S/242/89 PG
zmiany do okł.
i str. tyt.

1990



UK S/272/89 PG str. red. 2 1:1

B-5
ZGPP

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTW POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Roman Kazimierczak

REDAKTOR SKRYPTÓW
Zdzisław Puhaczewski

RECENZENT
Mieczysław Krężelewski

Wydanie I – 1985 r.

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

PRINTED IN POLAND

Do nabycia: PP Dom Książki Nr 23 (Gmach Główny Politechniki Gdańskiej),
80-952 Gdańsk-Wrzeszcz, ul. Majakowskiego 11/12

610

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie II. Nakład 200+25+10+30 egz. Arkuszy wyd. 15,5. Arkuszy druku 15. Papier offsetowy kl. III 71 g. Przyjęto do druku 7.08.1989 r. Podpisano do druku 31.07.1990 r. Druk ukończono w październiku 1990 r. Zamówienie nr S/272/89. UG-445/5/89

Wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Poznańskiej
61-821 Poznań, ul. Ogrodowa 11, telefon 525-425

S/14/85 PG MS
S/272/88

SPIS TREŚCI

str.

PRZEDMOWA 7

1. WSTĘP 9
2. KSZTAŁT KADŁUBA OKRĘTU 12
   - 2.1. Pojęcia podstawowe 12
   - 2.2. Wymiary kadłuba okrętu 14
   - 2.3. Rysunek linii teoretycznych 16
   - 2.4. Stosunki wymiarów głównych i współczynniki pełnotliwości . 17
   - 2.5. Współczesne kształty statków morskich i metody projektowania 20
3. ELEMENTY GEOMETRYCZNE KADŁUBA OKRĘTU 29
   - 3.1. Obliczenie powierzchni 29
     - 3.1.1. Wzór Simpsona I 29
     - 3.1.2. Wzór Simpsona II 30
     - 3.1.3. Wzór trapezów 30
     - 3.1.4. Wzór Czebyszewa 30
     - 3.1.5. Zastosowania niektórych wzorów 31
   - 3.2. Obliczenie współrzędnych środka ciężkości pola 34
   - 3.3. Obliczenie momentów bezwładności pola 40
4. ELEMENTY HYDROSTATYCZNE KADŁUBA OKRĘTU 44
   - 4.1. Wyrażenia ogólne 44
   - 4.2. Obliczenia za pomocą pól wrężnicowych 44
   - 4.3. Skala Bonjeana 49
   - 4.4. Obliczenia za pomocą pól wodnicowych 50
   - 4.5. Obliczenia za pomocą pól wzdłużnicowych 53
   - 4.6. Obliczenie położenia środka wyporu za pomocą krzywej wyporności 56
   - 4.7. Wykres krzywych hydrostatycznych 58
   - 4.8. Sprawdzenie poprawności niektórych krzywych hydrostatycznych 60
   - 4.9. Wykres wielkości hydrostatycznych statku przegłębionego . 66

6. 11. 1984
B-5
33

	str.
5. PODSTAWY HYDROSTATYKI	69
5.1. Wielkości podstawowe	69
5.2. Równowaga cieczy	71
5.3. Reakcje hydrostatyczne na ściany płaskie	73
5.4. Reakcje hydrostatyczne na ściany zakrzywione	78
5.5. Reakcja hydrostatyczna na ciało pływające	80
6. PŁYWALNOŚĆ OKRĘTU	83
6.1. Warunki równowagi	83
6.2. Wpływ ładunku na zmianę zanurzenia okrętu	88
6.3. Wpływ gęstości wody na zanurzenie okrętu	90
6.4. Skala załadowania	93
6.5. Plan ładunkowy	95
7. STATECZNOŚĆ PODŁUŻNA OKRĘTU	98
7.1. Uwagi ogólne o stateczności okrętu	98
7.2. Moment prostujący	99
7.3. Wyznaczenie wodnicy równoobjętościowej	103
7.4. Obliczenie przegłębienia okrętu	106
7.5. Wpływ przyjęcia lub zdjęcia ładunku na zanurzenie dziobu i rufy	110
7.6. Wpływ ładunków ruchomych na przegłębienie okrętu	114
7.7. Reakcja na podpory podczas dokowania	116
8. STATECZNOŚĆ POPRZECZNA OKRĘTU	118
8.1. Moment prostujący	118
8.2. Wyznaczenie kąta przechyłu	123
8.3. Obliczenie ramion stateczności kształtu	126
8.4. Wpływ przemieszczenia ładunku na stateczność okrętu	134
8.5. Wpływ przyjęcia lub zdjęcia ładunku na stateczność	136
8.6. Ładunki ruchome	139
8.7. Okręt o burtach pionowych	144
8.8. Wpływ kształtu kadłuba na krzywą ramion prostujących	147
8.9. Krzywa ramion okrętu powinowatego	149
8.10. Krzywa ramion dla kąta większego od 90^{o}	151
8.11. Próba przechyłu	153
8.12. Stateczność dynamiczna okrętu	156
8.13. Obliczenie współrzędnych środka wyporu z pantokaren dla statku przechylonego	167
9. OCENA STATECZNOŚCI OKRĘTU W CZASIE EKSPLOATACJI	169
9.1. Uwagi ogólne	169
9.2. Kryteria statecznościowe IMO	170
9.3. Wolna burta	173
9.4. Oblodzenie statku	173
9.5. Wpływ wody na pokładzie	174
9.6. Stateczność na grzbiecie fali	175
9.7. Kryterium pogody Polskiego Rejestru Statków	177

6. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5 33/ Nr. 12

	str.
9.8. Informacja o stateczności dla kapitana	182
9.9. Uwagi końcowe	184
10. NIEZATAPIALNOŚĆ OKRĘTU	188
10.1. Wiadomości ogólne	188
10.2. Metoda przyjętego ciężaru i stałej wyporności	191
10.3. Zatopienie przedziału trzeciej kategorii	195
10.4. Krzywa grodziowa	206
10.5. Normowanie niezatapialności	209
11. WODOWANIE	212
11.1. Uwagi ogólne	212
11.2. Pochylnia, urządzenia spustowe i ich elementy	215
11.3. Statyczne obliczenia wodowania wzdłużnego	217
11.4. Dynamiczne obliczenia wodowania wzdłużnego	226
11.5. Wodowanie boczne	232
LITERATURA	237
Wykaz ważniejszych symboli i ich odpowiedników w literaturze międzynarodowej	239

~~S/411/85~~ PG MSY s. ~~6~~ 6 vacat

S/242/89

~~3774/85~~ PG MS s. ~~6~~ 7
~~5/972/83~~

PRZEDMOWA

„Wszyscy marynarze są potomkami tego żądnego przygód kudłatego przodka, co siadł okrakiem na bezkształtną kłodę i wiosłując koślawą gałęzią dokonał pierwszej przybrzeżnej podróży w osłoniętej zatoce rozbrzmiewającej pełnym zachwytu wyciem jego szczepu".

Skrypt przeznaczony jest dla studentów III roku Instytutu Okrętowego specjalności budowa okrętów. Zgodnie ze zmienionym programem studiów wprowadzony po raz pierwszy w roku akad. 1983/84 przedmiot STATYKA OKRĘTU obejmuje zagadnienia, które poprzednio wchodziły w skład Teorii okrętu lub Hydromechaniki ogólnej i okrętowej. Przedmiot jest adekwatny do swej nazwy, obejmuje problemy statyczne. Omówiono tu jednak zagadnienie znane w literaturze pod nazwą stateczności dynamicznej. Dla zrozumienia obecnie stosowanych metod obliczeń i związku ze statecznością okrętu podane zostały elementarne podstawy kołysania poprzecznego, lecz praktyczne wyznaczenie dynamicznego kąta przechyłu okrętu opiera się na zasadzie quasi-statycznej. Pewnym też odstępstwem od statyki jest wodowanie, lecz przede wszystkim poświęcono tu uwagę wodowaniu wzdłużnemu, którego podstawowe obliczenia opierają się także na zasadach statyki. Stąd działy te można włączyć do statyki okrętu.

Zagadnienia tu przedstawione obejmują głównie podstawy pływania okrętu. Są to bowiem wiadomości podstawowe, które musi znać doskonale każdy inżynier okrętowiec zatrudniony w biurze projektowym czy w produkcji w stoczni, jak również powinna je znać kadra oficerska zatrudniona na statkach. Jest to bowiem elementarz okrętowy. Materiał nie jest nadmiernie rozbudowany, zawiera bowiem tylko treść wykładu w wymiarze 3 godzin tygodniowo w jednym semestrze. Na końcu skryptu podana jest literatura, która została wykorzystana przy opracowywaniu tego wykładu, a która może dla dociekliwego czytelnika stanowić poszerzenie materiału. Dla lepszego zrozumienia niektórych rozważań wprowadzono szereg rozwiązanych przykładów, wskazując, że teoria ma tu charakter wybitnie utylitarny.

8. 11. 1984
B-5
33%

~~S/14/85~~ PG MS S/242/88

Autorem cytatów, otwierających poszczególne rozdziały jest niezrównany piewca ludzi morza i okrętu, autor „Zwierciadła Morza" - Joseph Conrad.

Serdeczne podziękowania należą się panu dr. inż. Maciejowi Pawłowskiemu za przeczytanie rękopisu, za dyskusje nad przedstawieniem pewnych zagadnień i za szereg uwag, z których skorzystałem przy przygotowaniu skryptu, a także paniom Teresie Witkowskiej za trud maszynopisania i Aleksandrze Kempińskiej za wykreślenie rysunków.

Szczególnie gorące podziękowania składam prof. Mieczysławowi Krężelewskiemu za bardzo przychylną i wnikliwą recenzję oraz za dostrzeżenie usterek, co umożliwiło dokonanie poprawek przed oddaniem skryptu do druku.

B. 11. 1984
B-5
33%

1. WSTĘP

„Ze wszystkich żywych stworzeń na lądzie i morzu tylko okrętów nie można nabrać na fałszywe pozory, tylko okręty nie zniosą partactwa ze strony swoich dowódców".

Przedmiot Statyka okrętu zajmuje się teoretycznymi podstawami pływania okrętu, a w szczególności warunkami równowagi i stateczności okrętu oraz wyznaczeniem wodnicy pływania w określonym stanie załadowania, także i po uszkodzeniu okrętu w wyniku zderzenia się z innym okrętem lub przeszkodą na torze wodnym. Rozpatruje się tu okręt tylko na wodzie spokojnej, w bezruchu, statycznie - stąd nazwa przedmiotu. Przedmiot ten jest częścią Teorii okrętu, której druga część to Dynamika okrętu. Z kolei ta druga część zajmuje się kołysaniami okrętu na fali, zwrotnością i sterownością okrętu oraz zagadnieniami napędowymi zapewniającymi ruch postępowy okrętu, co wiąże się z oporem kadłuba w wodzie i pędnikami wytwarzającymi odpowiednie siły napędzające.

W skład niniejszego wykładu wchodzi rozdział poświęcony wodowaniu okrętu. Z reguły dziedzina ta jest szeroko omawiana w Technologii okrętu, rozważania teoretyczne wchodzą jednak też w zakres Teorii okrętu. Wodowanie jest zjawiskiem dynamicznym, szczególnie wodowanie boczne, które łączy w sobie wiadomości dotyczące ruchu postępowego, oporu wody, stateczności i kołysań bocznych okrętu. Wodowanie wzdłużne, z wyjątkiem oceny prędkości okrętu przy schodzeniu z pochylni, oblicza się z dobrą dokładnością, wykorzystując zasady statyki okrętu. Główną uwagę poświęcono tu też wodowaniu wzdłużnemu, sygnalizując jedynie problemy, jakie mogą wystąpić przy wodowaniu bocznym, i dlatego włączono te zagadnienia do treści programu.

Do wykonania wszelkich obliczeń związanych ze statyką okrętu niezbędna jest znajomość kształtu kadłuba okrętu. Może on być przedstawiony w formie analitycznej lub wykreślnej. Wykreślne przedstawienie kształtu kadłuba wchodzi w skład Rysunku technicznego okrętowego, istnieje więc związek z tym przedmiotem. Podano jednak w skrypcie podstawowe informacje o

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

liniach teoretycznych, wymiarach głównych i parametrach liczbowych opisujących kształt kadłuba okrętu. Ponieważ kontury przekrojów kadłuba mają nieregularny kształt, a obliczać należy nie tylko ich pola, lecz i momenty statyczne i bezwładności tych pól, stąd szeroko stosuje się tu metody całkowania numerycznego, którym z kolei zajmuje się przedmiot Metody numeryczne. Niemniej podano w skrypcie krótkie podstawowe informacje o kilku metodach stosowanych w obliczeniach okrętowych.

Materiał zawarty w skrypcie dotyczy głównie rozpatrywania zmian warunków równowagi okrętu pod wpływem przyjęcia lub zdjęcia ładunku, tj. obliczenia zanurzenia dziobu i rufy okrętu oraz kąta przechyłu. Są to więc problemy dotyczące pływalności i stateczności okrętu. Te zagadnienia odgrywają dużą rolę podczas eksploatacji okrętu, gdyż statek towarowy pływa w różnych stanach załadowania. Statek może być pusty, bez ładunku, jest to tzw. stan balastowy, gdyż przyjęcie wówczas do zbiorników dna podwójnego określonej ilości wody balastowej zapewnia dopiero odpowiednią stateczność i możliwość pływania. Statek może być w pełni załadowany, występuje wówczas tzw. stan projektowy, gdyż statek jest projektowany na pełne zanurzenie. Może też wystąpić w czasie eksploatacji statku, w zależności od ilości ładunku, cały szereg stanów pośrednich. Odpowiednie rozmieszczenie ładunku ma zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo okrętu.

Statek rozpatruje się tu w sposób bardzo uproszczony. Rzeczywiste warunki na morzu są zupełnie inne. Lecz mimo to normowanie stateczności okrętu, poszukiwanie odpowiednich kryteriów stateczności w dalszym ciągu jeszcze opiera się na takich uproszczonych modelach obliczeniowych. Zastosowanie mają tu też pewne elementy stateczności dynamicznej, polegające na wprowadzeniu pojęcia pracy momentu wyprostowującego. Przedmiot ten zajmuje się także zagadnieniami pływalności i stateczności awaryjnej, z czym związane jest zaprojektowanie takiego ustawienia grodzi wodoszczelnych i w takiej ilości, aby statek po kolizji mógł utrzymać się na wodzie. Wymienione tu zagadnienia związane z pływalnością, statecznością i niezatapialnością oraz podziałem przestrzennym kadłuba mają także podstawowe znaczenie i w Projektowaniu okrętu.

Jak widać z przedstawionej treści wykładu, na czoło wysuwa się stateczność okrętu. Statecznością okrętu zajmowano się od dawna, gdyż musiano znać pewne zasady, bo statki budowano już w przeszłości i pływały one w różnych warunkach. Pierwsza znana praca P. Bouguera, w której zdefiniowano promień metacentryczny jako stosunek momentu bezwładności pola wodnicy do objętości kadłuba zanurzonego w wodzie i gdzie za miarę stateczności przyjęto wysokość metacentryczną, pochodzi z 1746 r. Pół wieku później E.L. Atwood podał wzór na obliczenie ramienia prostującego, które to ramię jest uznaną miarą stateczności do dnia dzisiejszego. W roku 1850 C. Moseley przedstawił ideę stateczności dynamicznej. Według niego praca, jaką wykona statek pod działaniem sił potencjalnych - siły wyporu i siły ciężkości - równoważna jest polu pod krzywą momentu prostującego. Była to pierwsza próba odniesienia stateczności statku do jego kołysań. W 1904 r. A. Scribanti podał wyrażenie na ramię prostujące dla

8. 11. 1984
B-5
33%

statków o burtach pionowych. W r. 1939 J. Rahola przedstawił propozycję kryteriów statecznościowych w oparciu o krzywą ramion prostujących. Zmianami momentu prostującego na morzu zajmowało się wielu ludzi. W 1953 r. O. Grim i w 1954 r. K. Wendel przedstawili skutki zmian momentu prostującego w funkcji czasu podczas ruchu statku na fali. Punktem zwrotnym w rozpatrywaniu ruchów okrętu na fali była opublikowana w roku 1953 praca M.St. Denisa i W.J. Piersona, w której autorzy zaprezentowali statystyczne podejście do analizy ruchów okrętu na wzburzonym morzu [1]. Od roku 1962 do badań nad bezpieczeństwem statecznościowym czynnie włączyła się Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO), formułując własne kryteria statecznościowe. Prace nad bezpieczeństwem statku nie ustają. Pojawiają się wciąż nowe propozycje i nowe modele obliczeniowe, zdecydowanie wykraczając poza statykę okrętu. Dąży się do takiego opisu matematycznego zjawiska, który by w sposób możliwie pełny ujmował warunki, w jakich okręt może się znaleźć w ciągu całego swojego pracowitego żywota, uwzględniając wszystkie czynniki, które mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo okrętu. Aby jednak formułować i rozwiązywać bardziej skomplikowane sytuacje z uwzględnieniem efektów dynamicznych, należy mieć dobrze opanowane podstawy, które daje Statyka okrętu. Takie proste metody oddają nieocenione usługi w praktyce.

Nie można mówić o statkach dobrych i złych, choć istnieją statki o lepszej i gorszej stateczności. Nie można pomijać tu czynnika ludzkiego. Panuje przekonanie, że na morzu przewrócić można każdy statek. Z drugiej strony statek statecznościowo słabszy, w rękach dobrego kapitana będzie eksploatowany przez wiele, wiele lat. Dałoby się uniknąć wielu wypadków na morzu, gdyby załogi miały odpowiednie kwalifikacje, odpowiednie wiadomości o stateczności okrętu. Nie byłoby m.in. wypadku m/s „Kudowa Zdrój" w 1983 r. Zdarzają się jednak przewrócenia i w basenach portowych przy spokojnej wodzie. Tak przewrócił się w 1964 r. trawler przetwórnia m/t „Foka" w basenie stoczni Komuny Paryskiej w Gdyni na krótko przed oddaniem go do eksploatacji. W roku 1982 w porcie Ystad na skutek niesprawnego urządzenia do wyrównywania przechyłu przy czynnościach ładunkowych utracił stateczność i przewrócił się morski prom m/f „Jan Heweliusz". Często zawodzi wyobraźnia ludzka, częsty jest brak doświadczenia i umiejętności wykonania prostych przeliczeń. Życie partactwa nie lubi, a na morzu skutki tego są tragiczne. Dlatego podstawowe informacje o pływalności i stateczności okrętu muszą tkwić w umysłach ludzi morza.

Projektujmy więc i budujmy bezpieczne statki zdolne wypełniać swoje funkcje. Ale to nie wszystko. Musimy je jeszcze umiejętnie eksploatować. Nie tylko właściwie rozmieszczać ładunek i starannie go mocować, lecz dobrze prowadzić statek po morzach i oceanach świata, po wodach przybrzeżnych, wąskich przesmykach i akwenach portowych. Do tego wszystkiego konieczna jest wiedza i doświadczenie, poczucie odpowiedzialności i przytomna głowa. Wtedy morze przestanie być Okrutnym Morzem.

B-5
33%

2. KSZTAŁT KADŁUBA OKRĘTU

„Na pierwszy rzut oka poznałem, że mam przed sobą pierwszorzędny statek, istotę harmonijną w każdym calu, o przepysznych proporcjach".

