawianiu poszczególnych praw.

Położenie statków nawodnych względem powierzchni wody, ale również położenie jednostek podwodnych w toni wodnej, określa się za pomocą podstawowego prawa hydrostatyki znanego jako **prawo Archimidesa**. Natomiast ruch jednostek nawodnych i podwodnych względem wody regulują **prawa hydrodynamiki**.

Pierwsze prawo Newtona opisuje zachowanie się punktu materialnego przy braku sił oddziałujących lub w warunkach całkowitego zrównoważenia wszystkich, działających na ten punkt, sił. Punkt pozostaje wówczas w spoczynku względem otaczającej go przestrzeni lub porusza się w niej ruchem jednostajnym prostoliniowym. Na nieporuszającym się statku nawodnym (również podwodnym), znajdującym się zawsze w polu grawitacyjnym Ziemi, zachodzi wyłącznie równowaga sił działających na statek.

9.3. Wypór ciała pływającego w cieczy

Siłą równoważącą siłę ciężkości statku jest reakcja hydrostatyczna wody na zanurzony w niej obiekt, zwana **wyporem**. Wielkość tego wyporu wynika z prawa sformułowanego przez Archimidesa. Znaczenie jego odkrycia polega nie na tym, że zauważył pozorny spadek ciężaru ciała (własnego – według legendy) zanurzonego w wodzie, ale na ilościowym określeniu tego spadku. Wynik tego prawdopodobnie pierwszego, zarejestrowanego w dziejach nauki, eksperymentu jest powszechnie znany – **ciało zanurzone w cieczy traci na swym ciężarze tyle, ile waży ciecz wyparta przez to ciało**. Wspomniany wyżej wypór statku stanowi właśnie ciężar cieczy wypartej przez kadłub statku.

Z punktu widzenia fizyki wypór ciała zanurzonego całkowicie lub częściowo w cieczy jest wypadkową reakcji cieczy na zewnętrzną powierzchnię ciała, czyli jej parcia hydrostatycznego. Wypór może wystąpić wyłącznie na obiektach mających niezerowe wymiary zewnętrzne, czyli mających pewną objętość – wypór punktu materialnego, występującego w prawach Newtona, jest równy zero. Prawo Archimedesza pozwala na proste wyznaczenie wyporu ciała – zamiast pracochłonnego wyznaczania wypadkowej z sił parcia hydrostatycznego cieczy na powierzchnię ciała wystarczy wyznaczyć ciężar cieczy wypartej przez to ciało:

$$W = V \cdot \gamma = V \cdot \rho \cdot g$$

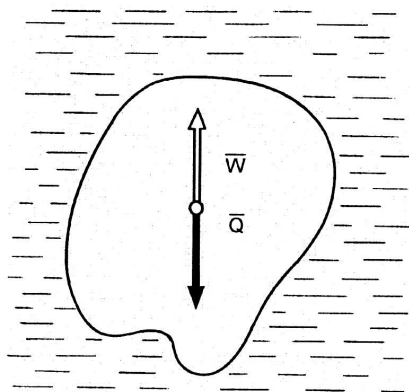
gdzie:

V – objętość ciała zanurzonego w cieczy lub objętość części zanurzonej ciała pływającego po powierzchni cieczy,

$\gamma = \rho \cdot g$ – ciężar właściwy cieczy,

ρ – gęstość cieczy.

Wyznaczony w powyższy sposób wypór ciała jest siłą równoważącą jego ciężar (rys. 40). Zachodzi to w zgodzie z trzecim prawem Newtona – ciężar ciała pogrążonego w cieczy wywołuje w niej reakcję, ciecz stara się wypchnąć to ciało ze swojej objętości.