2.1. Pojęcia podstawowe

Podstawą wszelkich obliczeń z zakresu STATYKI OKRĘTU jest kształt kadłuba okrętu. Kształt ten przedstawić można:

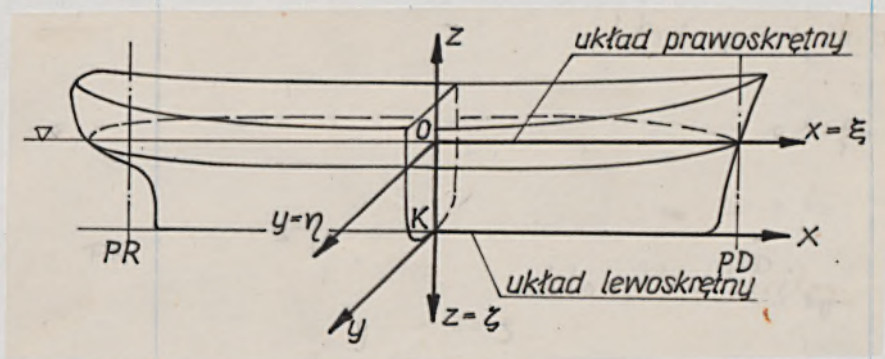
- równaniami odpowiednich przekrojów kadłuba lub całych płaszczyzn,
- tabelą rzędnych,
- rysunkiem linii teoretycznych.

Ponieważ wszelkie obliczenia projektowe, jak również obliczenia związane z przygotowaniem dokumentacji okrętowej, wykonywane są techniką komputerową, bardzo wygodna jest forma równań jako aproksymacja poszczególnych przekrojów czy obrysu kadłuba. Równania takie ułatwiają wykonanie wszelkich obliczeń związanych z kształtem kadłuba. Przedstawienie kształtu równaniami znajduje coraz szersze zastosowanie w pracach naukowo-badawczych, mniejsze znaczenie odgrywa jeszcze w pracach biura projektowego. Często kształt kadłuba przedstawiony jest za pomocą tabeli rzędnych, gdzie ujęte są np. przekroje poprzeczne, wznios pokładu, wypukłość pokładu czy zarys dziobu i rufy. Ten sposób jest bardzo wygodny szczególnie do wczytania tych wartości przez maszynę cyfrową w celu dokonania wszystkich koniecznych obliczeń, wg określonych programów. Podstawą jednak, zarówno równań, jak i tabeli rzędnych, jest rysunek kształtu kadłuba w postaci szeregu przekrojów. Jest to najstarszy sposób przedstawiania kształtu kadłuba, aczkolwiek zaczyna być wypierany przez technikę komputerową, wykorzystującą monitory i maszyny kreślące. Rysunek taki jest podstawą wszelkich udoskonaleń kształtu kadłuba, bardzo często służy do budowy statku w skali naturalnej lub do budowy jego modelu, aby prowadzić dalsze badania konieczne do prognozy przyszłych osiągów. Rysunek kształtu kadłuba jest wykonywany bezpośrednio przez projektanta, a w przypadkach serii standardowej o stablicowanych wartościach rzędnych li-

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

nie teoretyczne mogą być wykreślone przez automatyczną maszynę kreślącą. Rysunek taki przedstawia powierzchnię kadłuba styczną do poszycia dna, burt i pokładu. Na statkach stalowych lub wykonanych z innych metali powierzchnia ta jest styczna do wewnętrznej strony poszycia, na statkach drewnianych lub z tworzyw sztucznych - do jego zewnętrznej strony.

Dla przedstawienia powierzchni kadłuba, wykreślnie lub analitycznie, jak również do wykonywania jakichkolwiek obliczeń, konieczny jest układ odniesienia. Wprowadźmy tu układy współrzędnych przedstawione na rys. 2.1. Oba te układy mają jako podstawę płaszczyznę symetrii kadłuba, czyli $y = \eta = 0$. Pozostałe płaszczyzny przyjmuje się w sposób umowny i w różnych krajach są różne. Przyjmijmy,



Rys. 2.1

że druga płaszczyzna, płaszczyzna poprzeczna $x = \xi = 0$, także wspólna dla obu układów współrzędnych, znajduje się w połowie długości okrętu. Jest to płaszczyzna owręża i na rysunkach często oznaczona jest symbolem ⊗. Układ ten stosuje się chętnie w obliczeniach wielkości hydrostatycznych. Natomiast na liniach teoretycznych w Polsce i w krajach europejskich początek układu przyjmuje się na rufie. Przechodzi on wówczas przez pion rufowy PR, tj. prostą leżącą w płaszczyźnie symetrii okrętu, prostopadłą do płaszczyzny wodnicy konstrukcyjnej w punkcie przebicia jej przez oś steru. Stąd numeracja przekrojów poprzecznych liczona jest od rufy. Od tej osi liczy się też wręgi budowlane okrętu. W USA przyjęto początek układu na dziobie. Płaszczyzna $x = 0$ przechodzi wówczas przez pion dziobowy PD, tj. linię pionową leżącą w płaszczyźnie symetrii statku i przechodzącą przez zewnętrzną krawędź dziobnicy na wysokości wodnicy konstrukcyjnej. Do dalszych obliczeń zgodnie z rys. 2.1 przyjmiemy, że początek układu leży w płaszczyźnie owręża, a osie y i η są skierowane na prawą burtę.

Różnica w przyjętych układach dotyczy płaszczyzny poziomej. Pierwszy układ Kxyz jest związany z kadłubem statku. Początek układu K znajduje się w punkcie przecięcia się tych dwu ww. płaszczyzn z płaszczyzną podstawową PP. Dla większości typów statków płaszczyzna ta jest styczna do teoretycznej powierzchni dna okrętu. Linię przecięcia dna teoretycznego kształtu kadłuba płaszczyzną symetrii nazywamy linią stępki, która nie zawsze pokrywa się z płaszczyzną podstawową. Przy zwrocie osi z pionowo w górę, osi y na prawą burtę i osi x w kierunku dziobu układ współrzędnych Kxyz jest układem lewoskrętnym. W drugim układzie O$\xi\eta\zeta$ płaszczyzna pozioma pokrywa się z płaszczyzną wodnicy konstrukcyjnej i układ ten związany jest z płaszczyzną lustra wody. Powyżej tej płaszczyzny mamy część nadwodną kadłuba, poniżej część podwodną. Oś ζ jest skierowana pionowo w dół. Układ ten jest więc prawoskrętny. Gdy statek pływa

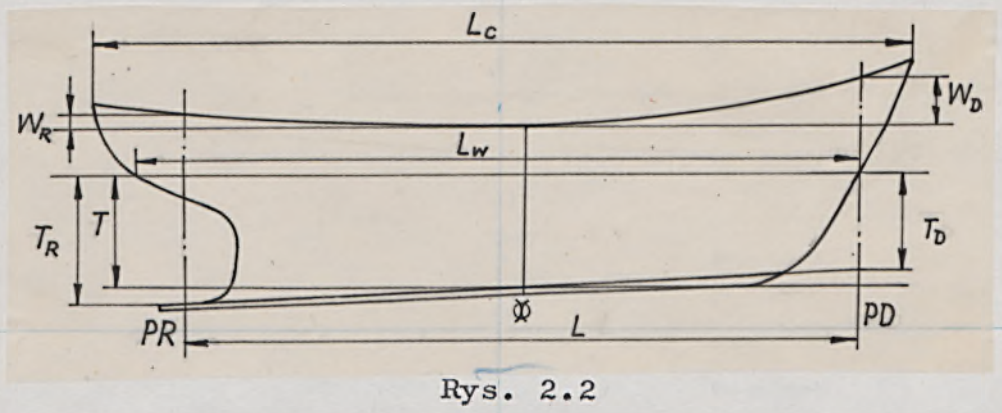
6. 11. 1984
B-5
33%

w spoczynku bez przechyłu i przegłębienia układ $O_{\xi\eta\zeta}$ pokrywa się z układem Oxyz. Zgodnie z tymi układami odcięte od owręża w kierunku rufy są ujemne, a w kierunku dziobu dodatnie. Zgodnie z tradycją za dodatnie pochylenie okrętu θ przyjmiemy pochylenie na rufę, a dodatniemu przechyleniu ϕ będzie odpowiadał przechył na prawą burtę.

2.2. Wymiary kadłuba okrętu

Do przedstawienia kształtu kadłuba konieczna jest znajomość wymiarów głównych okrętu i pewnych wymiarów pomocniczych. Wielkości te zdefiniowane są w przepisach Polskiego Rejestru Statków. Omawiane są także w przedmiocie Zarys techniki okrętowej.

Podstawową długością, wymiarem wzdłuż osi x jest długość między pionami L oznaczana też jako L_{pp}. Jest to odległość między pionem rufowym i dziobowym mierzona w płaszczyźnie symetrii i równolegle do wodnicy konstrukcyjnej. Wśród wymiarów długości wyróżnia się długość na wodnicy L_w. Jest to pozioma odległość między skrajnymi punktami wodnicy. Wymiar



Rys. 2.2

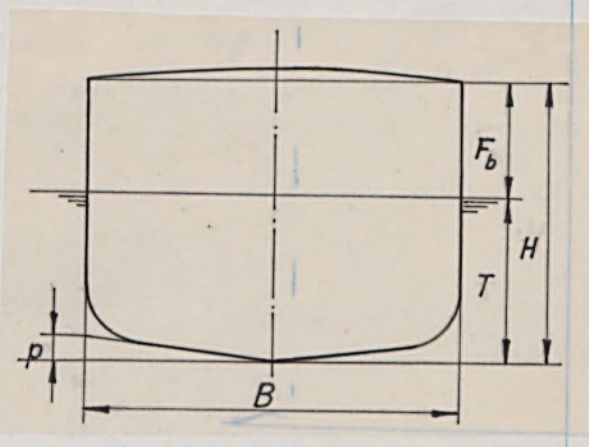
ten zależy więc od zanurzenia okrętu. W zestawieniach podaje się długość na wodnicy konstrukcyjnej, która odpowiada projektowanemu stanowi załadowania okrętu. Wodnica konstrukcyjna występuje też pod nazwą letniej wodnicy ładunkowej. Odpowiada to wodnicy znajdującej się na wysokości środka kręgu znaku wolnej burty, kiedy statek nie ma przechyłu i przegłębienia. (rys. 2.2). Maksymalną długością jest długość całkowita L_c. Jest to pozioma odległość między stałymi skrajnymi punktami kadłuba okrętu. Jeśli w części środkowej okrętu w pewnej odległości od owręża w kierunku rufy i dziobu przekrój poprzeczny nie ulega zmianie, mówimy, że statek posiada wstawkę cylindryczną. Duże statki niezbyt szybkie posiadają taką wstawkę na znacznej swojej długości, natomiast małe jednostki, jak holowniki czy statki rybackie, nie posiadają wstawki cylindrycznej. Części skrajne kadłuba charakteryzują się natomiast dużą zmianą kształtu.

Wymiary w kierunku osi y są wymiarami szerokości. Szerokością okrętu B nazywamy wymiar poziomy mierzony w najszerszym miejscu kadłuba. Jeśli konstrukcja kadłuba jest stalowa, wymiar ten odnosi się do zewnętrznej krawędzi wręgów, bez uwzględnienia poszycia kadłuba, stąd można też spotkać termin „szerokość na wręgach". W przypadku burt rozchylonych charakterystycznym wymiarem jest szerokość w płaszczyźnie wodnicy konstrukcyj-

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

nej, co nazywamy szerokością na wodnicy B_w. Gdy kadłub posiada odbojnice, pomosty czy osłony kół łopatkowych wystające poza kadłub, charakterystycznym wymiarem jest też szerokość całkowita B_c.

Wysokość boczna H jest to odległość pionowa, mierzona w połowie długości między pionami pomiędzy górną powierzchnią stępki płaskiej a górną krawędzią pokładnika górnego pokładu przy burcie. Gdy statek posiada poszycie drewniane lub z tworzyw sztucznych, wówczas należy uwzględnić grubość poszycia. Odległość pionowa też mierzona na owrężu w połowie długości statku od konstrukcyjnej linii wodnej do górnej krawędzi pokładu nosi nazwę wolnej burty F_b. Zanurzenie T jest pionową odległością mierzoną na owrężu od górnej powierzchni stępki płaskiej do letniej wodnicy ładunkowej. Gdy w stanie konstrukcyjnym zanurzenie rufy nie jest równe zanurzeniu dziobu, mówimy, że statek ma przegłębienie konstrukcyjne. Przegłębienie takie mają z reguły niewielkie jednostki, gdyż zwiększone zanurzenie rufy umożliwia instalowanie śrub napędowych o większych średnicach. W tym przypadku zanurzenie rufy mierzy się na pionie rufowym jako odległość od górnej powierzchni stępki do płaszczyzny wodnicy. Zanurzenie dziobowe mierzy się podobnie, jako przedłużenie linii stępki do pionu dziobowego. Wymiary długości, szerokości, wysokości i zanurzenia zaliczamy do wymiarów głównych okrętu.



Rys. 2.3

Linia pokładu w widoku bocznym posiada krzywiznę zwaną wzniosem pokładu. Takie ukształtowanie kadłuba ma na celu zmniejszenie możliwości dostawania się wody na pokład. Dla statków towarowych standardowy wznios na pionie dziobowym określa wyrażenie

$$W_D = 50\left(\frac{L}{3} + 10\right), \qquad (2.1)$$

gdzie: W_D w mm a L w m.

Dzieląc część dziobową statku na trzy równe części otrzymamy punkty, w których rzędne wzniosu pokładu są równe

$$W_{1/3} = \frac{4}{9} W_D; \qquad W_{1/6} = \frac{1}{9} W_D; \qquad W_{\text{⊗}} = 0. \qquad (2.2)$$

Przyjmuje się, że wznios pokładu w części rufowej jest dwukrotnie mniejszy od wzniosu w części dziobowej.

Na wielu współcześnie budowanych statkach, np. wyposażonych w samojezdne dźwigi bramowe lub przewożących kontenery na pokładzie, lub posiadających duże rozmiary - jak masowce czy zbiornikowce - pokłady coraz częściej są bez wzniosu. Statki takie posiadają wówczas dziobówki, które zabezpieczają pokład przed zalewaniem falami.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Dla lepszego odprowadzenia wody z pokładu jest on w przekroju poprzecznym wypukły. Stąd wysokość mierzona przy burcie (wysokość boczna) jest nieco mniejsza niż w płaszczyźnie symetrii. Wypukłość pokładu wynosi około 1/50 szerokości przekroju poprzecznego.

Wszystkie małe statki morskie, a bardzo często i duże, nie mają dna zupełnie płaskiego. Podniesienie dna w przekroju poprzecznym nazywamy podobleniem, a krzywiznę łączącą dno z burtą - obłem.

2.3. Rysunek linii teoretycznych

Rysunek linii teoretycznych okrętu jest wykreślnym sposobem przedstawienia kształtu kadłuba okrętu. Przedstawia on w trzech rzutach linie przenikania powierzchni kadłuba z trzema układami płaszczyzn równoległych, wzajemnie do siebie prostopadłymi.

Linie przenikania powierzchni kadłuba z płaszczyznami poziomymi (równoległymi do płaszczyzny podstawowej xy) nazywają się wodnicami. Kształt ich uwidoczniony jest na rzucie poziomym, zwanym też rzutem wodnicowym. Na dwu pozostałych rzutach wodnice są odcinkami prostych.

Linie przenikania powierzchni kadłuba z płaszczyznami pionowymi (równoległymi do płaszczyzny symetrii xz) nazywają się wzdłużnicami. Kształt ich uwidoczniony jest na rzucie bocznym zwanym też rzutem wzdłużnicowym. Oczywiście na dwu pozostałych rzutach wzdłużnice są odcinkami prostych.

Linie przenikania powierzchni kadłuba z płaszczyznami poprzecznymi (równoległymi do płaszczyzny owręża yz) nazywają się wrężnicami lub wręgami. Kształt ich uwidoczniony jest na rzucie poprzecznym, zwanym rzutem wrężnicowym lub owrężeniem. Na dwu pozostałych rzutach wrężnice są odcinkami prostych.

Można powiedzieć, że rysunek linii teoretycznych przedstawia przekroje powierzchni kadłuba uzyskane w wyniku cięcia kadłuba płaszczyznami poziomymi, wzdłużnymi i poprzecznymi.

Nie ma ustalonych zwyczajów co do ilości wodnic. Spotyka się stałe odstępy między nimi, np. co 1 m, lub zanurzenie projektowe dzieli się na cztery części. Wówczas wodnica konstrukcyjna jest wodnicą czwartą W4. W celu zwiększenia dokładności, ze względu na większe zmiany kształtu kadłuba w jego dolnej części, wprowadza się wodnice połówkowe, np. W $\frac{1}{2}$ i W1 $\frac{1}{2}$. Ponieważ statek jest symetryczny względem płaszczyzny xz, na rysunku przedstawia się tylko połowę kadłuba. Połowę szerokości (B lub B_w) dzieli się na równe części, najczęściej na cztery. Wzdłużnicą „zerową" jest płaszczyzna symetrii statku. Dla statków, które posiadają w części środkowej burty pionowe, wzdłużnica IV jest płaszczyzną styczną do burty. Dokładność wykreślenia takiej wzdłużnicy jest bardzo mała, toteż nie wykreśla się tej wzdłużnicy. Wzdłużnicę IV wykreśla się jedynie dla statków o burtach rozchylonych, dla których podstawą podziału jest szerokość na wodnicy konstrukcyjnej.

W polskim przemyśle okrętowym zwyczajowo stosuje się podział długości między pionami na 10 równych części, stąd istnieje 11 wrężnic teoretycznych. Przedstawione na rysunku linie dlatego nazywają się teoretycznymi,

8. 11. 1984
B-5
33%

gdyż wyznaczają jedynie kształt kadłuba, jego teoretyczną powierzchnię styczną do wewnętrznej krawędzi poszycia (dla statków metalowych). Nie mają one charakteru konstrukcyjnego. Konstrukcyjne ożebrowanie statku (wręgi budowlane) ma odstępy znacznie mniejsze, np. statek o nośności 10 tys. DWT posiada około 200 wręgów budowlanych. Numerację wrężnic prowadzi się od pionu rufowego. Teoretyczna wrężnica 0 znajduje się przy pionie rufowym, Wr 5 - przy owrężu, a Wr 10 przy pionie dziobowym. Ze względu na bardziej gwałtowną zmianę kształtu w częściach skrajnych okrętu stosuje się dodatkowe wrężnice, np. w części rufowej Wr $\frac{1}{2}$ i Wr 1 $\frac{1}{2}$, a w części dziobowej Wr 8 $\frac{1}{2}$ i Wr 9 $\frac{1}{2}$.

Dla sprawdzenia płynności linii teoretycznych dokonuje się jeszcze cięć dodatkowych płaszczyznami nachylonymi pod kątem w stosunku do płaszczyzny symetrii. W sąsiedztwie rzutu poziomego wykreśla się układ tych przekrojów. Linie te nazywamy ukośnicami. Rysunek 2.4 przedstawia linie teoretyczne małego trawlera rybackiego.

Technika kreślenia linii teoretycznych polega na wykonaniu, w oparciu o wymiary główne, siatki trzech rzutów, a następnie ze szkicu jednego rzutu, którym najczęściej jest owrężenie, rozrysowywaniu dwóch pozostałych i uzgodnieniu trzech rzutów ze sobą. Uzgodnienie rzutów polega na właściwym umiejscowieniu wszystkich punktów przy zachowaniu płynności wszystkich krzywizn. Do pełnej zgodności i płynności trzech rzutów dochodzi się kolejnymi przybliżeniami. Ponieważ - prócz podania wymiarów głównych - rysunku takiego nie wymiaruje się, wymagana dokładność jest bardzo duża, gdyż wszelkie wymiary potrzebne do późniejszych obliczeń odczytuje się wprost z rysunku.

Zwyczajowo na rysunkach okrętowych dziób rysuje się z prawej strony. Eksponowanie prawej burty statku ma wielowiekową tradycję, gdyż w przeszłości urządzenie do sterowania umieszczane było na prawej burcie, a nie w płaszczyźnie symetrii. Stąd do dzisiaj w języku narodów morskich stosuje się terminy: burta sterowa i burta portowa (lewa).

Na owrężeniu, podobnie jak i na rzucie poziomym, wykreśla się tylko połówki przekrojów do płaszczyzny symetrii i tak wrężnice części rufowej wykreśla się z lewej strony, a części dziobowej - z prawej strony owrężenia.

2.4. Stosunki wymiarów głównych i współczynniki pełnotliwości

Liczbowa charakterystyka kształtu okrętu jest bardzo przydatna przy porównaniach różnych kadłubów w czasie projektowania statku. Liczby te są ilorazami wymiarów głównych oraz tzw. współczynnikami pełnotliwości. Poszczególne typy statków w zależności od swojego przeznaczenia mają te charakterystyczne wielkości w pewnych ustalonych granicach. Zasadniczą rolę odgrywają następujące stosunki wymiarów głównych:

L/B - stosunek długości do szerokości okrętu,
B/T - stosunek szerokości do zanurzenia,
H/T - stosunek wysokości bocznej do zanurzenia,
L/H - stosunek długości do wysokości bocznej,
$L/\sqrt[3]{\nabla}$ - stosunek długości do trzeciego pierwiastka objętości podwodnej części kadłuba.

6. 11. 1984
B-5
33%

Stosunek L/B ma duży wpływ na opór okrętu, na stateczność kursową (zdolność utrzymania się na kursie prostym), a także na charakterystykę zwrotnościową. Stosunek ten ma też wpływ na stateczność poprzeczną statku. Im iloraz jest większy, statek staje się bardziej wydłużony, opór na jednostkę wyporności maleje, zwiększa się średnica cyrkulacji, polepsza się jego stateczność kursowa. Stąd też szybkie okręty wypornościowe, nieślizgowe, jak np. niszczyciele, aby mieć korzystne cechy oporowe, są bardzo wydłużone, L/B wynosi około 10, a przy sportowych wyczynowych łodziach wiosłowych stosunek ten dochodzi nawet do 30. W przeciwieństwie np. holowniki portowe nie odznaczają się dużymi prędkościami przy pływaniu swobodnym, lecz dużą zwrotnością; mogą mieć $L/B \approx 3{,}2$, a pchacze śródlądowe w skrajnych przypadkach $L/B \approx 1{,}8$. Z reguły im statek jest mniejszy, tym i L/B jest mniejsze. Stosunek L/B ma też pewien wpływ na wytrzymałość wzdłużną okrętu.

Stosunek B/T wpływa na opór statku, na cechy zwrotnościowe, jak również na zdolność utrzymania się na kursie. Wykazuje duży wpływ na stateczność okrętu, głównie w zakresie małych kątów przechyłu. Duża wartość tego stosunku nie jest pod tym względem korzystna, gdyż statek jest wówczas zbyt sztywny, co powoduje gwałtowne kołysania na fali i silne obciążenia konstrukcji. Dla statków morskich stosunek ten zmienia się w niewielkich granicach. Średnio dla typowych statków towarowych $B/T \approx 2{,}3\text{-}2{,}5$. Dla statków rzecznych o bardzo ograniczonym zanurzeniu może on dojść w skrajnym przypadku do $B/T = 12$.

H/T jest wskaźnikiem wyporności rezerwowej, obejmującej objętość kadłuba powyżej linii wodnej. Ma on duże znaczenie przy obliczeniach pływalności i stateczności awaryjnej. Stosunek H/T dla statków morskich znajduje się w granicach 1,05-2,20, przy czym wyższe wartości dotyczą statków pasażerskich i Ro-Ro.

Stosunek L/H nie ma istotnego znaczenia na własności hydromechaniczne statku, ma natomiast wpływ na jego wytrzymałość wzdłużną, decyduje więc o doborze wymiarów wiązań kadłuba. Dla statków morskich stosunek ten nie przekracza $L/H = 14$, średnio występuje w granicach 11-12,5. Wraz ze wzrostem wymiarów statku stosunek ten ze względów konstrukcyjnych rośnie. Dla statków śródlądowych, nie narażonych na dynamiczne obciążenia na fali, stosunek ten dochodzi do 30.

Współczynnik $L/\sqrt[3]{\nabla}$, zwany też współczynnikiem smukłości, ma duży wpływ na opór statku. Smukłość statku rośnie ze wzrostem tego współczynnika, a bardziej smukły statek ma mniejszy opór w wodzie. Współczynnik ten dla statków towarowych może występować w granicach $L/\sqrt[3]{\nabla} = 4\text{-}8$, dla bardzo pękatych kadłubów może wynosić 3, a dla łodzi sportowo-wyczynowych dochodzi do 15.

W praktyce biur projektowych w powszechnym użyciu są też bezwymiarowe współczynniki zdefiniowane następującymi zależnościami:

- współczynnik pełnotliwości wodnicy $\alpha = \frac{S_{wL}}{LB}$, (2.3)

6. 11. 1984
B-5
33%

- współczynnik pełnotliwości owręża $\beta = \frac{S_{\alpha}}{BT}$, (2.4)

- współczynnik pełnotliwości kadłuba $\delta = \frac{V}{LBT}$, (2.5)

- wzdłużny współczynnik pełnotliwości kadłuba $\varphi = \frac{V}{S_{\alpha} L} = \frac{\delta}{\beta}$, (2.6)

- pionowy współczynnik pełnotliwości kadłuba $= \frac{V}{S_{wL} T} = \frac{\delta}{\alpha}$, (2.7)

gdzie: S_{wL} - jest powierzchnią wodnicy, S_{α} - pow. owręża,

V - objętością podwodnej części kadłuba.

Współczynniki pełnotliwości oznacza się też literą C z odpowiednim indeksem. Podstawowe symbole stosowane w okrętowej literaturze międzynarodowej podane są na końcu skryptu. Współczynniki pełnotliwości zależą od zanurzenia okrętu. Do celów porównawczych i projektowych w zestawieniach podaje się wartości liczbowe dla stanu projektowego. Dla takich celów odnosi się wtedy wszystkie współczynniki pełnotliwości do długości między pionami L, natomiast dla sprawdzenia poprawności obliczeń należy stosować aktualne wymiary gabarytowe.

Duże znaczenie ma współczynnik δ. Współczynnik ten, podobnie jak współczynnik smukłości $L/\sqrt[3]{V}$, decyduje o prędkości statku i o jego nośności. Dla polepszenia własności oporowych współczynnik δ powinien być mały, z drugiej strony jednak ogranicza to zdolność przewozową statku. Szybkie statki drobnicowe lub kontenerowce utrzymujące żeglugę liniową odznaczają się smukłymi kadłubami, posiadają δ przeważnie poniżej 0,60, zaś statki powolne, jak duże masowce czy zbiornikowce, są bardzo pełnotliwe, δ kształtuje się powyżej 0,80. Dla barek współczynnik ten dochodzi nawet do 0,95, natomiast małe jednostki, jak np. motorówki, mogą mieć δ około 0,40.

Współczynnik φ ma także wpływ na opór okrętu, szczególnie na jeden jego składnik, tzw. opór resztkowy. Przy tej samej wyporności i długości statku większe φ prowadzi do mniejszego przekroju owręża i bardziej pełnotliwych części skrajnych okrętu. Współczynnik ten decyduje o wzdłużnym rozkładzie wyporności. Jest miarą zaostrzenia części skrajnych. Dla typowych morskich statków występuje w granicach 0,55-0,80. Dla barek śródlądowych może dochodzić nawet do 0,90.

Współczynnik pełnotliwości owręża lub tzw. wręgu głównego β jest powiązany z dwoma poprzednimi. Uzależniony jest także od prędkości statku. Dla typowych statków morskich występuje w granicach 0,75-0,99. Statki towarowe, mające wstawkę cylindryczną, posiadają wysoki współczynnik β, natomiast statki małe, jak holowniki, statki rybackie, motorówki mają duże podoblenie i duży promień obła, stąd współczynnik β jest mały, może nawet wynosić 0,60.

S/14/85 PG MS
B-5
33%

Współczynnik α świadczy o pełnotliwości wodnicy, uzależniony jest od kształtu przyjętych wrężnic. Przeciętne wartości występują w granicach 0,67-0,87, dla barek śródlądowych może dojść nawet do 0,95. Ma duży wpływ na zmianę zanurzenia statku przy zmianie ilości ładunku.

Współczynnik pełnotliwości pionowej $\mathcal{H}$ charakteryzuje rozkład wyporności wzdłuż osi z. Dla typowego statku towarowego współczynnik ten w funkcji zanurzenia zmienia się w niewielkich granicach. Odgrywa dużą rolę przy obliczaniu pływalności, niezatapialności i stateczności. Ma wpływ na pionowe kołysania na fali. Dla statków towarowych występuje w granicach $\mathcal{H} = 0,75-0,90$, dla innych typów kadłubów w granicach 0,59-0,96. Duże wartości $\mathcal{H}$ mają statki o poprzecznych przekrojach w kształcie litery U, zaś statki o przekrojach typu V mają niskie wartości $\mathcal{H}$.

W pewnych przypadkach dla ściślejszego przedstawienia kształtu części kadłuba stosuje się współczynniki oddzielnie dla części dziobowej i rufowej okrętu.

Współczynniki pełnotliwości są bardzo pomocne do sprawdzenia wykonywanych obliczeń, gdyż znane są w przybliżeniu wartości występujących współczynników pełnotliwości w zależności od typu okrętu. Spełnione też są następujące relacje:

$$\delta < \varphi < \alpha < \beta < 1, \tag{2.8}$$

$$\delta < \varphi < \mathcal{H} < \beta < 1. \tag{2.9}$$

Z reguły dla typowych statków towarowych spełniona jest też nierówność

$$\alpha < \mathcal{H}$$

natomiast dla małych statków, jak holowniki portowe czy niektóre statki rybackie o bardzo pełnotliwej wodnicy konstrukcyjnej i bardzo smukłej części rufowej, zależność ta może być odwrotna.

W tabeli 2.1 przykładowo zebrane są dane różnych typów statków, których liczbowe wartości doskonale uwidaczniają ich charakterystyczne cechy kształtu kadłuba.

2.5. Współczesne kształty statków morskich i metody projektowania

Kształt kadłuba okrętu w ciągu wieków przeszedł daleko idącą ewolucję. Ogromne zmiany w tej dziedzinie dokonują się obecnie. Ostatnich dwadzieścia lat było wielkim przełomem w budownictwie okrętowym. Występujące zmiany polegają na wzroście wielkości budowanych statków, dochodząc do nośności pół miliona ton. Ćwierć wieku temu statek o nośności 30 tys. ton był uważany za wyjątkowo duży. Wzrost nośności masowców spowodowany jest wzrostem wymiarów głównych, a także znaczną pełnotliwością kadłuba, niespotykaną poprzednio. Ze względu jednak na zagrożenie środowiska naturalnego ta gigantomania została przyhamowana, lecz statki o nośności rzędu 200 tys. ton dla ładunków masowych nie są dziś rzadkością. W latach sześćdziesiątych dał się z kolei zauważyć przy przewozie drobnicy w żegludze liniowej wzrost prędkości statków i instalowanej mocy. Prędkoś-

Tabela 2.1

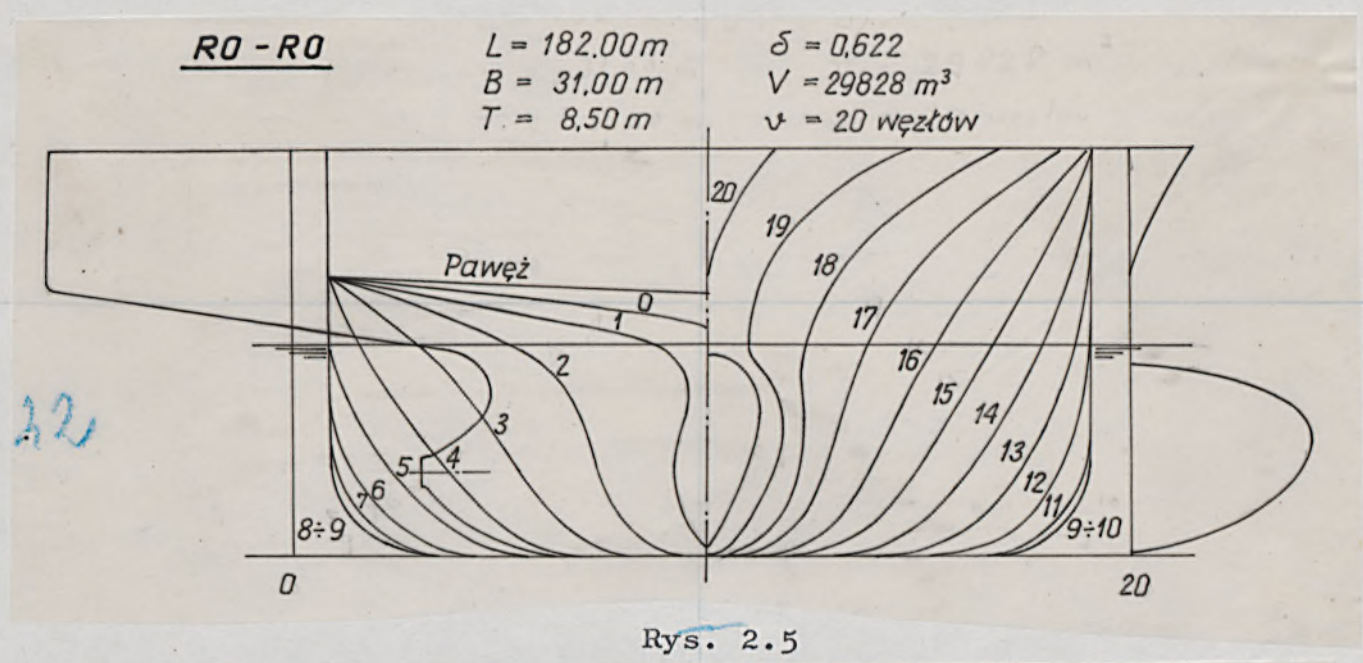
Charakterystyki statków różnych typów

Typ statku	DWT	M	L_c	L	L_w	ϑ	P	L_w/B	B/T	H/T	L_w/H	$L/\sqrt[3]{\nabla}$	δ	φ	α	$\mathcal{H}$	β
	t	t	m	m	m	węzły	kW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Masowiec OBO	105 000	114 200	244,50	236,00	240,64	16	17 060	6,22	2,67	1,52	10,94	4,87	0,840	0,842	0,892	0,942	0,998
Ro-Ro	21 500	37 780	277,60	210,00	216,50	23	2x12800	7,10	3,21	2,18	10,45	6,27	0,603	0,626	0,710	0,850	0,963
Uniwersalny drobnicowiec	11 700	19 250	161,00	150,00	153,70	22	12 500	6,71	2,36	1,37	11,56	5,61	0,560	0,575	0,680	0,824	0,975
Drewnowiec	14 000	19 680	150,25	140,00	144,50	15,8	7 060	6,88	2,42	1,33	12,46	5,20	0,750	0,759	0,822	0,912	0,988
Uniwersalny drobnicowiec	3 500	6 000	106,40	95,20	98,51	14,5	2 870	6,16	2,82	1,67	10,36	5,26	0,670	0,679	0,783	0,856	0,987
Drobnicowiec (poniżej 1600 BRT)	3 000	4 070	84,13	77,50	79,50	12,4	1 470	5,85	2,57	1,21	12,50	4,87	0,708	0,717	0,814	0,869	0,987
Trawler przetwórnia	1 500	3 930	88,00	80,00	84,22	13,0	1 840	5,81	2,76	1,86	8,64	5,09	0,625	0,668	0,702	0,890	0,935
Statek rybacki sejner	650	1 690	52,90	47,50	49,90	14,5	2 140	4,42	2,17	1,45	6,61	4,01	0,590	0,645	0,800	0,738	0,915
Kuter rybacki		198	25,15	22,50	23,72	11,0	420	3,30	2,67	1,30	6,77	3,88	0,440	0,580	0,735	0,598	0,764

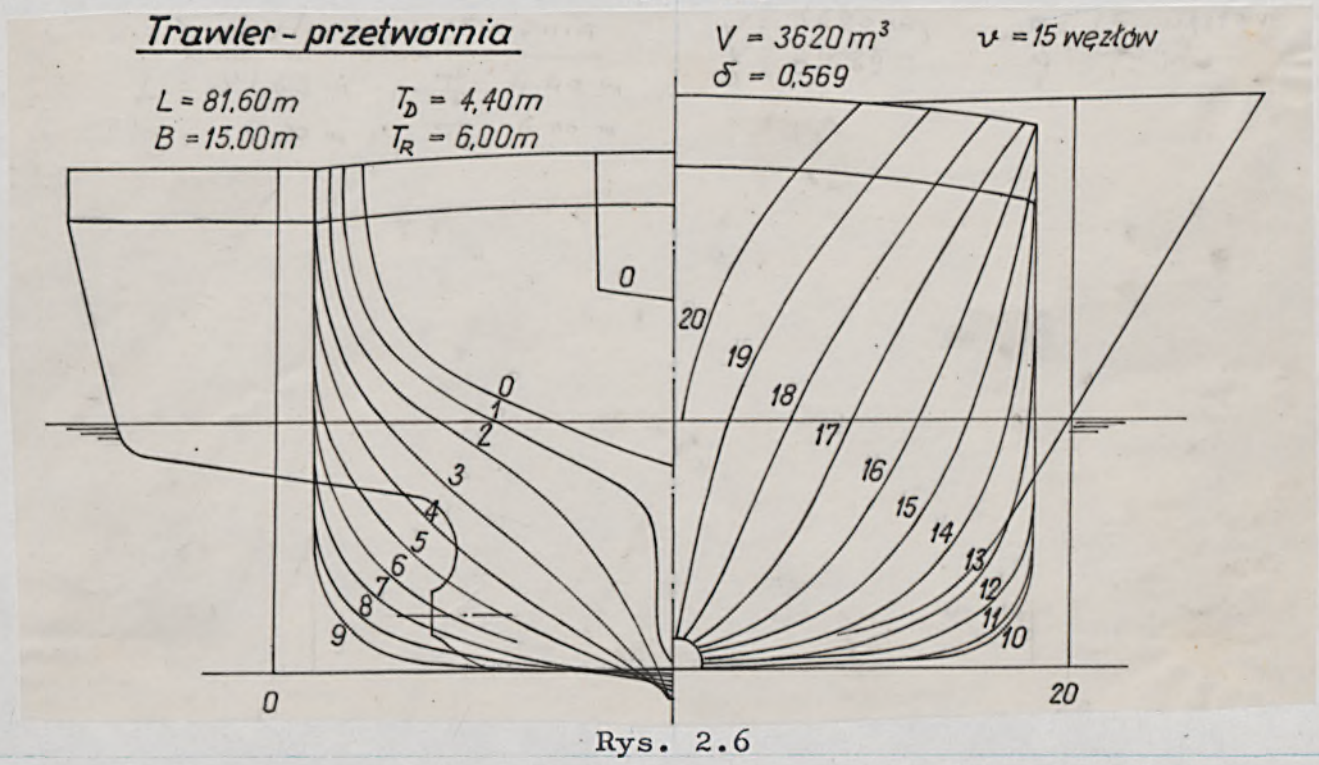
8. 11. 1984
B-5
33%

ci tych statków dochodziły do 25 węzłów, zamierzano przekroczyć 30 węzłów. O ile jednak przed rokiem 1972 koszty paliwa dla szybkiego statku towarowego wynosiły około 10% kosztów eksploatacyjnych, to obecnie koszty paliwa dla tego typu statku sięgają 50-70%. Z powodu gwałtownego wzrostu cen paliwa i ta tendencja uległa zahamowaniu i obecnie poszukuje się oszczędnościowych rozwiązań energetycznych.

W ostatnim też okresie nastąpiła wysoka specjalizacja floty. Powstały nowe typy statków, jak statki do przewozu skroplonego gazu: LNG - gazu ziemnego i LPG - gazów naftopochodnych, chemikaliowce, statki do przewozu samochodów, barkowce, statki zaopatrzeniowe dla przemysłu wydobywczego z dna morskiego, obsługujące konstrukcje pływające lub posadowione na dnie, promy pasażersko-samochodowe, wyspecjalizowane statki rybackie i inne. Powstały nowe formy załadunku, jak załadunek poziomy, wtaczany (Ro-Ro). Drobnica w kontenerach jest dziś jedyną formą ładunku w nowoczesnych portach. Te funkcje użytkowe statku w znacznym stopniu determinują kształt kadłuba i typy kształtu przybierają nazwy w zależności od przeznaczenia statku.