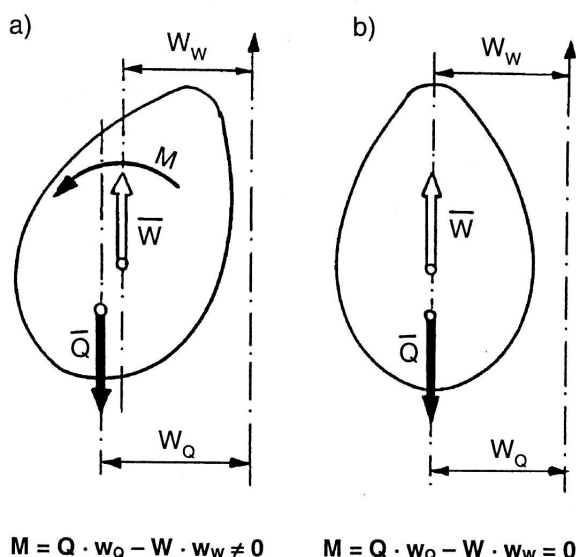
Rys. 40. Ciężar ciała zanurzonego w cieczy równoważony jego wyporem

9.4. Warunki równowagi sił działających na pływające w cieczy ciało

Aby ciało zanurzone w cieczy lub pływające po jej powierzchni, pozostawało w spoczynku, prócz równoważenia się wyporu ciała z jego ciężarem, konieczny jest również dodatkowy warunek występujący wyłącznie

dla obiektów o niezerowych wymiarach – wektory sił wyporu i ciężaru muszą leżeć na jednej linii. Jeżeli tak nie jest – (linia działania siły wyporu nie pokrywa się z linią działania siły ciężkości), na ciało działa moment pary sił ciężar – wypór, powodujący obrót ciała, czyli jego ruch w kierunku działania niezerownoważonego momentu.

Taki stan przedstawia rysunek 41a. Ciało będzie się obracało tak długo, aż wektory obu sił pokryją się – rysunek 41b. Ostatecznie więc pierwsze prawo Newtona dla obiektów materialnych o niezerowych wymiarach, czyli dla rzeczywistych ciał, należy uzupełnić dodatkowym warunkiem. Nie tylko siły działające na ciało powinny się równoważyć, ale także **wypadkowa suma momentów statycznych sił względem dowolnego punktu w przestrzeni musi być równa zero.**



Rys. 41. Stany ciała zanurzonego w cieczy: a) stan braku równowagi – linie działania ciężaru i wyporu nie pokrywają się, b) stan równowagi ciała – wektory ciężaru i wyporu leżą na jednej linii

Dla ciał pływających w cieczy lub po jej powierzchni, takich jak statki podwodne i nawodne, nie wystarczy ustalenie wielkości sił wyporu i ciężaru, wymagane jest również wyznaczenie położenia linii działania tych sił. Siła ciężkości ciała przechodzi zawsze, niezależnie od jego położenia w przestrzeni, przez punkt określany jako **środek ciężkości ciała**. Dla ciał znajdujących się w potencjalnym polu sił, a takim jest pole grawitacyjne Ziemi, środek ciężkości ciała pokrywa się z jego środkiem masy.

Wyznaczanie współrzędnych środka masy statku przedstawiono w rozdziale 8.

Linia działania wyporu ciała przechodzi przez **środek wyporu**, który pokrywa się ze **środkiem objętości ciała zanurzonego w cieczy** lub środkiem objętości zanurzonej w cieczy części ciała pływającego po jej powierzchni.

Podsumowując, warunek pozostawiania ciała w cieczy lub na jej powierzchni w spoczynku, zgodnie z rozszerzonym na obiekty materialne pierwszym prawem Newtona, wymaga równoważenia się sił i ich statycznych momentów. To drugie zachodzi wyłącznie przy pokrywaniu się linii działania siły wyporu i ciężaru.

W wypadkach braku równowagi sił lub ich statycznych momentów, działających na ciało zanurzone w cieczy lub pływające po jej powierzchni, to ciało porusza się zgodnie z drugim prawem Newtona, ruchem niejednostajnym przyspieszonym w kierunku wypadkowej z sił lub z momentów statycznych sił. Może to być ruch prostoliniowy, gdy na ciało działa niezerowa wypadkowa siła, lub obrotowy w razie oddziaływania niezerowego momentu sił. Ten ruch trwa tak długo, aż nastąpi przyrost siły reakcji cieczy lub momentu statycznego tej reakcji do wartości równych sile lub momentowi siły wymuszających ruch ciała. Nastąpi wówczas nowy stan równowagi sił i momentów statycznych sił na ciele pływającym w cieczy w innym położeniu niż początkowe.