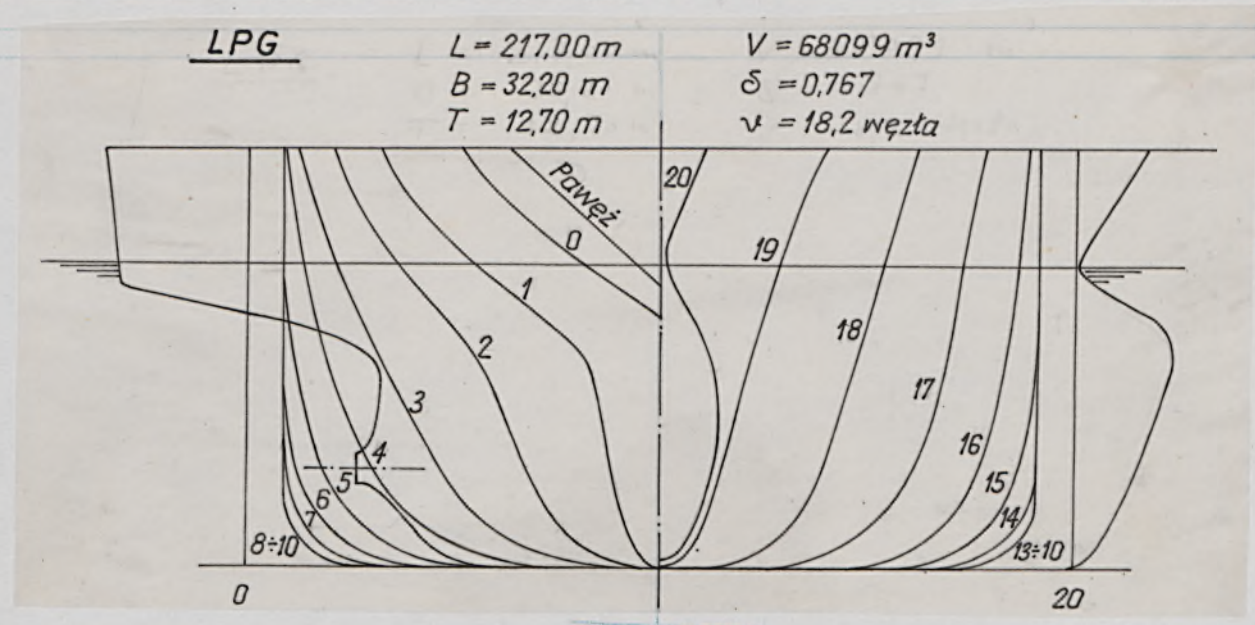


Rys. 2.5

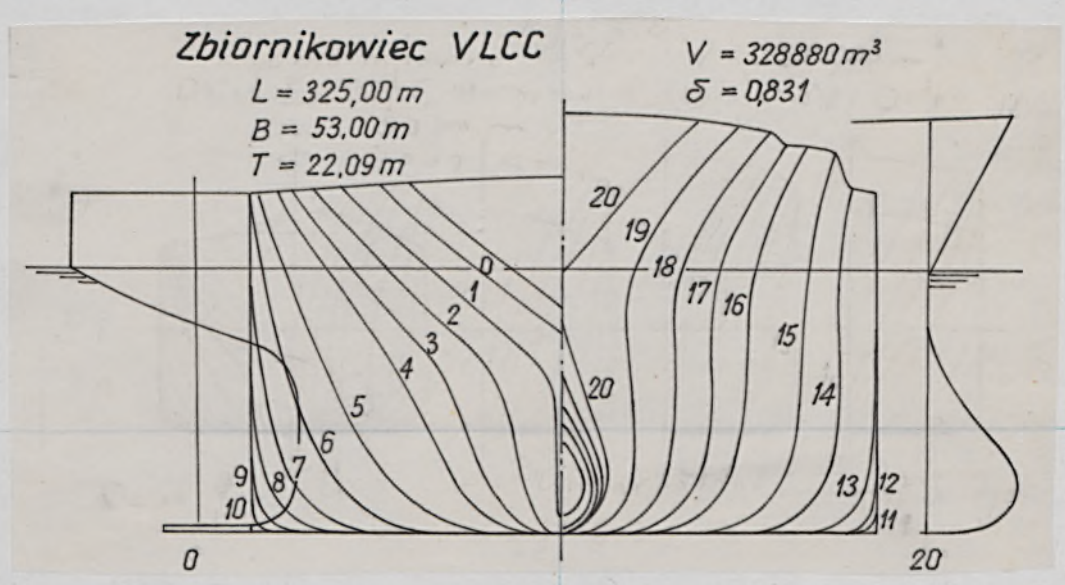


Rys. 2.6

6. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 2.7

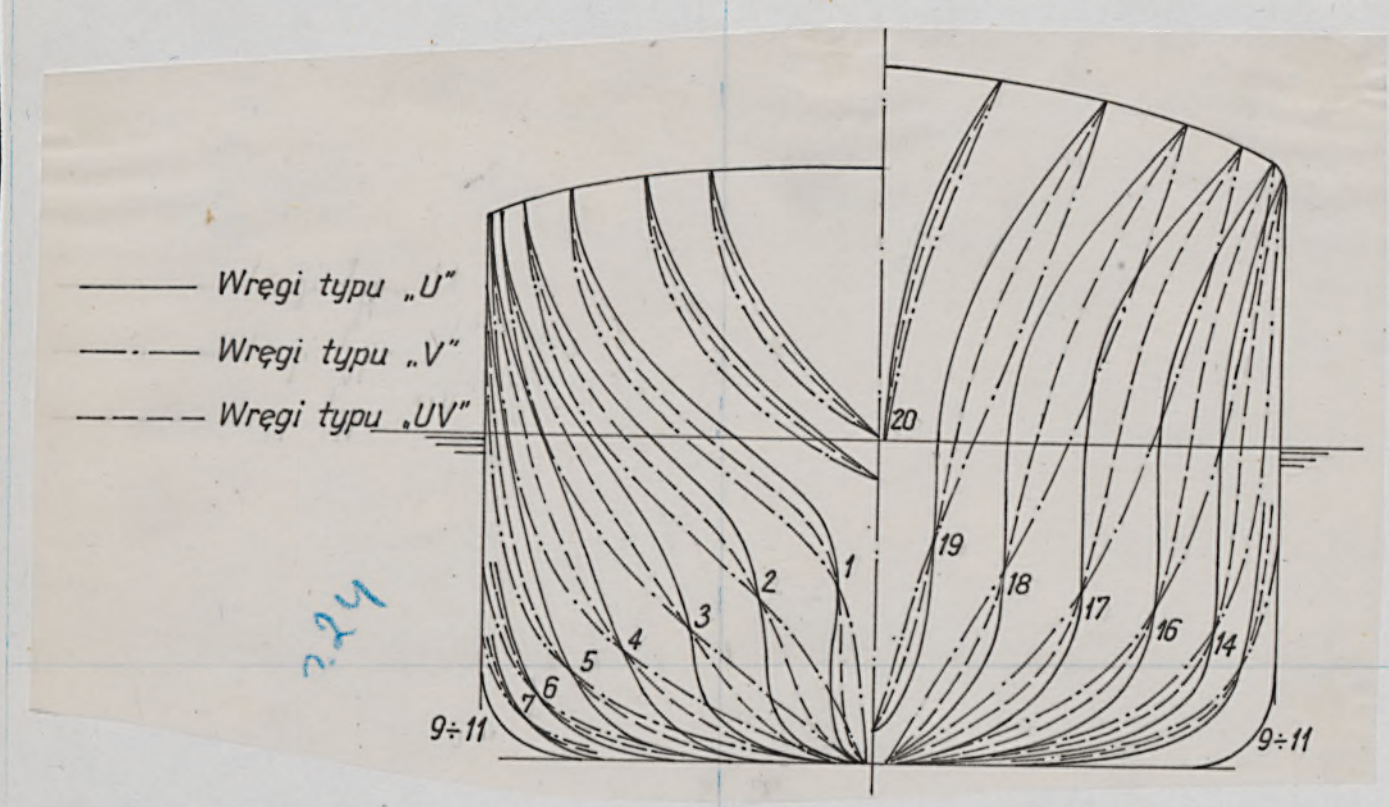


Rys. 2.8

Przykładowo na rys. 2.5-2.8 podane są skrócone linie teoretyczne oraz podstawowe parametry charakteryzujące dane statki. Rysunki te dają wyobrażenie o ukształtowaniu tych kilku typów statków. Przedstawiono tu kształt statku dla ładunków wtaczanych Ro-Ro (roll on - roll off), który posiada rampę wjazdową na rufie, i pełnomorski trawler przetwórnię z pochylnią na rufie do wciągania na pokład włoka z rybą. Rys. 2.7 przedstawia kształt gazowca do przewozu skroplonych gazów LPG (liquefied petroleum gases), a rys. 2.8 kształt zbiornikowca VLCC (very large crude carrier). Skromny ten przegląd nie obejmuje innych charakterystycznych typów statków, a i w przedstawionych typach mogą występować różnice, szczególnie jeśli chodzi o części skrajne kadłuba.

Istnieją dwa podstawowe typy przekrojów poprzecznych w skrajnych częściach kadłuba, tzw. kształt U i V. O ile dziobnice w części nadwodnej dla obu typów są mocno wychylone do przodu, to kształt V ma także mocno podciętą dziobnicę i w części podwodnej, natomiast kształt U w dolnej części ma dziobnicę prawie że równoległą do pionu dziobowego. Tak ukształtowane części dziobowe statków mają swoje zalety. Z reguły przekroje ty-

pu U stosuje się częściej dla statków szybszych, gdyż dają niższe opory na wodzie spokojnej. Dla statków wolniejszych, dla których decydującym składnikiem oporu jest opór tarcia, stosuje się kształty o najmniejszej powierzchni zwilżonej, stąd korzystniejsze są kształty V. Kształt V jest także korzystniejszy w zachowaniu się statku na fali. Dlatego też ten kształt wręgów mają przede wszystkim statki małe, bardziej narażone na oddziaływanie fali, a duże i wolne zbiornikowce z reguły mają wręgi typu U. Często stosuje się kształty o charakterze pośrednim. Przekroje takie przedstawia rys. 2.9.



Rys. 2.9

Bardzo popularne obecnie są dzioby gruszkowe o zróżnicowanej konfiguracji, które stosuje się wyłącznie przy wręgach U. Kształt taki jest korzystniejszy dla statków szybkich o małej pełnotliwości, stąd dzioby takie są powszechne na kontenerowcach i statkach Ro-Ro. Zastosowanie gruszek jest też korzystne dla statków wolnych, lecz bardzo pełnotliwych - stąd zastosowanie na dużych zbiornikowcach i masowcach. Gruszka dziobowa w pewnym zakresie prędkości zmniejsza opór okrętu, zmniejszając jeden ze składników - opór falowy.

Dużo uwagi przy projektowaniu kształtu okrętu poświęca się części rufowej. Kształt rufy winien zapewniać dobry dopływ wody do śruby, co podnosi sprawność napędową. Problemy hydromechaniczne występują przy statkach szybkich oraz przy statkach bardzo pełnotliwych, a zwłaszcza przy pełnotliwych rufach, co ma miejsce, gdy maszynownia jest zlokalizowana w tej części statku. Zakłócenie opływu w kręgu śruby i małe prędkości wody w górnym położeniu skrzydła śruby są przyczyną powstawania kawitacji na śrubie i silnych drgań przenoszonych na kadłub. Gdy wysmuklenie rufy nie jest możliwe, korzystny wpływ ma zwiększenie odległości skrzydeł śruby od kadłuba, zastosowanie niesymetrycznej tylnicy lub zastosowanie gru-

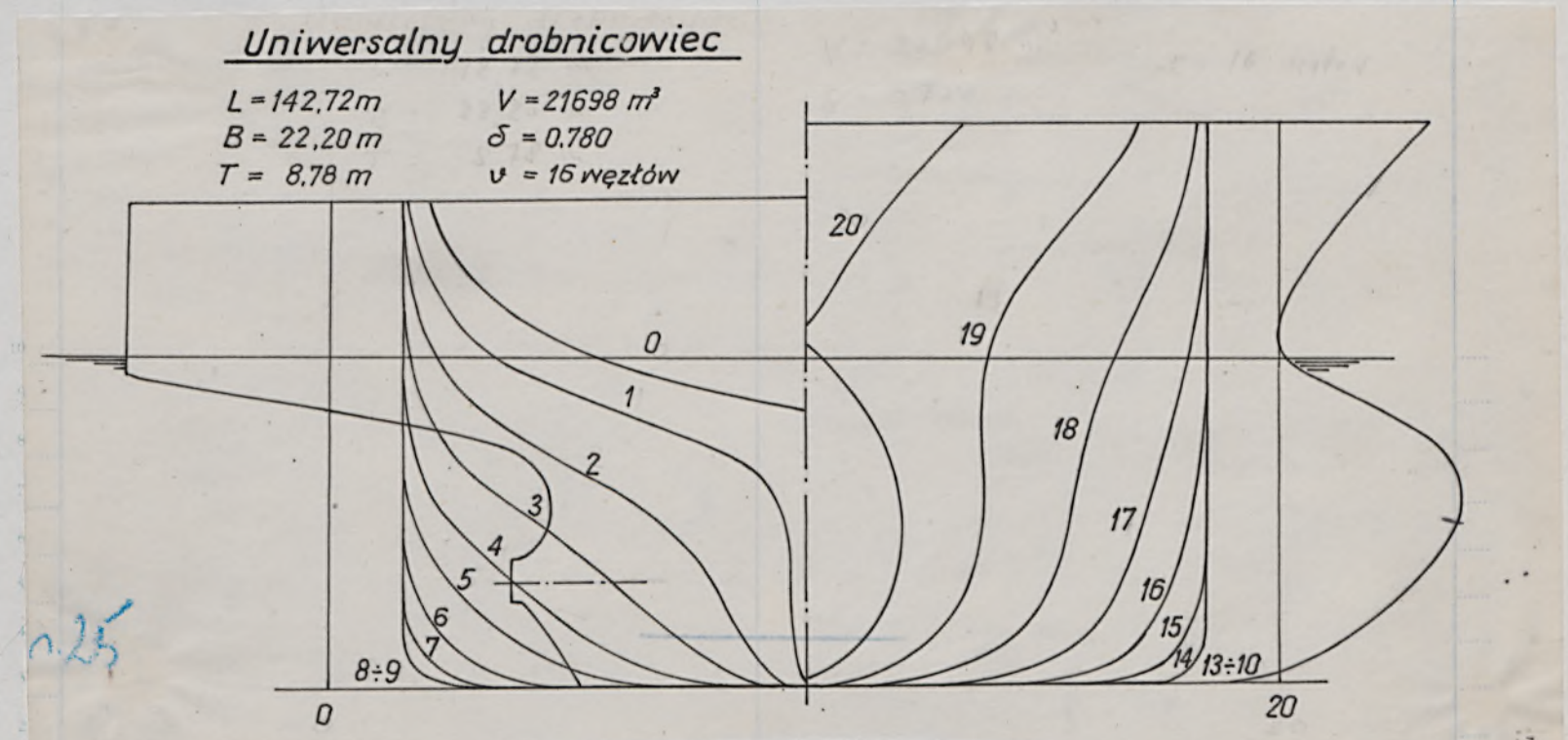
8. 11. 1984
B-5
33%

szki rufowej (tzw. rufa Hognera). Gruszki takie wyrównują osiowy rozkład prędkości, jednakże nie zawsze skutecznie eliminują drgania.

Obecnie, w dobie wysokich cen paliw, okrętowcy wprowadzają nową generację statków. Oszczędności zużycia paliwa uzyskuje się tu na drodze wielokierunkowej działalności. Wprowadza się bardzo oszczędne nowoczesne silniki spalinowe o dłuższym skoku tłoka, zastosowano agregaty napędzane na morzu poprzez główny wał napędowy, przez zastosowanie przekładni zmniejszono obroty śruby nawet do 50 obr/min, powiększono średnicę śruby, z czym związana jest zmiana kształtu rufy, zastosowano śruby o skoku nastawnym wraz z automatyczną kontrolą obciążenia śruby; przez optymalny dobór wymiarów głównych i dalsze doskonalenie kształtu kadłuba zmniejsza się opór statku, obniża się prędkość marszową statku do ekonomicznie uzasadnionej; stosuje się także specjalne farby, zabezpieczające kadłub przed szkodliwym porastaniem. Ta kompleksowa działalność spowodowała, że oszczędność w zużyciu paliwa dochodzi nawet do 50% zużycia przed kryzysem paliwowym.

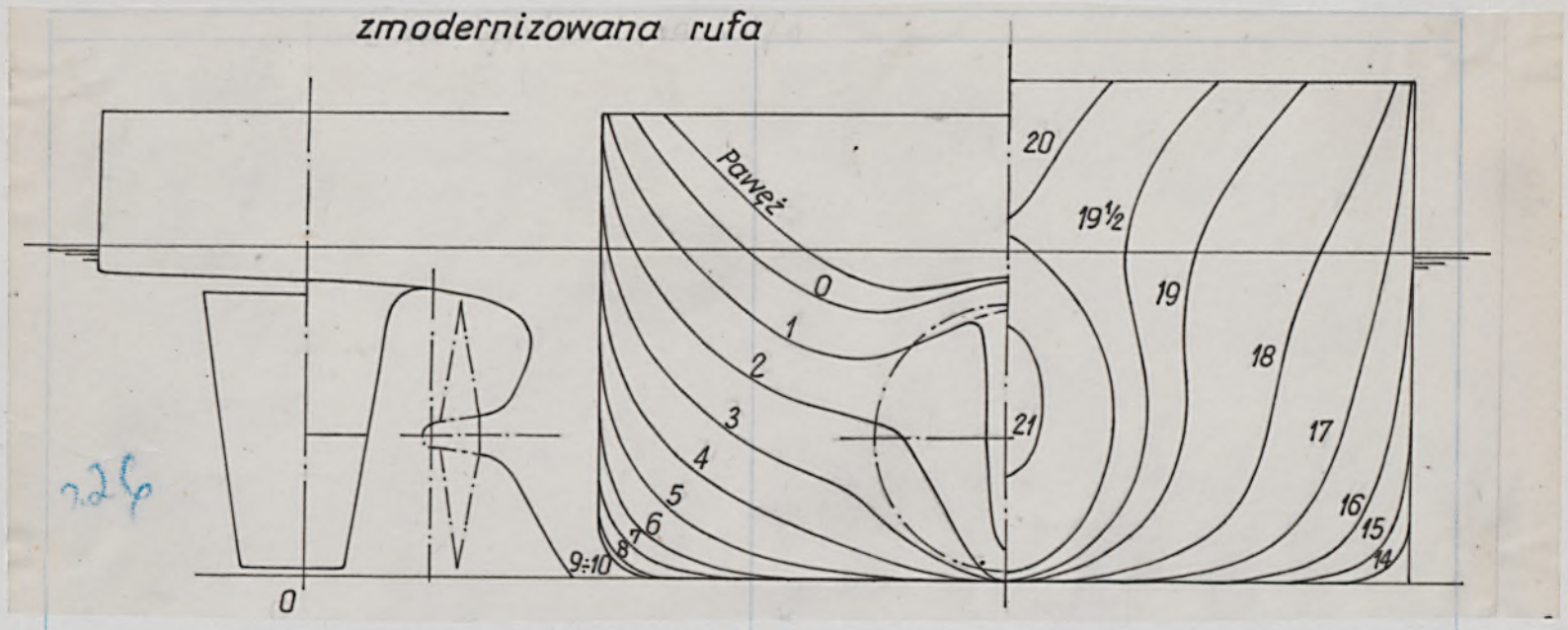
Przykłady wprowadzanych zmian pokazano na rys. 2.10 i 2.11. Rys. 2.10 przedstawia linie teoretyczne wielozadaniowego statku towarowego o dużym współczynniku pełnotliwości. W pełnym stanie załadowania statek rozwijał prędkość 16 węzłów przy średnicy śruby D = 5,72 m i obrotach 120 obr/min. Po zmianie kształtu rufy (rys. 2.11) i użyciu przekładni można było zainstalować śrubę o średnicy D = 7,60 m przy prędkości obrotowej 60 obr/min. Tylko ta zmiana, przy niezmienionej prędkości statku, zmniejsza zapotrzebowanie mocy o 12%, zmniejszając tym samym zużycie paliwa.

Istnieje dzisiaj zdecydowany pogląd, że każde nowe rozwiązanie konstrukcyjne, każde dodatkowe urządzenie techniczne jest opłacalne, jeśli prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa. Występują także daleko idące zmiany w technice projektowania kształtu kadłuba. Przy projektowaniu linii teoretycznych należy spełnić wymagania armatora, jak np. zapewnienia



Rys. 2.10

8. 11. 1984
S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 2.11

nośności i prędkości, ograniczenia wymiarów głównych itp. Związane jest to z doborem wymiarów głównych i obliczeniami hydrostatycznymi. Dzięki wprowadzeniu techniki komputerowej uległ skróceniu tok projektowania okrętu, a tym samym czas niezbędny na wykonanie rysunku linii teoretycznych. Do niedawna jeszcze w biurze projektowym opracowanie rysunku linii teoretycznych sposobem konwencjonalnym wraz z obliczeniami hydrostatycznymi trwało 6 do 8 tygodni, obecnie zaś przy dobrze zorganizowanym dostępie do komputera trwa 1 do 3 dni lub krócej [3].

Mimo tak diametralnie różnych narzędzi pracy postępowanie metodyczne w obu tych technikach projektowych jest takie samo i da się sprowadzić do trzech głównych sposobów:

- parametrycznego,
- metodą transformacji kształtu wzorcowego,
- wg systematycznych serii kształtów.

Pierwszy sposób ma najbardziej ogólny i niezależny charakter. Dąży się tu przede wszystkim do tego, aby ważniejsze parametry kształtu przybrały określone wartości. Przy ustalonych już wymiarach głównych, wyporności i prędkości tymi parametrami zwykle są:

- krzywa pól powierzchni wrężnicowych,
- wodnica konstrukcyjna,
- obrys pokładu,
- zarysy dziobu i rufy,
- kształt przekrojów wrężnicowych.

Często spotyka się też postępowanie polegające na wykorzystaniu wcześniej wykonanego projektu statku, który wykazuje podobieństwo lub powinowactwo ze statkiem projektowanym, dla którego koncepcja kształtu już się wyłoniła we wstępnych studiach i wyobrażeniach projektanta. Z uwagi jednak na różnice między liczbowymi wartościami parametrów kształtu statku wzorcowego i nowo projektowanego konieczna jest transformacja linii wzorcowych, aby tą drogą uzyskać pożądaną zmianę parametrów kształtu. Przekształcenie takie polega głównie na zmianie wymiarów głównych, modyfika-

8. 11. 1984
B-5
33%

cji kształtu owrężenia i pozostałych wrężnic, zmianie wyporności i położenia środka wyporu oraz na modyfikacji zarysów dziobu i rufy i linii pokładu.

Jeżeli koncepcja kształtu kadłuba i jego parametry są bliskie pewnym kształtom seryjnym, projektant może skorzystać z gotowego materiału zawartego w publikacjach, w których znajdują się pełne informacje z systematycznych badań. Pozwalają one, po odpowiednich interpolacjach, na szybkie zaprojektowanie kształtu kadłuba i określeniu również m.in. charakterystyk oporowych i napędowych. Materiały takie oparte są na badaniach modelowych oporu i napędu przeprowadzonych na rodzinach kształtów, tworzonych przez wprowadzenie systematycznych zmian w wartościach parametrów kształtu. Powstały w ten sposób serie kształtów związane z reguły z pewnymi określonymi typami statków, których kształty zmienne są w pewnych praktycznie użytecznych granicach. Najbardziej znane są następujące systematyczne serie kształtów:

1) amerykańska seria 60 (DTMB) - drobnicowce,
2) japońska seria (TTRI) - zbiornikowce,
3) goeteborska seria (SSPA) - zbiornikowce o nośności 10-150 tys. ton,
4) amerykańska seria DAWSONA - statki przybrzeżne o nośności około 1000 t,
5) goeteborska seria (SSPA) - statki przybrzeżne o nośności około 1000 t,
6) japońska seria (ISRA) - szybkie drobnicowce liniowe,
7) angielska seria (BSRA) - drobnicowce,
8) goeteborska seria (SSPA) - szybkie drobnicowce liniowe.

Mimo że tradycyjna technika projektowania jest wciąż niezbędna, na plan pierwszy zaczyna się jednak wysuwać układ, w którym człowiek jest wspomagany przez komputer i urządzenia kreślące. Przy obecnie stosowanej technice komputerowej kształt kadłuba przedstawia się w sposób numeryczny w postaci tabeli rzędnych z coraz szerszym użyciem opisu o zmiennym odstępie między wodnicami.

Taki opis kadłuba ma kilka przeznaczeń, jak:

- utworzenie podstawowego zbioru danych do wszelkiego rodzaju obliczeń projektowych,
- rejestracja kształtu dla celów technologicznych, związanych z trasowaniem a następnie numerycznym sterowaniem pracą maszyn obróbczych,
- zapis zaprojektowanego kształtu w celach archiwalnych dla ewentualnych przyszłych użytkowników.

O ile jeszcze niedawno tworzenie tabeli rzędnych wymagało skrupulatnych pomiarów z linii teoretycznych, to ten stan rzeczy uległ uproszczeniu po wprowadzeniu urządzenia zwanego czytnikiem współrzędnych, za pomocą którego można wprowadzić wartości odczytów bezpośrednio do pamięci maszyny. Nośnikiem informacji są karty perforowane lub taśmy i dyski magnetyczne. Forma ta pozwala na szybkie wykonanie koniecznych obliczeń, ale nie zezwala na swobodne kształtowanie kadłuba. Bardziej rozwiniętym sposobem komunikacji projektanta z maszyną matematyczną jest forma konwersacyjna, w której zapytania o kolejne decyzje dotyczące przebiegu liczenia wyprowadzane są na ekran, a odpowiedzi sterujące wprowadzane są

8. 11. 1984
B-5
33%

poprzez klawiaturę konsoli komunikacyjnej. Istnieje już forma wideograficzna, w której oprócz ekranu konwersacyjnego projektant ma do dyspozycji również świetlny monitor graficzny, na którym może wyprowadzać w pomniejszeniu rysunki kontrolne projektowanego kadłuba. Do korygowania rysunków może być tu wykorzystany ołówek świetlny. Forma ta wprowadza nową jakość do techniki projektowania, pozwala już bowiem stosować interaktywny proces tworzenia kadłuba. Wynikiem pracy komputera będzie wydruk w postaci tekstu numerycznego, bądź też w postaci rysunku wykonanego za pomocą numerycznie sterowanego urządzenia kreślarskiego, ewentualnie kopii z monitora ekranowego.

Projektant jest wspomagany w swej pracy przez basen doświadczalny. Koszt statku jest ogromny, dlatego projektant chce mieć pewność, czy jego koncepcja kształtu jest słuszna i wykorzystuje wszystkie możliwości, aby projekt był udany. Badania modelowe przeprowadzone na wodzie spokojnej prowadzą do korzystnych cech oporowych, do właściwego doboru śruby napędowej oraz dają informację, jaką prędkość statek uzyska na mili pomiarowej. Coraz częściej też wykonuje się badania modelowe na fali, sprawdzając na etapie projektu właściwości morskie statku. Problemy hydromechaniczne wymagają płynnej linii kadłuba, bez niepożądanych punktów przegięć i gwałtownych zmian krzywizn. Unika się wówczas odrywania przepływu i zawirowań. Problemy te odgrywają tym większą rolę, im prędkość statku jest większa. Przy projektowaniu kształtu kadłuba nie należy także zapominać o względach technologicznych. Korzystne są tu elementy prostoliniowe, płaskie, walcowe, rozwijalne.

Mimo nowoczesnych narzędzi pracy w dalszym ciągu wymagane są od projektanta wiedza i doświadczenie, duża wyobraźnia i pomysłowość. Komputer nie zastąpi twórczej myśli, lecz niezmiernie ułatwia rutynowe prace, żmudne i bardzo pracochłonne niegdyś obliczenia i kreślenia. Korzystanie z techniki komputerowej jest koniecznością dnia dzisiejszego, lecz każdy okrętowiec musi dobrze znać istotę obliczeń, by z tej nowoczesnej techniki zrobić właściwy użytek.

8. 11. 1984
B-5
33%

3. ELEMENTY GEOMETRYCZNE KADŁUBA OKRĘTU

„Każdy dzień życia na okręcie zdaje się tworzyć zamknięty krąg wewnątrz rozległego pierścienia obejmującego morski horyzont".

3.1. Obliczenie powierzchni

Przedstawione tu będą niektóre metody całkowania numerycznego, stosowane w obliczeniach okrętowych, z pominięciem wyprowadzeń i wyrażeń na błąd przybliżenia. Zagadnienia te w programach nauczania wchodzą w skład oddzielnego przedmiotu. Ponieważ jednak metody te są fundamentalnym narzędziem we wszystkich obliczeniach związanych ze statyką okrętu, jedynie skrótowo podane zostaną podstawowe informacje, a i to tylko dotyczące metod najczęściej stosowanych, a mianowicie metody: Simpsona I, Simpsona II, trapezów i Czebyszewa. Szczególnie uprzywilejowaną pozycję w zastosowaniach zajmuje wzór Simpsona I.

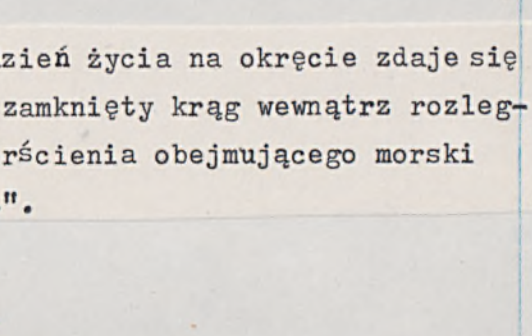
3.1.1. Wzór Simpsona I

Wzór ten opiera się na trzech rzędnych rozmieszczonych w równych odstępach d. Wzór na pole pod krzywą przedstawioną na rys. 3.1 ma postać

$$S = \frac{2}{3} d\left(\frac{1}{2} y_o + 2y_1 + \frac{1}{2} y_2\right). \qquad (3.1)$$

Przy większej ilości przedziałów należy wzór ten stosować wielokrotnie i wówczas

$$S = \frac{2}{3} d \sum_{i=0}^{n} y_i c_{s_i} . \qquad (3.2)$$



Rys. 3.1

Należy tu pamiętać, że metodę tę można stosować jedynie wówczas, gdy ilość przedziałów d jest parzysta. Dla krzywej stopnia trzeciego i niższego wzór ten daje wyniki dokładne. Dlatego w takim przypadku wprowadzenie dodatkowych rzędnych jest niecelowe, gdyż nie zwiększa to dokładności wyniku.

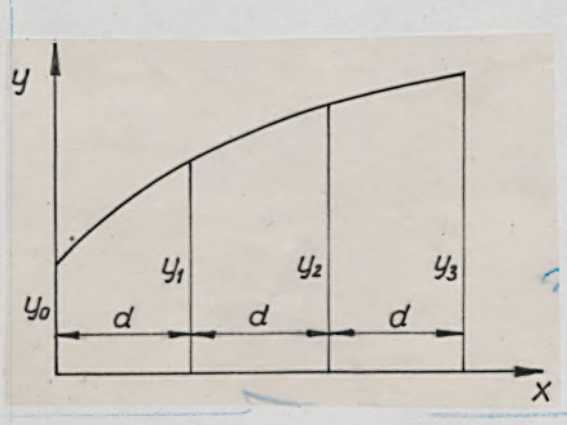
8. 11. 1984
B-5
33%

Wzór Simpsona I opiera się na paraboli drugiego stopnia. Przez trzy punkty można też przeprowadzić nieskończenie wiele parabol trzeciego stopnia, lecz zawsze niedobór pola między dwoma rzędnymi jest równy nadmiarowi pola na pozostałym odcinku, stąd i krzywa trzeciego stopnia daje tu wynik dokładny.

3.1.2. Wzór Simpsona II

Wzór ten opiera się na 4 rzędnych przy stałym odstępie między nimi d,

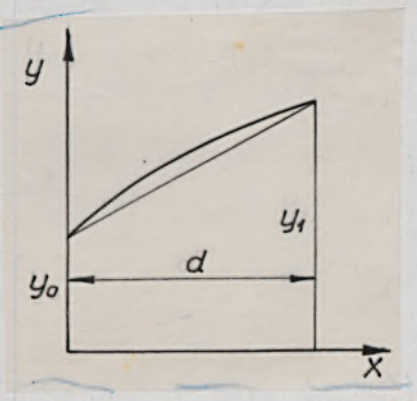
$$S = \frac{3}{8} d(y_o + 3\,y_1 + 3\,y_2 + y_3) \qquad (3.3)$$



Rys. 3.2

i podobnie jak wzór poprzedni daje dokładny wynik dla krzywej do stopnia trzeciego włącznie. Ilość wymaganych przedziałów wynosi 3 lub jej wielokrotność przy dłuższym obszarze całkowania. Wzór ten czasami stosuje się też w połączeniu ze wzorem Simpsona I, gdy pojawia się potrzeba obliczenia powierzchni z nieparzystą ilością przedziałów. Z uwagi na występujący we wzorze współczynnik $\frac{3}{8}$ wzór ten występuje także w literaturze pod nazwą „metoda $\frac{3}{8}$".

3.1.3. Wzór trapezów



Rys. 3.3

Pole pod krzywą, gdzie krzywa zastąpiona jest linią prostą, obliczyć można wykorzystując tylko dwie rzędne:

$$S = \frac{d}{2}(y_o + y_1), \qquad (3.4)$$

a przy wielokrotnym użyciu tego wzoru przy stałym odstępie d między rzędnymi:

$$S = d\left(\sum_{i=0}^{n} y_i - \varepsilon\right),$$

gdzie: $\varepsilon = \frac{y_o + y_n}{2}$.

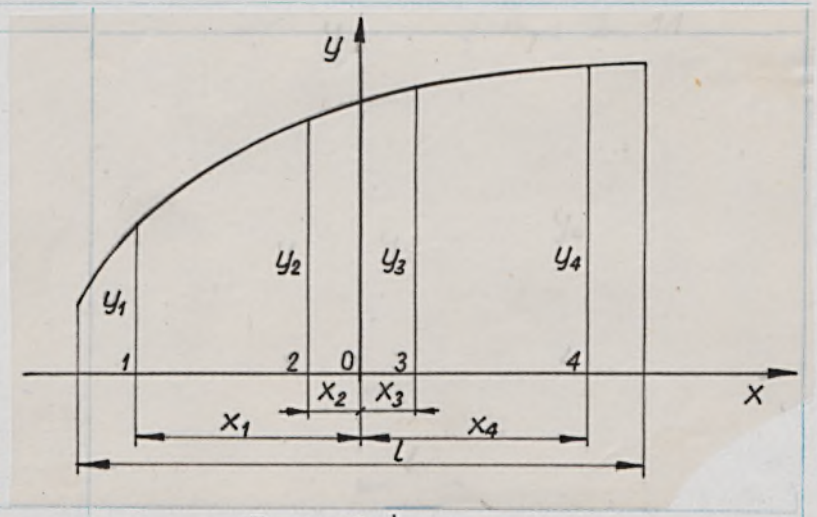
3.1.4. Wzór Czebyszewa

Wzór ten charakteryzuje się tym, że współczynniki wagowe występujące przy rzędnych są stałe i równe 1, natomiast odcięte, w których te rzędne zostały wystawione, są ściśle określone w zależności od przyjętej do obliczeń ilości rzędnych. Przy rozpatrywanym polu, jak na rys. 3.4, powierzchnia pod krzywą jest równa:

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$$S = \frac{1}{n} \sum y_i; \qquad (3.6)$$

gdzie: l - jest długością przedziału,
n - ilością użytych do obliczeń rzędnych, przy czym rzędne te są w punktach



Rys. 3.4

$$x_i = \pm k \frac{l}{2} \qquad (3.7)$$

odkładane w lewo i w prawo od połowy przedziału l, a k jest współczynnikiem Czebyszewa. Niektóre wartości współczynnika k podane są w tabeli 3.1.

Tabela 3.1

Współczynniki Czebyszewa

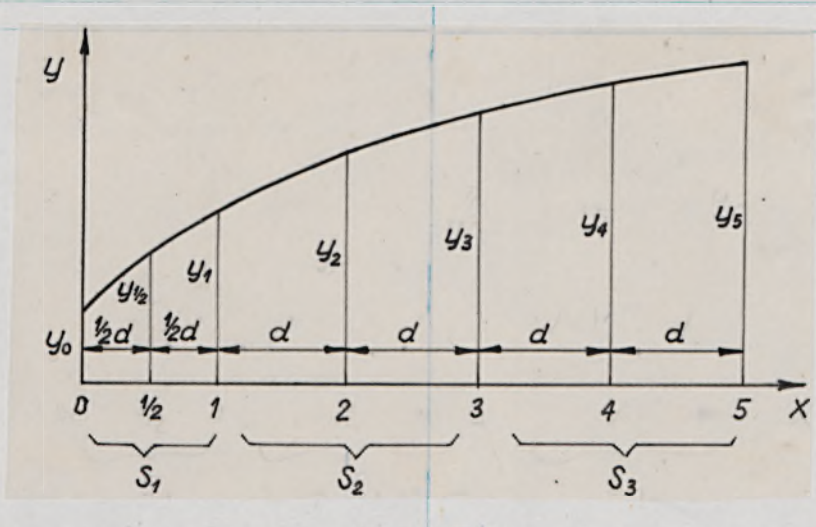
n	k
2	± 0,5773
3	0; ± 0,7071
4	± 0,1876; ± 0,7947
5	0; ± 0,3745; ± 0,8325
6	± 0,2666; ± 0,4225; 0,8662
7	0; 0,3239; ± 0,5297; ± 0,8839
8	± 0,1026; ± 0,4062; ± 0,5938; ± 0,8974
9	0; ± 0,1679; ± 0,5288; ± 0,6010; ± 0,9116

Przy nieparzystej ilości rzędnych jedna rzędna zawsze występuje w połowie przedziału l. Mimo, że rzędne nie dochodzą do punktów skrajnych krzywych, wystarczy zsumować wartości wszystkich pomierzonych rzędnych i pomnożyć przez stały czynnik $\frac{1}{n}$. Wzór ten szczególnie chętnie stosuje się w obliczeniach statecznościowych. Pod wpływem przechylenia statku jego długość wodnicy ulega pewnym wahaniom, lecz zmiany te w tej metodzie nie mają istotnego wpływu na wynik, także nie trzeba tu poszukiwać współczynników wagowych dla poszczególnych rzędnych, co miałoby miejsce przy użyciu wzoru Simpsona.