Ciało pływające w cieczy (lub na jej powierzchni) może znajdować się w spoczynku (w równowadze) albo poruszać się ruchem niejednostajnym z przyspieszeniem wynikającym z drugiego prawa Newtona:

$$F = m \cdot a,$$

$$M = I_M \cdot \varepsilon,$$

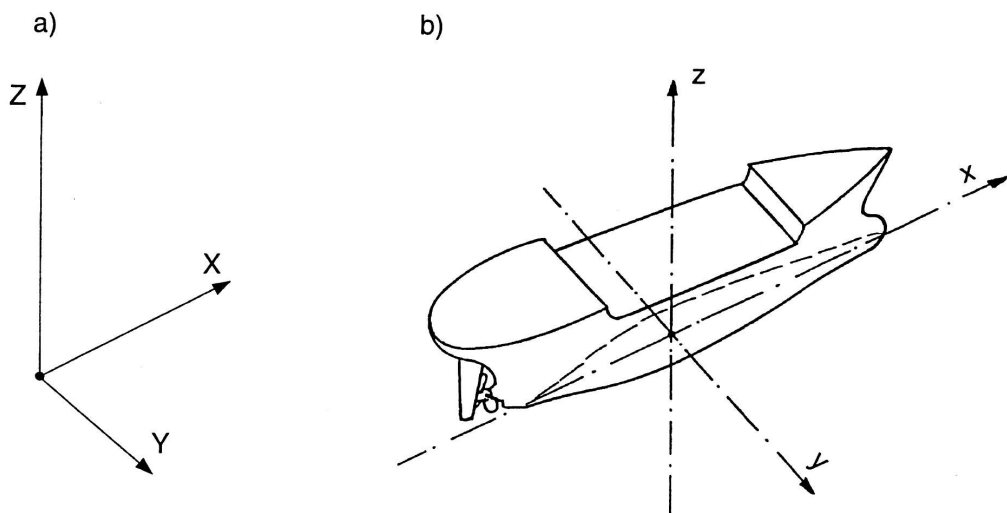
gdzie:

- F** – wypadkowa z sił działających na ciało,
- M** – moment statyczny wypadkowej z sił działających na ciało,
- m** – masa ciała,
- I_M** – moment bezwładności masy ciała,
- a** – przyspieszenie styczne ruchu liniowego ciała w kierunku działania siły **F**,
- ε** – przyspieszenie normalne ruchu obrotowego ciała w kierunku zgodnym z kierunkiem działania wypadkowego momentu **M**.

Na potrzeby analizy stanu spoczynku lub ruchu ciała pływającego w cieczy najdogodniej jest wprowadzić kartezjański układ współrzędnych prostokątnych. Wówczas w każdym z trzech głównych kierunków wyznacza się składowe wypadkowych sił lub statycznych momentów sił występujących na badanym ciele oraz ustala się składowe kierunkowe przyspieszeń stycznych i normalnych, jeżeli wypadkowe siły i momenty są niezerowe. Gdy we wszystkich głównych kierunkach składowe wypadkowych sił i ich momentów statycznych są równe zeru, ciało w cieczy (lub na jej powierzchni) znajduje się w statycznej równowadze.

Na rysunku 42 pokazane są dwa układy współrzędnych kartezjańskich, wykorzystywane do analizy zachowania się ciał pływających – nieruchomy i związany z ciałem. Pierwszy z nich stosuje się, gdy należy wyznaczyć drogę

i ogólny wektor ruchu pływającego ciała względem otaczającej go nieruchomej cieczy, natomiast drugi, związany z ciałem układ współrzędnych, używany jest do wyznaczania reakcji ciała na siły zewnętrzne i ich momenty.



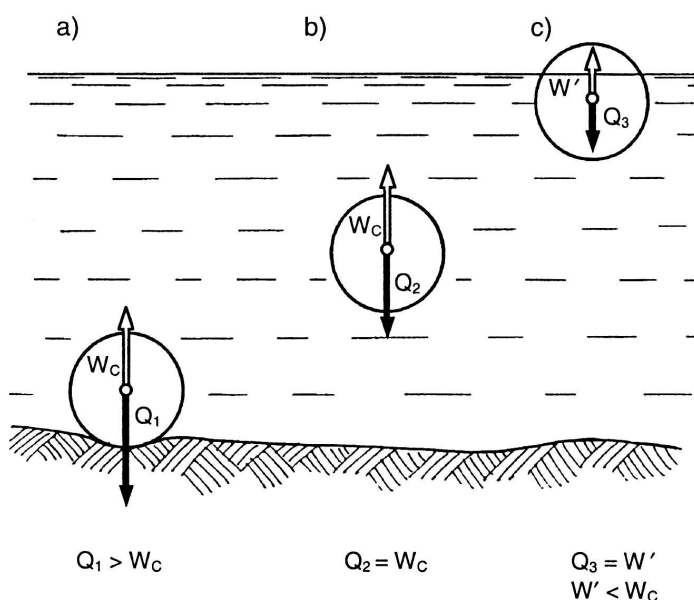
Rys. 42. Układy współrzędnych prostokątnych: a) nieruchomy układ współrzędnych stosowany do opisu położenia statku, b) ruchomy układ współrzędnych związany ze statkiem

Opisane wyżej prawa mechaniki klasycznej i prawo Archimedesesa pozwalają w łatwy sposób wyznaczyć zachowanie się dowolnego ciała w cieczy. W zależności od relacji między ciężarem ciała i reakcją cieczy na to zanurzone w niej ciało, mogą wystąpić trzy możliwości. Gdy objętość ciała jest mała, ciężar cieczy wypartej przez ciało, czyli wypór, nie zrównoważy ciężaru ciała i pod wpływem niezerowej i skierowanej w dół wypadkowej z sił ciężar – wypór, ciało to ruchem przyspieszonym opadnie na dno zbiornika cieczy. W tym położeniu ciało będzie w równowadze, a jego nacisk na dno zbiornika, równy ciężarowi ciała pomniejszonemu o jego wypór, jest zrównoważony reakcją gruntu dna, co przedstawia rysunek 43a.

Gdy wypór ciała jest dokładnie równy jego ciężarowi, ciało pozostanie w całkowitym zanurzeniu, a w cieczy izobarycznej, której gęstość nie zmienia się z głębokością, ciało będzie mogło znajdować się na dowolnej głębokości pod warunkiem, że objętość ciała nie zmienia się pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego cieczy. Ten przypadek, typowy dla jednostek podwodnych, pokazany jest na rysunku 43b.

Jeśli zaś wypór całkowicie zanurzonego w cieczy ciała przewyższa jego ciężar, ciało to będzie poruszać się w górę, pod wpływem nie zrównoważonej nadwyżki wyporu. Po dojściu do powierzchni cieczy jego wynurzenie będzie trwało nadal, aż siła wyporu zanurzonej części ciała zmniejszy się do wartości odpowiadającej ciężarowi ciała. W tym położeniu ciało, jako częściowo zanurzone, pozostanie w spoczynku.

Tego typu możliwość prezentuje rysunek 43c – jest to rodzaj równowagi, jaki zachodzi na statkach nawodnych.



Rys. 43. Stany pływania ciała w cieczy: a) ciężar ciała jest większy od jego wyporu – ciało osiada na dnie zbiornika cieczy, b) ciężar ciała jest równy jego wyporowi – ciało pływa w całkowitym zanurzeniu, c) ciężar ciała jest mniejszy od jego całkowitego wyporu – ciało pływa na powierzchni cieczy

9.5. Pływanie statków nawodnych i nadwodnych

Warunkiem podstawowym, jaki musi być spełniony na statkach nawodnych (wobec ciał pływających na powierzchni cieczy), jest nadwyżka jego całkowitego wyporu (wyznaczonego w całkowitym zanurzeniu) nad ciężarem. Zjawisko to szerzej opisano w dalszej części skryptu.