3.1.5. Zastosowania niektórych wzorów

W skrajnych częściach okrętu zmiany kształtu są większe niż w części środkowej. Powoduje to, że na liniach teoretycznych części te mają dodatkowe przekroje w postaci międzywręgów. Wprowadzenie dodatkowych międzywręgów do obliczonego pola ma także wpływ na współczynniki wagowe, np. współczynniki Simpsona. W przypadku jak na rys. 3.5 całe pole S można podzielić na elementy S_1, S_2 i S_3. Wówczas

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
E-5
33%



Rys. 3.5

$$S_1 = \frac{2}{3}\frac{d}{2}\left(\frac{1}{2}y_o + 2y_{1/2} + \frac{1}{2}y_1\right) = \frac{2}{3}d\left(\frac{1}{4}y_o + y_{1/2} + \frac{1}{4}y_1\right),$$

$$S_2 = \frac{2}{3}d\left(\frac{1}{2}y_1 + 2y_2 + \frac{1}{2}y_3\right),$$

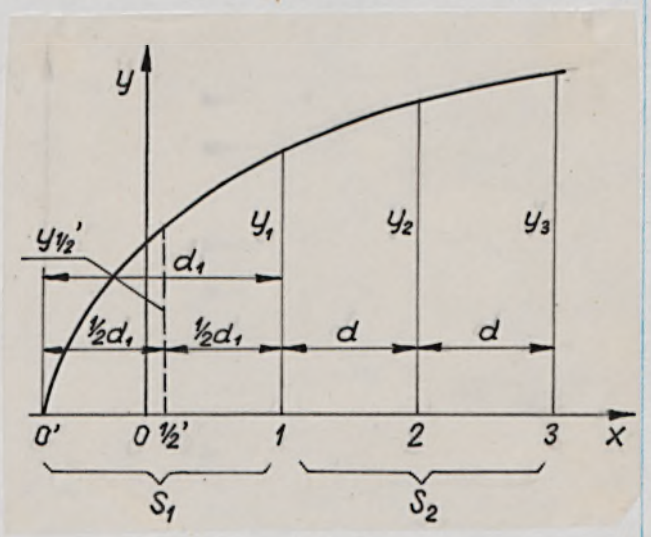
$$S_3 = \frac{2}{3}d\left(\frac{1}{2}y_3 + 2y_4 + \frac{1}{2}y_5\right),$$

a całe pole będzie równe sumie pól składowych

$$S = \sum S_i = \frac{2}{3}d\left(\frac{1}{4}y_o + y_{1/2} + \frac{3}{4}y_1 + 2y_2 + y_3 + 2y_4 + \frac{1}{2}y_5\right),$$

czyli współczynniki Simpsonowskie dla tego przypadku są odpowiednio równe: $\frac{1}{4}$; 1; $\frac{3}{4}$; 2; 1; 2; $\frac{1}{2}$.

Bardzo często na liniach teoretycznych widać, że początkowy lub końcowy przebieg wodnicy nie kończy się na zasadniczym podziale wręgowym. Wówczas, aby zachować przed sumą rzędnych stały czynnik $\frac{2}{3}d$, należy wprowadzić współczynnik lub współczynniki poprawkowe. W przypadku przykładu jak na rys. 3.6, po wprowadzeniu współczynnika poprawkowego



Rys. 3.6

$$\lambda_1 = \frac{d_1}{d}$$

powierzchnia S_1 będzie równa

$$S_1 = \frac{2}{3}\frac{d_1}{2}\left(\frac{1}{2}y_{o'} + 2y_{1/2'} + \frac{1}{2}y_1\right) = \frac{2}{3}d\left(\frac{1}{4}\lambda_1 y_{o'} + \lambda_1 y_{1/2'} + \frac{1}{4}\lambda_1 y_1\right).$$

Drugi podprzedział ma odstęp zasadniczy d, więc

11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$$S_2 = \frac{2}{3} d\left(\frac{1}{2} y_1 + 2 y_2 + \frac{1}{2} y_3\right),$$

stąd pole pod krzywą określa wzór

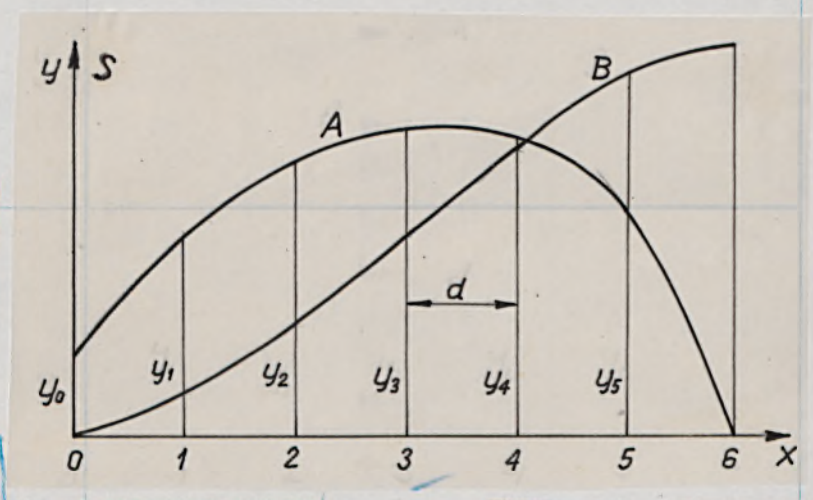
$$S = \frac{2}{3} d\left[\frac{\lambda_1}{4} y_o + \lambda_1 \cdot y_{1/2} + \left(\frac{\lambda_1}{4} + \frac{1}{2}\right) y_1 + 2 y_2 + \frac{1}{2} y_3\right].$$

Podsumowując można powiedzieć, że międzyrzędne stosuje się przy obliczaniu powierzchni w częściach skrajnych okrętu:

1) w celu podniesienia dokładności wyniku w zakresie dużych krzywizn,
2) gdy ilość podprzedziałów jest nieparzysta, a wprowadzenie dodatkowej rzędnej utworzy podprzedziały umożliwiające zastosowanie wzoru Simpsona.

Pamiętając jedynie podstawowy wzór Simpsona I, przy rozpatrywaniu dowolnej powierzchni określonej rzędnymi, należy zawsze wyodrębnić przedziały podstawowe określone trzema rzędnymi, a następnie dodając rzędne ze wzorów składowych uzyska się odpowiedni współczynnik Simpsonowski przynależny poszczególnej rzędnej. Systematyczne wyprowadzenie współczynników pozwoli na uniknięcie wielu zbędnych pomyłek w późniejszych, schematycznych już, obliczeniach.

Nasuwa się jeszcze uwaga dotycząca zastosowania wzoru trapezów. Wzór ten z uwagi na to, że nie ma żadnych ograniczeń dotyczących ilości przedziałów, szczególnie chętnie stosuje się w obliczeniach wymagających zmiennej górnej granicy całkowania, tzn. gdy chcemy mieć kolejne wartości pola do danego przekroju. Przykładem może być dystrybuanta rozkładu.



Rys. 3.7

W statyce okrętu wzór ten ma zastosowanie do obliczania pola pod krzywą ramion stateczności statycznej, co daje w efekcie tzw. miarę stateczności dynamicznej, lub do obliczania pola pod krzywą pól wręgowych, co określa objętość w zagadnieniach niezatapialności. Stosując wzór trapezów dla przykładu jak na rys. 3.7, i obliczając kolejno wartości pola pod krzywą A do poszczególnych rzędnych mamy następujące wartości:

$$\begin{aligned} S_{o1} &= \frac{d}{2}(y_o + y_1), \\ S_{o2} &= \frac{d}{2}(y_o + 2 y_1 + y_2), \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ S_{on} &= \frac{d}{2}(y_o + 2 y_1 + 2 y_2 + \ldots\ldots + 2 y_{n-1} + y_n). \end{aligned} \qquad (3.8)$$

Wartości te można przedstawić na rys. 3.7 w postaci rzędnych krzywej B. Do takich obliczeń bardzo wygodny jest schemat przedstawiony w tabeli

8. 11. 1984
B-5
33%

3.2, gdzie strzałki wskazują kolejność dodawania do siebie poszczególnych rzędnych, w wyniku czego uzyskuje się wartości w nawiasie we wzorach (3.8).

Tabela 3.2

Nr rzędnej	0	1	2	3	4	5	6
Rzędna y_i	y_o	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
$\sum$	0	y_o+y_1	y_o+2y+y_2	$y_o+2_y+2y_2+y_3$			
$B_i=\frac{d}{2}\sum$	0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6

Przykład 3.1

W tabeli 3.3 podane są wartości rzędnych określające krzywą. Odstęp między rzędnymi wynosi d = 0,5. Obliczyć wzorem trapezów wartości całki do poszczególnych rzędnych.

Rozwiązanie:

Obliczenia wykonane są w tabeli 3.3 przy wykorzystaniu schematu podanego w tabeli 3.2.

Tabela 3.3

Nr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y_i	0	0,19	0,36	0,54	0,67	0,63	0,53	0,27	-0,19	-1,34
$\sum$	0	0,19	0,74	1,64	2,85	4,15	5,31	6,11	6,19	4,66
$0,25\sum$	0	0,05	0,18	0,41	0,71	1,04	1,33	1,53	1,55	1,16

3.2. Obliczenie współrzędnych środka ciężkości pola

Jeśli dana jest krzywa, jak np. na rys. 3.8a, to współrzędne środka ciężkości pola pod tą krzywą oblicza się dzieląc moment statyczny tego pola względem wybranej osi przez wartość tego pola. Do obliczenia odciętej środka ciężkości pola x_c należy obliczyć moment statyczny pola względem osi y (lub innej dowolnej osi równoległej do niej). Jeśli elementarne pole jest równe dS = ydx, to jego moment statyczny dm_y = xydx. Moment statyczny całego pola jest równy

$$m_y = \int_l xydx. \qquad (3.9)$$

Gdy krzywa nie jest określona równaniem, lecz dany jest jej wykres, a więc rzędne w dowolnym punkcie mogą być pomierzone, wówczas całkę (3.9) obliczyć można numerycznie. Po zastosowaniu wzoru Simpsona moment ten będzie równy:

8. 11. 1984
B-5
33°/₀

$$m_y = \frac{2}{3} d \sum_{i=0}^{n} x_i y_i c_{s_i} ,$$

co jest równoznaczne z obliczeniem pola pod krzywą z rys. 3.8b, gdzie każda rzędna przedstawia tu iloczyn rzędnej y_i przez jej odległość od wybranej osi odniesienia x_i.

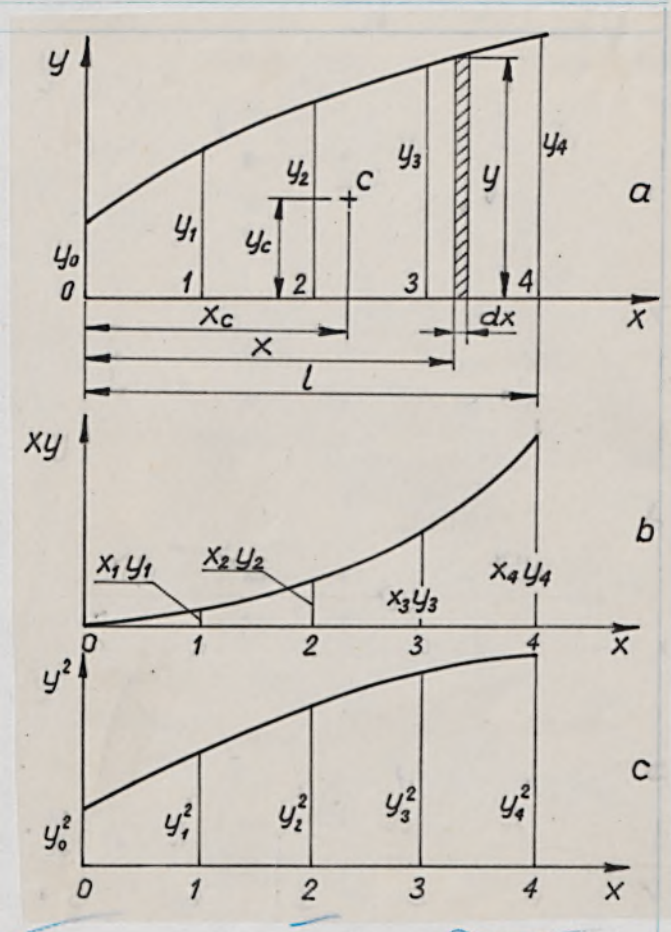
W obliczeniach okrętowych, z uwagi na duże wymiary kadłuba, odciętą x_i wygodnie jest przedstawić w postaci bezwymiarowej $i = \frac{x_i}{d}$, gdzie d jest odstępem między rzędnymi. Wówczas:

$$m_y = \frac{2}{3} d^2 \sum_{i=0}^{n} i \cdot y_i \cdot c_{s_i}, \qquad (3.10)$$

gdzie i jest numerem przekroju.

Odciętą środka ciężkości pola można więc obliczyć:

$$x_c = \frac{m_y}{S} = \frac{\int xydx}{\int ydx} = d \frac{\sum i \cdot y_i \cdot c_{s_i}}{\sum y_i \cdot c_{s_i}} . \qquad (3.11)$$



Rys. 3.8

Moment statyczny pola obliczyć można - mając rzędne wyznaczające rozpatrywane pole - dowolną metodą przybliżoną. W przypadku użycia wzoru trapezów, przy odciętej wyrażonej w postaci bezwymiarowej moment ten jest równy:

$$m_y = d^2 \left(\sum_{i=0}^{n} i \cdot y_i - \varepsilon_1 \right), \qquad (3.12)$$

gdzie:

$$\varepsilon_1 = \frac{0 \cdot y_o + n y_n}{2} = \frac{n \cdot y_n}{2} .$$

Stosując wzór Czebyszewa

$$m_y = \frac{1}{n} \sum x_i y_i , \qquad (3.13)$$

gdzie n jest ilością rzędnych użytych w tej metodzie.

Ponieważ odcięte są tu rozmieszczone zgodnie ze współczynnikiem Czebyszewa, uzależnionym od ilości rzędnych $x_i = \pm k \frac{1}{2}$, więc:

$$m_y = \frac{1^2}{2n} \sum k_i \cdot y_i , \qquad (3.14)$$

gdzie: k jest współczynnikiem Czebyszewa, a oś odniesienia znajduje się tu w połowie długości całkowanego przedziału l.

Do obliczenia rzędnej środka ciężkości pola y_c konieczne jest obliczenie momentu statycznego względem osi x. Taki elementarny moment statyczny jest równy $dm_x = \frac{1}{2} ydS = \frac{1}{2} y^2 dx$, a cały moment

$$m_x = \frac{1}{2} \int_l y^2 dx. \tag{3.15}$$

Wartość tego momentu jest równoznaczna połowie pola pod krzywą y^2 przedstawioną na rysunku 3.8c, co w postaci wzoru Simpsona jest równe

$$m_x = \frac{1}{3} d \sum_{i=0}^{n} y_i^2 \cdot c_{s_i}.$$

Rzędna środka ciężkości rozpatrywanego pola jest więc równa

$$y_c = \frac{m_x}{S} = \frac{\int_l y^2 dx}{2\int_l ydx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_i y_i^2 \cdot c_{s_i}}{\sum_i y_i \cdot c_{s_i}}. \tag{3.16}$$

Przy wykorzystaniu metody trapezów moment ten jest równy

$$m_x = \frac{1}{2} d(\sum_i y_i^2 - \varepsilon_2), \tag{3.17}$$

gdzie: $$\varepsilon_2 = \frac{y_o^2 + y_n^2}{2},$$

a stosując wzór Czebyszewa otrzymujemy

$$m_x = \frac{1}{2}(\frac{1}{n}) \sum_i y_i^2. \tag{3.18}$$

W przypadku gdy rozpatrywanym polem jest wodnica, momenty statyczne będą dwukrotnie większe, lecz ponieważ i pole wodnicy jest dwa razy większe, wzory (3.11) i (3.16) na x_c i y_c nie ulegają zmianie.

Ponieważ dla obliczeń okrętowych przyjęto początek układu współrzędnych w płaszczyźnie owręża, stąd funkcja podcałkowa xy ma charakter dwugałęziowy:

$$m_y = \int_{-\frac{l}{2}}^{0} xydx + \int_{0}^{+\frac{l}{2}} xydx. \tag{3.19}$$

Jeżeli przyjąć, że wodnica rozciąga się od pionu rufowego do pionu dziobowego, to moment statyczny pola wodnicy względem owręża wyrażony jest dwoma składnikami:

$$m_y = \frac{4}{3} d^2(\sum_{i=-5}^{o} i \cdot y_i \cdot c_{s_i} + \sum_{i=0}^{i=5} i \cdot y_i \cdot c_{s_i}),$$

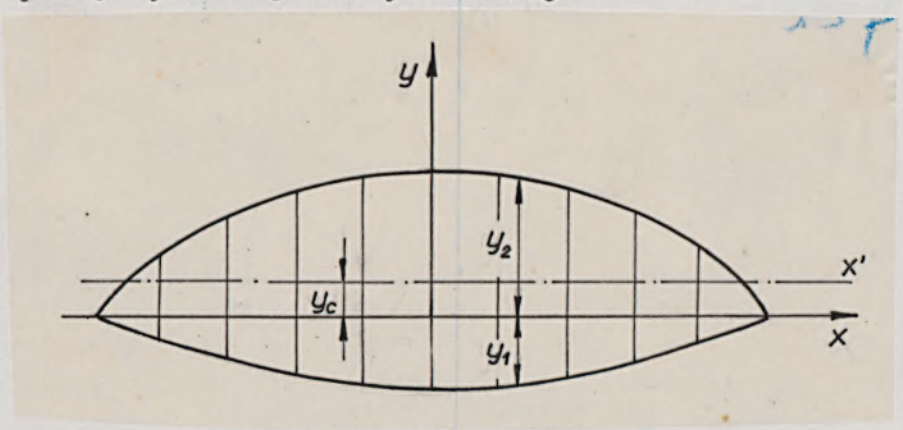
gdzie pierwszy składnik jest ujemny. Znak momentu m_y, a tym samym odciętej środka ciężkości wodnicy x_c (popularna jest także nazwa „środek pływania" - w literaturze angielskiej „centre of flotation LCF") wskazuje czy środek ten znajduje się od owręża w kierunku dziobu (znak +), czy w kierunku rufy (znak -). Dla statku pływającego bez przechyłu wodnica

6. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/83
B-5
33%

względem osi x jest symetryczna i $y_c = 0$. Jeżeli jednak statek jest przechylony, a niektóre wręgi są rozchylone, wówczas wodnica pływania jest niesymetryczna i $y_c \neq 0$. Należy wówczas uwzględniać rzędne po obu burtach statku. Moment statyczny względem osi x będącej osią pierwotnej płaszczyzny symetrii jest równy

$$m_x = \frac{1}{2} \int_L (y_2^2 - y_1^2)\,dx, \qquad (3.20)$$

gdzie: y_2 są rzędnymi części zanurzonej,
y_1 są rzędnymi części wynurzonej.