W wypadku jednostek nadwodnych (**poduszkowców i ekranoplanów**) siła ciężkości tych obiektów równoważona jest aerodynamiczną siłą nośną, wytworzoną nadwyżką ciśnienia powietrza pod dnem jednostki w odniesieniu do ciśnienia występującego nad jednostką. Taka różnica ciśnień może być wytworzona pracą wentylatorów (poduszkowiec) lub szybkim ruchem jednostki z odpowiednio nachylonym nad powierzchnią wody dnem (ekranoplan).

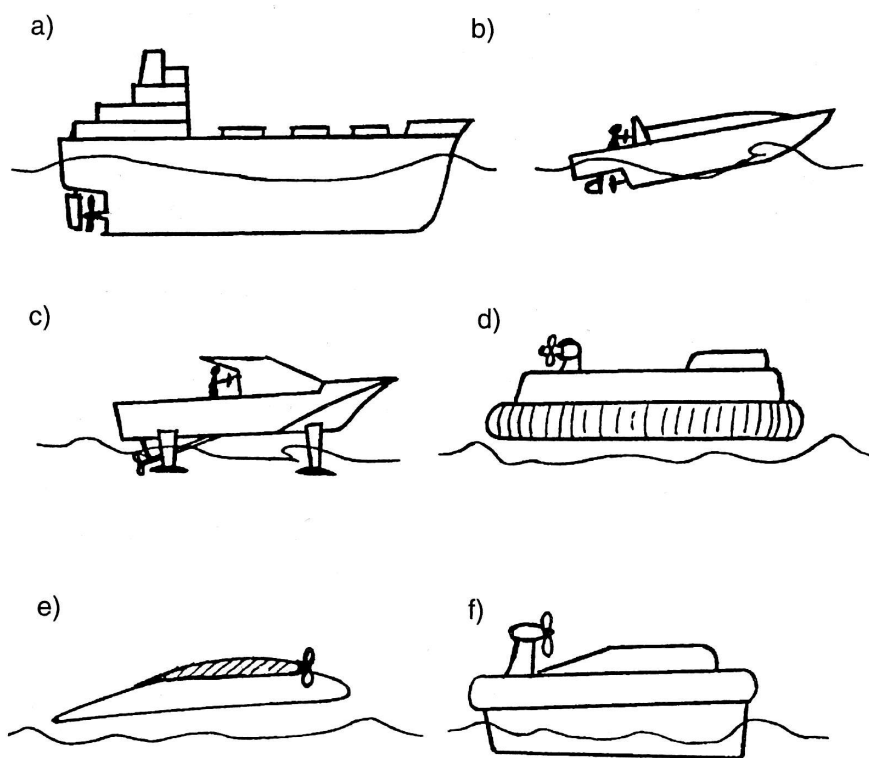
Na zakończenie prezentacji warunków równowagi obiektów nawodnych, podwodnych i nadwodnych należy wspomnieć również o oddzielnej klasie jednostek nawodnych, które w trakcie pływania (ruchu po powierzchni wody) znajdują się w innym stanie równowagi niż w trakcie spoczynku. Są to jednostki z **hydrodynamicznym wyporem**. Zalicza się do nich **ślizgacze** – niewielkie łodzie lub statki o nachylonym skośnie względem kierunku

płynięcia dnie, na którym podczas ruchu z dużą prędkością powstaje hydrodynamiczna siła nośna, wynurzająca kadłub jednostki częściowo z wody. Innym typem jednostek z hydrodynamicznym wyporem są **wodoloty**. Umieszczone pod kadłubem wodolotu skrzydła nośne w trakcie ruchu postępowego jednostki wytwarzają hydrodynamiczną siłę nośną, wynoszącą całkowicie kadłub wodolotu ponad powierzchnię wody.

Obiektami pośrednimi pomiędzy jednostkami nawodnymi i nadwodnymi są **bocznościany**. Są to poduszkowce wyposażone w boczne osłony, które w trakcie pływania sięgają zawsze poniżej powierzchni wody. Aerodynamiczna siła nośna, wytwarzana pracą wentylatora, dzięki obecności osłon osiąga wyższą wartość niż na klasycznym poduszkowcu bez osłon. Dzięki temu bocznosciany zużywają mniej energii do unoszenia się nad wodę.