Rys. 3.9

Całka ta, wyrażona wzorem Simpsona, równa się

$$m_x = \frac{1}{3} d\left[\sum_{i=-5}^{i=5} (y_{2i}^2 - y_{1i}^2) c_{s_i}\right], \qquad (3.21)$$

a rzędna środka ciężkości pola wodnicy

$$y_c = \frac{\sum (y_{2i}^2 - y_{1i}^2) c_{s_i}}{2 \sum (|y_{2i}| + |y_{1i}|) c_{s_i}}. \qquad (3.22)$$

Moment m_x, w tym przypadku określony wzorem trapezów, jest równy

$$m_x = \frac{1}{2} d \left[\sum_{i=-5}^{i=5} (y_{2i}^2 - y_{1i}^2) - \varepsilon_3\right], \qquad (3.23)$$

gdzie:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2}\left[(y_{2(-5)}^2 - y_{1(-5)}^2) + (y_{2(5)}^2 - y_{1(5)}^2)\right],$$

a wzorem Czebyszewa

$$m_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{n} \sum_i (y_{2i}^2 - y_{1i}^2). \qquad (3.24)$$

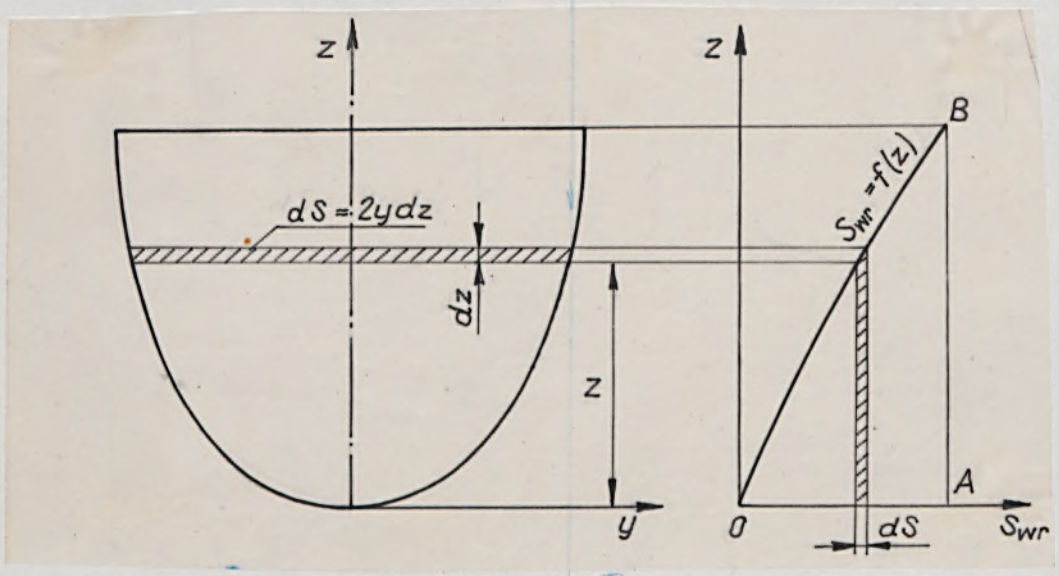
Przy obliczaniu odciętej środka ciężkości powierzchni wodnicy niesymetrycznej x_c także należy uwzględniać rzędne po obu stronach osi x

$$m_x = \frac{2}{3} d \sum_i x_i y_i c_{s_i} = \frac{2}{3} d^2 \left[\sum_i i(|y_{2i}| + |y_{1i}|) c_{s_i}\right] \qquad (3.25)$$

a odcięta środka ciężkości takiej wodnicy jest równa

$$x_c = d\,\frac{\sum_i i(|y_{2i}| + |y_{1i}|)c_{s_i}}{\sum_i (|y_{2i}| + |y_{1i}|)c_{s_i}}\,. \qquad (3.26)$$

Przy przyjętym układzie współrzędnych, gdzie formalnie rzędne prawej burty są dodatnie, a lewej ujemne, przyjęto we wzorach (3.22), (3.25) i (3.26), by uniknąć błędu, bezwzględne wartości rzędnych, gdyż przechył może być zarówno na lewą jak i na prawą burtę, a powierzchnia wodnicy ma zawsze wartość dodatnią.



Rys. 3.10

W obliczeniach okrętowych bardzo często określa się pola przekrojów za pomocą planimetru. Stosuje się takie mechaniczne urządzenia zwłaszcza do określania pola przekrojów wrężnicowych, gdyż na liniach teoretycznych przekroje te nie są zbyt wielkie i planimetr obejmuje cały ich kontur. Po wykreśleniu np. pola wrężnicy w funkcji jego wysokości (rys. 3.10), łatwo można określić moment statyczny tego pola względem podstawy. Elementarny moment statyczny pola względem osi y wynosi $dm_y = zdS$, a cały moment

$$m_y = \int_0^S zdS, \qquad (3.27)$$

co odpowiada polu pod krzywą S_{wr}, czyli polu OAB na rys. 3.10. Jeśli przyjętym wartościom z_i przyporządkowane są wartości pól S_i, to moment ten można łatwo obliczyć przez zmianę kierunku całkowania na oś z i wyznaczenie pola nad krzywą S_{wr}

$$m_y = \int_0^S zdS = z\cdot S - \int_0^z Sdz, \qquad (3.28)$$

co stanowi geometryczną interpretację całkowania przez części.

Przykład 3.2

Dane jest półkole o promieniu r = 2 m. Obliczyć rzędną środka ciężkości tego pola względem średnicy, wykorzystując wzór Czebyszewa dla trzech rzędnych.

S. 11. 1984
S/14/85 PG MS
B-5
33%

Rozwiązanie

Dla n = 3 współczynniki Czebyszewa wynoszą: $k_i = 0; \pm 0{,}7071$. Odcięte rzędnych są więc równe: $x_i = k_i \cdot r$ czyli $x_1 = -1{,}414$ m; $x_2 = 0$; $x_3 = +1{,}414$ m, a odpowiadające im rzędne $y = \sqrt{r^2 - x^2}$: $y_1 = 1{,}415$ m; $y_2 = 2$ m; $y_3 = 1{,}415$ m.

Należy obliczyć sumę rzędnych i ich kwadratów.

Tabela 3.4

Nr	y	y^2
1	1,415	2,001
2	2,000	4,000
3	1,415	2,001
$\sum$	4,830	8,002

Moment statyczny pola względem średnicy

$$m_x = \frac{1}{2}\int_{-r}^{+r} y^2 dx = \frac{1}{2}\,\frac{2r}{n}\sum_i y_i^2 = \frac{2}{3}\sum_i y_i^2 .$$

Pole półokręgu

$$S = \frac{2r}{n}\sum_i y_i = \frac{4}{3}\sum y_i = 6{,}438\ \mathrm{m}^2.$$

Rzędna środka ciężkości pola

$$y_c = \frac{m_x}{S} = \frac{\sum_i y_i^2}{2\sum_i y_i} = \frac{8{,}002}{2 \cdot 4{,}830} = 0{,}829\ \mathrm{m}.$$

Pole półkola obliczone wzorem $\frac{1}{2}\pi r^2 = 6{,}283\ \mathrm{m}^2$, a rzędna środka ciężkości $y_c = \frac{4r}{3\pi} = 0{,}849$ m.

Przykład 3.3

Podane są dla różnych wysokości wartości pola owręża małego trawlera rybackiego. Obliczyć rzędną środka ciężkości owręża dla wysokości z = 2 m.

Tabela 3.5

z(m)	0	0,5	1,0	1,5	2,0
S_{wr} (m^2)	0	1,3	4,0	7,2	10,8

Rozwiązanie

Ponieważ w równych odstępach z podane są wartości S_{wr}, można tu więc zastosować wzór (3.28)

$$m_y = z \cdot S - \int_0^z S dz$$

a całkę rozwiązać tabelarycznie wzorem Simpsona.

Tabela 3.6

z(m)	S_{wr} (m^2)	c_s	$S_{wr} \cdot c_s$
0	0	0,5	0
0,5	1,3	2	2,6
1,0	4,0	1	4,0
1,5	7,2	2	14,4
2,0	10,8	0,5	5,4
			$\sum$ =26,4

$$\int_0^z S_{wr}\, dz = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wr}\, c_s = \frac{2}{3} \cdot 0{,}5 \cdot 26{,}4 = 8{,}80\ m^3$$

Moment statyczny pola owręża względem podstawy

$$m_y = z \cdot S_{wr} - \int_0^z S_{wr}\, dz = 2 \cdot 10{,}8 - 8{,}80 = 12{,}8\ m^3,$$

a rzędna środka ciężkości pola

$$z_C = \frac{m_y}{S_{wr}} = \frac{12{,}8}{10{,}8} = 1{,}19\ m.$$

3.3. Obliczenie momentów bezwładności pola

Elementarny moment bezwładności rozpatrywanego na rys. 3.8a pola względem osi y jest równy $di_y = x^2 dS = x^2 y dx$, a cały moment

$$i_y = \int_l x^2 y dx \,. \qquad (3.29)$$

W całkowaniu numerycznym sprowadza się to do obliczenia pola wyznaczonego przez rzędne równe iloczynowi rzędnej y przez kwadrat jej odległości od przyjętego układu odniesienia.

Przy zastosowaniu wzoru Simpsona moment ten jest określony w postaci

$$i_y = \frac{2}{3} d^3 \sum_{i=0}^{n} i^2\, y_i \cdot c_{s_i}, \qquad (3.30)$$

gdzie: $i = \frac{x_i}{d}$.

Moment bezwładności pola wyrażony wzorem trapezów jest równy

$$i_y = d^3 \Big(\sum_{i=0}^{n} i^2 y_i - \varepsilon_4 \Big), \qquad (3.31)$$

gdzie: $\varepsilon_4 = \frac{n^2 \cdot y_n^2}{2}$,

a wzorem Czebyszewa

$$i_y = \frac{1}{n} \sum_i x_i^2 y_i = \frac{1^3}{4n} \sum_i k_i^2 y_i . \qquad (3.32)$$

Elementarny moment bezwładności względem osi x jest równy $di_x = \frac{1}{3} y^3 dx$, a cały moment

$$i_x = \frac{1}{3} \int_L y^3 dx , \qquad (3.33)$$

co jest równoznaczne trzeciej części pola pod krzywą wykreśloną na sześcianach rzędnych. Moment ten określony wzorem Simpsona jest równy

$$i_x = \frac{2}{9} d \sum_{i=0}^{n} y_i^3 c_{s_i} , \qquad (3.34)$$

wzorem trapezów

$$i_x = \frac{1}{3} d \left(\sum_{i=0}^{n} y_i^3 - \varepsilon_5 \right), \qquad (3.35)$$

gdzie: $\varepsilon_5 = \frac{y_o^3 + y_n^3}{2}$,

a według Czebyszewa

$$i_x = \frac{1}{3n} \sum_i y_i^3 . \qquad (3.36)$$

Gdy należy obliczyć momenty bezwładności pola względem osi przechodzących przez środek ciężkości tego pola, wykorzystuje się wzór Steinera, Wówczas

$$\begin{aligned} i_{\bar{x}} &= i_x - S \cdot y_C^2 , \\ i_{\bar{y}} &= i_y - S \cdot x_C^2 . \end{aligned} \qquad (3.37)$$

W obliczeniach okrętowych tak określone momenty bezwładności pól mają zastosowanie przy uwzględnianiu wpływu swobodnych powierzchni płynów w zbiornikach na stateczność okrętu.

W przypadku, gdy rozpatruje się wodnicę statku, moment J_y wg wzoru Simpsona i przyjętego układu jest równy

$$J_y = \frac{4}{3} d^3 \sum_{i=-5}^{i=5} i^2 \cdot y_i \cdot c_{s_i} , \qquad (3.38)$$

a względem osi przechodzącej przez środek ciężkości pola wodnicy

$$J_{\bar{y}} = J_y - S_{wL} \cdot x_C^2 . \qquad (3.39)$$

Moment bezwładności pola wodnicy względem płaszczyzny symetrii okrętu jest równy

$$J_x = \frac{4}{9} d \sum_i y_i^3 c_{s_i}. \qquad (3.40)$$

Wzory te mają zastosowawie dla wodnicy symetrycznej względem osi x. W przypadku jednak wodnicy niesymetrycznej względem osi x, np. dla statku płynącego z przechyłem lub dla niesymetrycznego pływaka katamaranu, należy uwzględniać pomierzone rzędne po obu burtach kadłuba, wówczas

$$J_y = \frac{2}{3} d^3 \sum_i i^2(|y_{2i}| + |y_{1i}|)c_{s_i} \qquad (3.41)$$

i

$$J_x = \frac{2}{9} d \sum_i (|y_{2i}^3| + |y_{1i}^3|)c_{s_i}. \qquad (3.42)$$

Po sprowadzeniu do osi przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy stosuje się wzór (3.39) oraz

$$J_{\bar{x}} = J_x - S_{wL} \cdot y_c^2 . \qquad (3.43)$$

Przykład 3.4

Poziomy przekrój zbiornika okrętowego określony jest pięcioma rzędnymi o odstępie d = 0,9 m.

Tabela 3.7

Nr	0	1	2	3	4
y_i(m)	1,90	2,89	3,23	3,30	3,32

Obliczyć momenty bezwładności tego pola względem osi x i y przechodzących przez środek ciężkości tej powierzchni.

Rozwiązanie:

Obliczenia wykonane zostaną w formie tabelarycznej w oparciu o wzór Simpsona.

Tabela 3.8

Nr	Rzędna y_i(mm)	c_{s_i}	Iloczyn $y_i c_{s_i}$	i	Iloczyn $i \cdot y_i c_{s_i}$	Iloczyn $i^2 \cdot y_i \cdot c_{s_i}$	Iloczyn $y_i^2 c_{s_i}$	Iloczyn $y_i^3 \cdot c_{s_i}$
0	1,90	0,5	0,95	0	0	0	1,80	3,43
1	2,89	2	5,78	1	5,78	5,78	16,70	48,28
2	3,23	1	3,23	2	6,46	12,92	10,43	33,70
3	3,30	2	6,60	3	19,80	59,40	21,78	71,87
4	3,32	0,5	1,66	4	6,64	26,54	5,51	18,30
		$\sum$	18,22		38,68	104,66	56,22	175,58

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Pole przekroju $S = \frac{2}{3} d \sum yc_s = \frac{2}{3} \cdot 0,9 \cdot 18,22 = 10,93 \ m^3$.

Odcięta środka ciężkości pola

$$x_c = d \frac{\sum i \cdot y \cdot c_s}{\sum y \cdot c_s} = 0,9 \frac{38,68}{18,22} = 1,91 \ m.$$

Moment bezwładności pola względem rzędnej 0

$$i_y = \frac{2}{3} d^3 \sum i^2 \cdot y \cdot c_s = \frac{2}{3} \cdot 0,9^3 \cdot 104,66 = 50,86 \ m^4.$$

Moment bezwładności pola względem osi y przechodzącej przez punkt C

$$i_{\overline{y}} = i_y - S \cdot x_c^2 = 50,86 - 10,93 \cdot 1,91^2 = 10,99 \ m^4.$$

Rzędna środka ciężkości pola

$$y_c = \frac{1}{2} \frac{\sum y^2 c_s}{\sum y \ c_s} = \frac{56,22}{2 \cdot 18,22} = 1,54 \ m.$$

Moment bezwładności pola względem podstawy

$$i_x = \frac{2}{9} d \sum y^3 c_s = \frac{2}{9} \cdot 0,9 \cdot 175,58 = 35,12 \ m^4.$$

Moment bezwładności pola względem osi x przechodzącej przez punkt C

$$i_{\overline{x}} = i_x - S y_c^2 = 35,12 - 10,93 \cdot 1,54^2 = 9,19 \ m^4.$$

B-5
33%

4. ELEMENTY HYDROSTATYCZNE KADŁUBA OKRĘTU

„W gruncie rzeczy sztuka władania okrętami jest może piękniejsza niż sztuka władania ludźmi"

4.1. Wyrażenia ogólne

Objętość i współrzędne środka objętości dowolnej bryły można wyrazić zależnościami

$$V = \iiint_V dxdydz \tag{4.1}$$

$$\left.\begin{aligned} x_F &= \frac{M_{vyz}}{V} = \frac{1}{V}\iiint_V x\,dxdydz \\ y_F &= \frac{M_{vxz}}{V} = \frac{1}{V}\iiint_V y\,dxdydz \\ z_F &= \frac{M_{vxy}}{V} = \frac{1}{V}\iiint_V z\,dxdydz \end{aligned}\right\} \tag{4.2}$$

Rozwiązanie w tej postaci całki potrójnej jest praktycznie bardzo kłopotliwe. Jeśli jednak do obliczenia objętości i jej momentów statycznych wykorzystamy obliczone uprzednio pola przekrojów, wówczas całkę potrójną zastąpić można całką pojedynczą. Linie teoretyczne kadłuba są zbiorem konturów przedstawiających trzy prostopadłe do siebie przekroje wrężnicowe, wodnicowe i wzdłużnicowe. Przekroje te można zatem z powodzeniem wykorzystać do ww. obliczeń.

W przypadku okrętu zanurzonego do określonej wodnicy objętość podwodnej części kadłuba nazywana jest wyporności ą, wyporności ą objętościową lub objętości ą podwodzia, środek zaś tej objętości - środkiem wyporu.

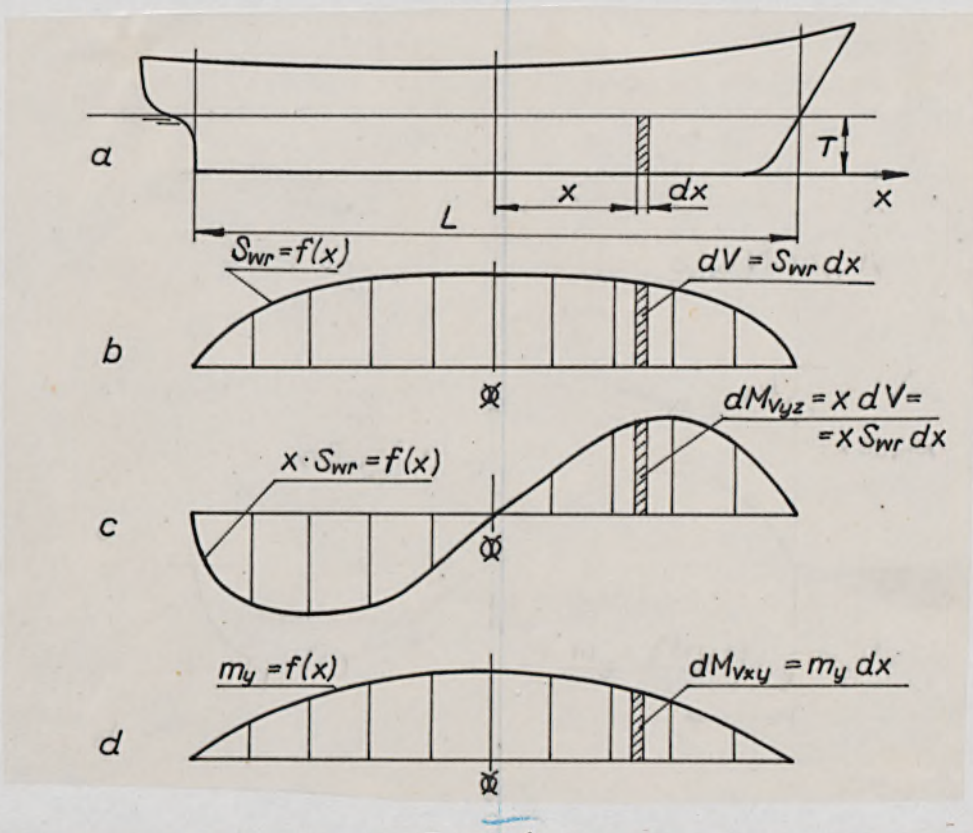
4.2. Obliczenia za pomocą pól wrężnicowych

Gdy dany jest okręt o zanurzeniu z = T i jeśli jego kadłub przeciąć dwoma równoległymi nieskończenie blisko siebie leżącymi płaszczyznami po-

E. 11. 1984
B-5
33%

przecznymi (równolegle do płaszczyzny yz), to wyznaczają one elementarną objętość ograniczoną powierzchniami S_{wr} i grubością dx czyli $dV = S_{wr}\,dx$. Całkowita zaś objętość podwodnej części okrętu będzie

$$V = \int_L S_{wr}\,dx. \qquad (4.3)$$



Rys. 4.1

Całka ta przedstawia pole pod krzywą pól wrężnicowych wykreślonych w funkcji długości statku (rys. 4.1). Aby zbudować taki wykres, należy więc określić do zadanej wodnicy pola wszystkich przekrojów wrężnicowych, jakie przedstawione są na liniach teoretycznych. W praktycznych obliczeniach można pominąć wykonanie takiego wykresu i od razu rozwiązać tę całkę w sposób numeryczny, np. wzorem Simpsona. Wówczas objętość równa się

$$V = \frac{2}{3}\,d \sum_i S_{wr_i}\,c_{s_i}\,. \qquad (4.4)$$

Wykres taki, lecz ograniczony jedynie do części rufowej i dziobowej, może być przydatny do określenia współczynników poprawkowych λ oraz do interpolacji wartości pola w przypadku wprowadzenia nowej rzędnej.