Jednostki nadwodne (poduszkowiec i ekranoplan), nawodne z hydrodynamicznym wyporem (ślizgacz i wodolot) oraz bocznoscian przedstawiono na rysunku 44.

W dalszych rozdziałach skryptu omówiono wyłącznie jednostki nawodne.



Rys. 44. Jednostki pływające nawodne i nadwodne: a) statek nawodny, ze statycznym wyporem, b) ślizgacz z hydrodynamicznym wyporem, c) wodolot z hydrodynamicznym wyporem, powstającym na płatach nośnych, d) poduszkowiec, e) ekranoplan, f) bocznoscian – poduszkowiec z bocznymi sztywnymi ścianami

10. PŁYWALNOŚĆ STATKU I WYMAGANY ZAPAS PŁYWALNOŚCI

10.1. Stany równowagi ciał pływających w cieczy

Dowolne ciało w przestrzeni, nieograniczone żadnymi zewnętrznymi więzami krępującymi jego ruch, ma możliwość ruchu w sześciu kierunkach. Są to trzy ruchy liniowe w kierunkach równoległych do głównych osi prostokątnego układu współrzędnych (opisującego przestrzeń lub związanego z ciałem) oraz trzy ruchy obrotowe względem tych osi. Takie ciało ma sześć stopni swobody ruchu. Dowolny jednorodny obiekt zanurzony w toni wodnej jest przykładem tego typu ciała. Jednak już na przykład okręt podwodny nie może dowolnie obracać się wokół swojej wzdłużnej i poprzecznej osi, powinien mieć w tych kierunkach ograniczone możliwości obrotów, ma więc cztery stopnie swobody ruchu. Statek nawodny, skrępowany więzami, którymi jest woda otaczająca podwodną część jego kadłuba, może w sposób nieograniczony poruszać się jedynie w trzech kierunkach. Dla prostokątnego układu współrzędnych związanego ze statkiem (rys. 11) są to ruchy: wzdłuż osi $x-x$, wzdłuż osi $y-y$ oraz wokół osi $z-z$. Statek nawodny ma więc trzy stopnie swobody ruchu. Ruchy w pozostałych trzech kierunkach: wzdłuż osi $z-z$, wokół osi $x-x$ i wokół osi $y-y$ są ograniczone i zależą od reakcji wody otaczającej kadłub statku. W odniesieniu do tych trzech ruchów przeprowadza się analizę stanów równowagi statku.

Każdy obiekt fizyczny (w tym także statek), będący w stanie spoczynku w wyniku reakcji zewnętrznych więzów, znajduje się w jednym z trzech stanów równowagi. Są to stany: równowagi chwiejnej, równowagi obojętnej i równowagi stałej. Badanie równowagi dowolnego ciała fizycznego przeprowadza się (teoretycznie i doświadczalnie) poprzez obserwację skutków działania zewnętrznych wymuszeń (zakłóceń) na zachowanie się tego ciała. Podobnie czyni się ze statkiem, przykładem do niego zewnętrzne wymuszenia (siły lub momenty zmieniające jego położenie) i obserwuje skutki działania tych wymuszeń. Przyjmuje się, że w położeniu spoczynkowym statek ma określoną i niezerową energię położenia (energię potencjalną). Jeżeli więc statek, wytrącony przez czynnik zakłócający ze swojego położenia spoczynkowego, przejdzie w nowe położenie, w którym jego energia potencjalna jest niższa niż w położeniu początkowym, to samorzutnie nie wróci już do poprzedniego położenia, gdyż wymaga to wykonania pracy, czyli dostarczenia energii z zewnątrz. Taki statek znajduje się w **równowadze chwiejnej**. W wypadku gdy jego wytrącenie z położenia spoczynku nie zmienia energii potencjalnej, każde nowe położenie jest równoważne początkowemu, taki stan jednostki określany jest mianem **równowagi obojętnej**. Jeśli wytrącenie z położenia

spoczynku wymaga wykonania pracy, gdyż nowe położenie statku charakteryzuje się wyższą energią potencjalną niż początkowe, to mamy do czynienia z **równowagą stałą** jednostki – po zaprzestaniu działania zewnętrznego zakłócenia statek wróci samorzutnie do pierwotnego położenia.

10.2. Stany równowagi statku nawodnego

Równowaga statku nawodnego w kierunku osi **z-z** decyduje o jego pływerności – ta cecha opisana jest w dalszej części tego rozdziału. Pozostałe dwa stany równowagi (obroty wokół osi **x-x** i **y-y**) określa poprzeczna i wzdłużna stateczność statku – zagadnienia związane ze statecznością przedstawione są w następnym rozdziale.

Analiza pływerności statku nawodnego sprowadza się do badania warunków równowagi sił działających na jednostkę w kierunku pionowym i równowagi momentów statycznych tych sił względem dowolnej pionowej osi **z'-z'** (rys. 45). Równania sił i momentów sił względem osi **z'-z'** są następujące:

$$\begin{aligned}\sum F_z &= Q - W(T) = 0, \\ \sum M_x &= Q \cdot x_Q - W(T) \cdot x_w = 0, \\ \sum M_y &= Q \cdot y_Q - W(T) \cdot y_w = 0,\end{aligned}$$

gdzie:

- x_Q – składowa odległości linii działania siły ciężkości od osi **z'-z'**, odmierzana wzdłuż osi **x-x**,
- y_Q – składowa odległości linii działania siły ciężkości od osi **z'-z'**, odmierzana wzdłuż osi **y-y**,
- x_w – składowa odległości linii działania siły wyporu od osi **z'-z'**, odmierzana wzdłuż osi **x-x**,
- y_w – składowa odległości linii działania siły wyporu od osi **z'-z'**, odmierzana wzdłuż osi **y-y**.

Z pierwszego równania (równowagi sił) wynika, że liczbowe wartości (moduły) wektorów ciężkości i wyporu są sobie równe:

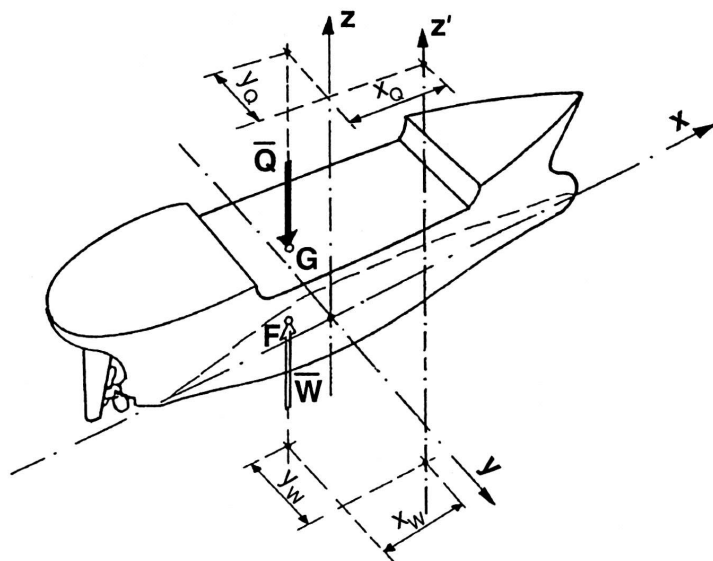
$$W(T) = Q,$$

stąd sumy momentów statycznych tych sił będą równe zeru, gdy odcięte i współrzędne poprzeczne ich linii działania będą sobie równe:

$$x_w = x_Q \quad \text{ i } \quad y_w = y_Q.$$

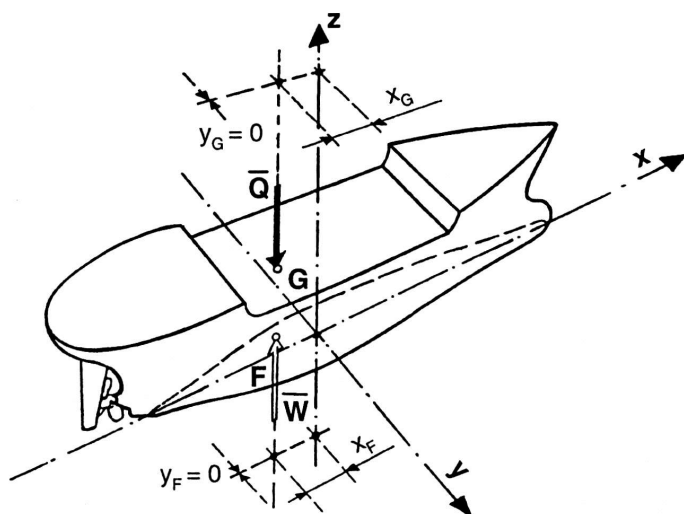
To zaś oznacza, że **linie działania siły wyporu i siły ciężkości pokrywają się**. Należy zaznaczyć, że na każdej jednostce pływającej (również i na obiektach

podwodnych), w każdym stanie: eksploatacyjnym czy awaryjnym, zachodzi powyższy warunek.



Rys. 45. Badanie warunku równowagi sił i momentów sił działających na statek nawodny: $z-z$ – pionowa oś układu współrzędnych prostokątnych związanych ze statkiem, $z'-z'$ – dowolna pionowa oś, x_0 , y_0 – współrzędne linii działania wektora siły ciężkości, wyznaczone względem osi $z'-z'$, x_W , y_W – współrzędne linii działania wektora wyporu, wyznaczone względem osi $z'-z'$

Gdy oś $z'-z'$ pokrywa się z osią $z-z$, przechodzącą przez linię przecinania się płaszczyzny symetrii z płaszczyzną owręża (rys. 46), składowe odległości wektorów sił wyporu i ciężkości statku pokrywają się ze współrzędnymi linii



Rys. 46. Wyznaczanie współrzędnych linii działania siły ciężkości i wyporu dla prostokątnego układu współrzędnych związanego ze statkiem: x_G , y_G – współrzędne linii działania wektora siły ciężkości, równe współrzędnym środka masy statku, x_F , y_F – współrzędne linii działania wektora wyporu, równe współrzędnym środka objętości podwodnej części kadłuba

działania tych sił: odciętą i współrzędną poprzeczną wyporu (x_F i y_F), oraz odciętą i współrzędną środka ciężkości (środka masy) statku (x_G i y_G). Warunek równowagi momentów sił działających na statek sprowadza się do warunku równości odciętych i współrzędnych poprzecznych obydwu sił:

$$x_F = x_G \quad \text{i} \quad y_F = y_G.$$

Stan równowagi stałej w kierunku pionowym na statku nawodnym można przeanalizować na podstawie rysunku 47. W początkowym położeniu jednostki (rys. 47a) dla ciężaru Q_1 jej wypór jest równy W_1 dla początkowego zanurzenia T_1 . Przyłożenie w tym kierunku zakłócenia, na przykład przyjęcie na statek dodatkowego ciężaru Δq , powoduje, że wypadkowa z sił ciężkości i wyporu nie jest równa zero:

$$\sum F_z = Q_1 + \Delta q - W(T_1) \neq 0.$$

Pod działaniem tej wypadkowej równej:

$$\sum F_z = Q_1 + \Delta q - W(T_1) = \Delta q,$$

statek zgodnie z drugim prawem Newtona porusza się ruchem prostoliniowym przyspieszonym w kierunku tej wypadkowej, czyli głębiej się zanurza (rys. 47b). Jego zanurzanie się trwa tak długo, aż wzrost zanurzenia spowoduje wzrost wyporu jednostki. Gdy zanurzenie wzrośnie do wartości T_2 , któremu odpowiada wypór W_2 , spełniający warunek:

$$W_2(T) = Q_1 + \Delta q,$$

ruch statku w dół zostaje wyhamowany i statek zatrzymuje się w nowym położeniu równowagi (rys. 47c).

Podobnie statek zachowuje się przy zmniejszeniu swojego ciężaru (np. skutek wyładunku lub zużycia zapasów) – będzie się wynurzał do momentu, aż jego wypór przy mniejszym zanurzeniu będzie równy zredukowanemu ciężarowi.

W praktyce eksploatacyjnej wygodniej posługiwać się masami zamiast ciężarami. Masa statku jest równa jego ciężarowi podzielonemu przez przyspieszenie ziemskie:

$$m_{ST}[t] = \frac{Q[N]}{g[\frac{m}{s^2}]},$$