Do obliczenia odciętej środka wyporu należy znaleźć najpierw moment statyczny objętości względem owręża. Elementarny taki moment jest równy $dM_{vyz} = xdV = x\,S_{wr}\,dx$, gdzie x jest odległością dowolnego przekroju wrężnicowego od przyjętej płaszczyzny odniesienia. Moment statyczny całej objętości jest zatem równy

$$M_{vyz} = \int_L x\,S_{wr}\,dx, \qquad (4.5)$$

a mierząc odcięte x od owręża

$$M_{vyz} = \int_{-L/2}^{0} x\, S_{wr}\, dx + \int_{0}^{L/2} x\, S_{wr}\, dx.$$

Moment ten, podobnie jak i moment statyczny pola wodnicy, składa się z dwu gałęzi krzywych. Przebieg funkcji podcałkowej, otrzymanej jako iloczyn obliczonych uprzednio wartości pól wrężnicowych przez ich odległości od płaszczyzny owręża, przedstawia rys. 4.1c. Pole pod taką krzywą oblicza się numerycznie, podobnie jak w poprzednich przypadkach, np. wzorem Simpsona.

$$M_{vyz} = \frac{2}{3} d^2 \sum_i i \cdot S_{wr_i} c_{s_i}, \qquad (4.6)$$

gdzie $i = \frac{x_i}{d}$ jest bezwymiarową odległością danego przekroju wrężnicowego od owręża. Odcięta środka wyporu jest więc równa

$$x_F = \frac{M_{vyz}}{V} = \frac{\int_L x\, S_{wr}\, dx}{\int_L S_{wr}\, dx} = d\, \frac{\sum_i i \cdot S_{wr_i} c_{s_i}}{\sum_i S_{wr_i} c_{s_i}}. \qquad (4.7)$$

Znak „minus" informuje, że środek wyporu znajduje się od owręża w kierunku rufy, a znak „plus" - w kierunku dziobu.

Ponieważ kadłub okrętu z reguły jest symetryczny względem płaszczyzny xz, stąd $y_F = 0$.

W przypadku np. niesymetrycznego kadłuba katamaranu, statku przechylonego lub zbiornika okrętowego należy obliczyć y_F. Wymaga to obliczenia najpierw momentu statycznego (lub pola przekroju i współrzędnej środka ciężkości tego pola y_c) wszystkich pól wrężnicowych względem płaszczyzny xz. Wówczas współrzędna środka objętości jest równa

$$y_F = \frac{M_{vxz}}{V} = \frac{\int_L S_{wr}\, y_c\, dx}{\int_L S_{wr}\, dx} = \frac{\sum_i S_{wr_i} y_{c_i} c_{s_i}}{\sum_i S_{wr_i} c_{s_i}}. \qquad (4.8)$$

Do obliczenia współrzędnej y_F pola wrężnicowe wykorzystywane są niezmiernie rzadko, gdyż tok postępowania jest tu dość uciążliwy, wymagający dla każdego przekroju, a jest ich dużo, obliczenia dodatkowo y_c. Niemniej obliczenia takie są możliwe do wykonania, co przedstawione będzie poniżej.

Moment statyczny objętości względem płaszczyzny podstawowej M_{vxy} można otrzymać przez całkowanie wzdłuż długości kadłuba momentów statycznych pól wrężnicowych. Elementarny taki moment jest równy $dM_{vxy} = S_{wr} z_c dx$, a cały moment

$$M_{vxy} = \int_L S_{wr} \cdot z_c dx. \qquad (4.9)$$

Powierzchnie S_{wr} i rzędne z_c dla każdego przekroju oblicza się wg poznanych już sposobów. Gdy mamy jednak wykres krzywej pola wrężnicowego w zależności od wysokości przekroju, jak na rys. 3.10, wówczas zamiast rzędnej z_c można od razu obliczyć moment statyczny pola przekroju wg

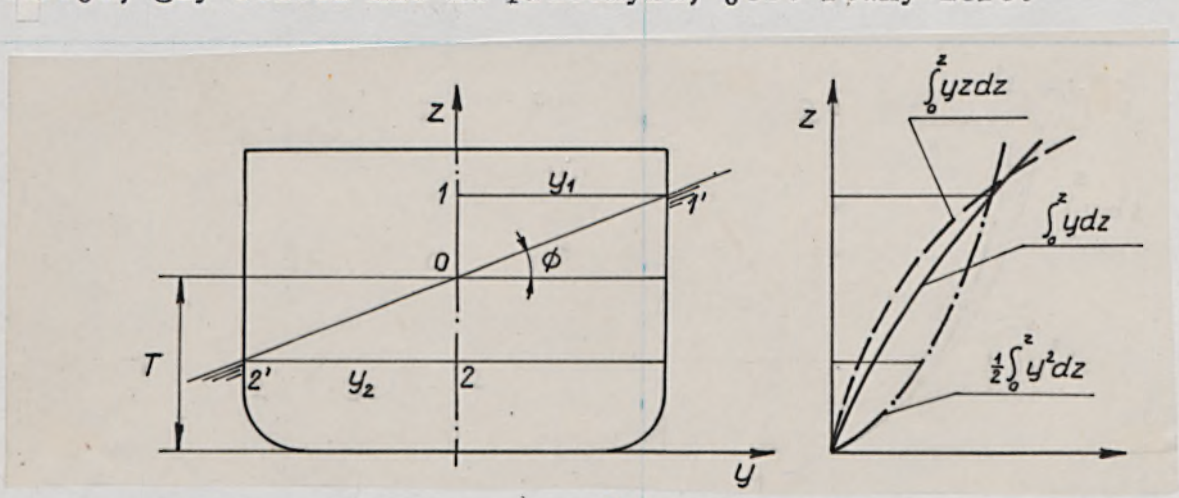
wzoru (3.27) i ew. (3.28). Wówczas uwzględniając momenty statyczne pól względem płaszczyzny podstawowej dla wszystkich przekrojów wrężnicowych moment statyczny objętości dla całego kadłuba względem płaszczyzny podstawowej jest równy

$$M_{vxy} = \int_L m_y \, dx = \frac{2}{3} d \sum_i m_{y_i} c_{s_i} . \qquad (4.10)$$

Rzędna środka wyporu jest ilorazem tego momentu przez wyporność, więc

$$Z_F = \frac{M_{vxy}}{V} = \frac{\int_L m_y dx}{\int_L S_{wr} dx} = \frac{\sum_i m_{y_i} c_{s_i}}{\sum_i S_{wr_i} c_{s_i}} . \qquad (4.11)$$

Gdy statek jest przechylony, można za pomocą przekrojów wrężnicowych obliczyć dla takiej wodnicy wyporność i współrzędną środka wyporu. Dla przykładu weźmy jeden przekrój zanurzony do wodnicy przechylonej o kąt Ø (rys. 4.2). Wykreślmy dla tego przekroju krzywą wyrażającą połowę pola przekroju $\frac{1}{2} S_{wr} = \int_0^z ydz$ dla statku nieprzechylonego, krzywą przedstawiającą połowę momentu statycznego pola względem płaszczyzny podstawowej $\frac{1}{2} m_y = \int_0^z yzdz$ oraz moment statyczny połowy przekroju wrężnicowego względem osi z, czyli $m_z = \frac{1}{2} \int_0^z y^2 dz$. Ten ostatni moment dla całego przekroju, gdy statek nie ma przechyłu, jest równy zero.



Rys. 4.2

Pole przekroju wrężnicowego poniżej takiej przechylonej wodnicy jest równe

$$S_{wr} = S_1 - y_1 \cdot \frac{1}{2} y_i tg\phi + S_2 + y_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot y_2 \cdot tg\phi = \qquad (4.12)$$

$$= S_1 + S_2 - \frac{1}{2}(y_1^2 - y_2^2) tg\phi ,$$

gdzie indeksem „1" oznaczone są wartości dotyczące części zanurzonej, a indeksem „2" - części wynurzonej. Pole S_1 odczytuje się z krzywej $\int_0^z ydz$ na wysokości punktu 1, a pole S_2 na wysokości punktu 2. Uwzględnia się tutaj nadmiar i niedomiar pola z trójkątów 011′ i 022′.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°/₀

W podobny sposób wyznacza się moment statyczny pola względem płaszczyzny podstawowej xy i moment statyczny względem osi z.

$$m_y = m_{y1} - \frac{1}{2}y_1^2 \operatorname{tg}\phi\,(T + \frac{2}{3}y_1 \operatorname{tg}\phi) + m_{y2} + \frac{1}{2}y_2^2 \operatorname{tg}\phi\,(T - \frac{2}{3}y_2 \operatorname{tg}\phi) =$$

$$= m_{y1} + m_{y2} - \frac{1}{2}(y_1^2 - y_2^2)T \operatorname{tg}\phi - \frac{1}{3}(y_1^3 + y_2^3)\operatorname{tg}^2\phi\,, \qquad (4.13)$$

$$m_z = m_{z1} - \frac{1}{2}y_1^2 \operatorname{tg}\phi \cdot \frac{1}{3}y_1 - (m_{z_2} + \frac{1}{2}y_2^2 \operatorname{tg}\phi \cdot \frac{1}{3}y_2) =$$

$$= m_{z_1} - m_{z_2} - \frac{1}{6}(y_1^3 + y_2^3)\operatorname{tg}\phi\,. \qquad (4.14)$$

Wykonując takie odczyty z krzywych i obliczenia według wzorów (4.12), (4.13) i (4.14) dla wszystkich przekrojów wrężnicowych, a następnie całkując je po długości kadłuba otrzymamy wyporność i momenty statyczne wyporności. Następnie łatwo już obliczyć współrzędne środka wyporu y_F i z_F. Przy znanej odległości między przekrojami wrężnicowymi obliczenie współrzędnej x_F nie przedstawia tu żadnego problemu [2].

Przykład 4.1

W tabeli 4.1 dane są w kolumnie 2 i 7 do określonej wysokości w dziobowej części statku rybackiego pola wrężnic S_{wr} oraz ich momenty statyczne względem płaszczyzny podstawowej m_y. Długość statku między pionami L = 23,6 m. Obliczyć objętość przedziału od wrężnicy 8 do pionu dziobowego oraz odciętą x_F i rzędną środka objętości z_F.

Rozwiązanie

Obliczenia wykonamy w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Nr wręgu	S_{wr} (m^2)	c_s	$S_{wr}c_s$ (m^2)	i	$S_{wr}\cdot i\cdot c_s$ (m^2)	m_y (m^2)	$m_y\cdot c_s$ (m^2)
1	2	3	4	5	6	7	8
8	9,0	0,5	4,5	0	0	16,0	8,0
8 1/2	6,0	2	12,0	1	12,0	11,0	22,0
9	3,2	1	3,2	2	6,4	7,0	7,0
9 1/2	1,2	2	2,4	3	7,2	2,2	4,4
10	0	0,5	0	4	0	0	0
		$\sum_1 = 22,1$		$\sum_2 = 25,6$		$\sum_3 = 41,4$	

Odstęp między wręgami $d = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{10} = 1,18$ m.

Objętość $V = \frac{2}{3} d \sum S_{wr}c_s = \frac{2}{3}\cdot 1,18 \cdot 22,1 = 17,39\ m^3$. Odcięta środka objętości

8. 11. 1984
B-5
33%

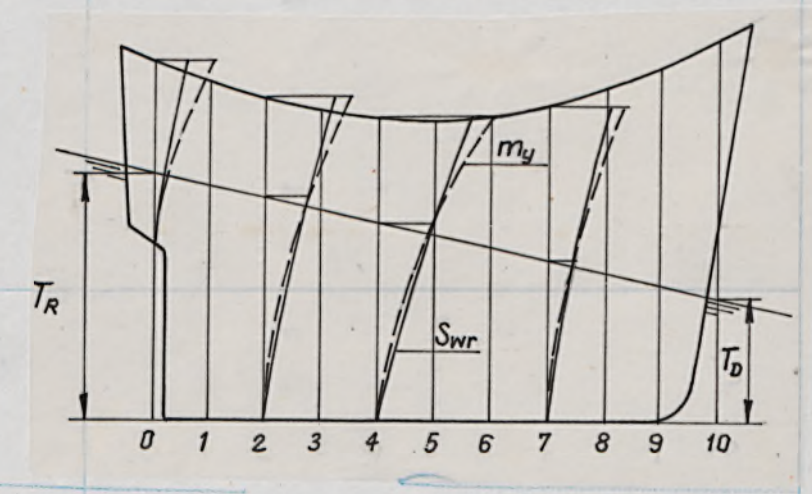
$$x_F = \frac{M_{vyz}}{v} = d\,\frac{\sum S_{wr}\cdot i\cdot c_s}{\sum S_{wr}\cdot c_s} = 1{,}18\,\frac{25{,}6}{22{,}1} = 1{,}37\ \text{m}.$$

Rzędna środka objętości

$$z_F = \frac{M_{vxy}}{v} = \frac{\sum m_y c_s}{\sum S_{wr} c_s} = \frac{41{,}4}{22{,}1} = 1{,}87\ \text{m}.$$

4.3. Skala Bonjeana

Aby zmniejszyć pracochłonność obliczenia wyporności i współrzędnych środka wyporu, biura obliczeniowe wykonują dla każdego statku zbiór krzywych pól wrężnicowych i ich momentów statycznych względem płaszczyzny podstawowej. Wykres taki jest jednym z podstawowych elementów dokumentacji okrętowej. Ma zastosowanie zarówno w pracach stoczniowych, jak i podczas eksploatacji statku. Krzywe te są wykreślone w funkcji wysokości aż do górnego pokładu wodoszczelnego dla wszystkich przekrojów poprzecznych podanych na liniach teoretycznych. Zbiór takich krzywych nazywa się skalą Bonjeana. Jest to wykres pomocniczy, który pozwala na szybkie obliczenie V, x_F i z_F dla dowolnego zanurzenia dziobu i rufy okrętu. Sprowadza się to do naniesienia na skalę Bonjeana, zgodnie z pomiarem zanurzeń, linii przedstawiającej aktualną wodnicę pływania. Wodnica ta (rys. 4.3) wyznacza wysokość, do jakiej jest zanurzony każdy przekrój wrężnicowy. Dla tych wysokości należy odczytać wartości pól S_{wr} dla poszczególnych wręgów oraz wartość momentów statycznych tych pól m_y. Całkując po długości kadłuba pola S_{wr} otrzymujemy objętość V (wzór 4.3), a wykorzystując odczytane momenty obliczymy rzędną środka wyporu z_F (wzór 4.11). Do obliczenia x_F (wzór 4.7) należy uwzględnić usytuowanie poszczególnych przekrojów wrężnicowych w stosunku do owręża. Czasem w literaturze można też spotkać określenia: krzywa $S_{wr}(z)$ - krzywa całkowa pola wrężnicowego, a $m_y(z)$ - druga całkowa pola wrężnicowego.



Rys. 4.3

Widać, jak istotną rolę odgrywają te dwie krzywe, określone dla wszystkich przekrojów wzdłuż długości statku. Statek pływa w różnym stanie załadowania, a znajomość jego wyporności i położenia środka wyporu odgrywa dużą rolę.

Dla ułatwienia korzystania z tego wykresu i zwiększenia dokładności wymiary wysokości powiększa się w stosunku do rysunku linii teoretycznych, przyjmując podziałkę prostą w odczycie. W części rufowej i dziobowej umieszcza się podziałkę zanurzeń przedstawioną w dm i w stopach

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/85
B-5
33%

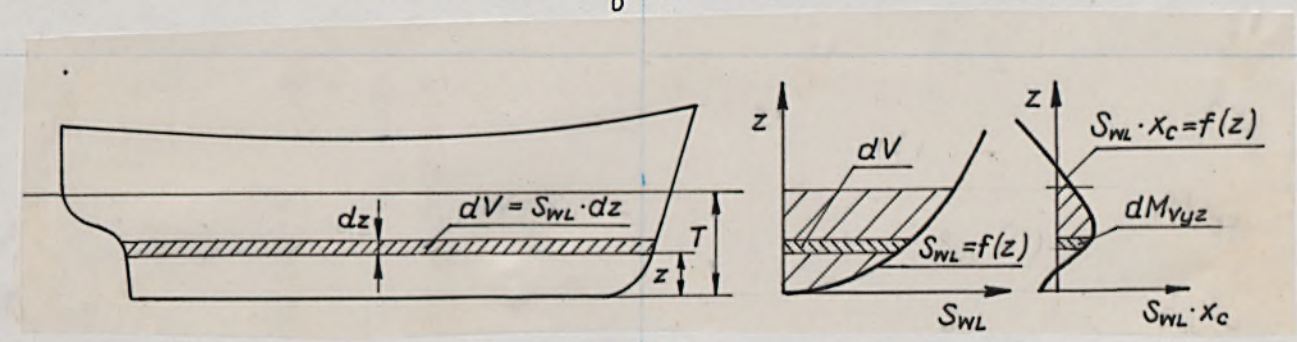
(1 stopa = 0,305 m), gdyż takie skale zaznaczone na pionie rufowym i dziobowym występują na statkach rzeczywistych. Długość statku na skali Bonjeana jest skrócona. Zaznacza się wszystkie przekroje poprzeczne w postaci linii pionowych rozciągających się od linii dna do pokładu włącznie. W przypadku użycia papieru milimetrowego istotne do dalszych odczytów jest to, aby przekrój wrężnicowy znajdował się na grubszej linii użytego papieru. Ważne są tu w kierunku poziomym skale krzywych $S_{wr}(z)$ i $m_y(z)$. Wykreślony obrys statku wyznacza tu linie graniczne kadłuba. Obrys służy m.in. do określenia długości wodnicy i ustalenia współczynników Simpsonowskich, co odnieść można do przedziału między przekrojami d. Stąd obrys taki przedstawia statek w bardzo mocno skażonej postaci. Trzeba jednak pamiętać, że nie jest to rysunek statku, lecz zbiór krzywych pól wrężnicowych i ich momentów statycznych względem podstawy statku bez przechyłu.

V statku bez przechyłu

4.4. Obliczenia za pomocą pól wodnicowych

Jeśli wyodrębni się przekrój wodnicowy o polu S_{wL} w odległości z od płaszczyzny podstawowej, a w nieskończenie bliskiej odległości dz drugi przekrój wodnicowy, to wodnice te ograniczają elementarny plaster kadłuba o objętości $dV = S_{wL}dz$. Objętość całego kadłuba do zanurzenia $z = T$ jest więc równa

$$V = \int_0^T S_{wL}dz. \qquad (4.15)$$



Rys. 4.4

Obliczenie tej całki sprowadza się do wyznaczenia pola zawartego między krzywą S_{wL} a osią z (rys. 4.4). Mając obliczone wartości pól wodnicowych S_{wL} dla wybranych zanurzeń, wyznaczamy objętość kadłuba za pomocą wzoru Simpsona

$$V = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wL_i} c_{s_i}, \qquad (4.16)$$

gdzie $d = \frac{T}{n}$ jest odstępem między wodnicami.

Elementarny moment statyczny objętości względem przyjętej płaszczyzny yz (np. owręża) jest równy $dM_{vyz} = x_F \cdot dV$, gdzie x_F jest tu odciętą środka wyporu plasterka objętości dV. Gdy grubość tego plastra dz dąży do zera, wówczas ten środek objętości pokryje się z odciętą środka ciężkości pola wodnicy, stąd

$$dM_{vyz} = S_{wL} \cdot x_c \cdot dz,$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

a moment dla całego kadłuba

$$M_{vyz} = \int_0^T S_{wL} \cdot x_c \cdot dz = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wL_i} \cdot x_{c_i} \cdot c_{s_i}, \qquad (4.17)$$

co praktycznie sprowadza się do obliczenia pola między osią z a krzywą otrzymaną z iloczynu każdego uprzednio obliczonego pola wodnicy i odciętej jej środka ciężkości. Gdy x_c jest obliczone względem owręża, to wartości w kierunku rufy są ujemne, więc krzywa iloczynu też ma ten sam znak. Należy to uwzględnić przy obliczaniu momentu statycznego wyporności względem płaszczyzny owręża. Odcięta zaś środka wyporu całego kadłuba jest ilorazem tego momentu przez wyporność

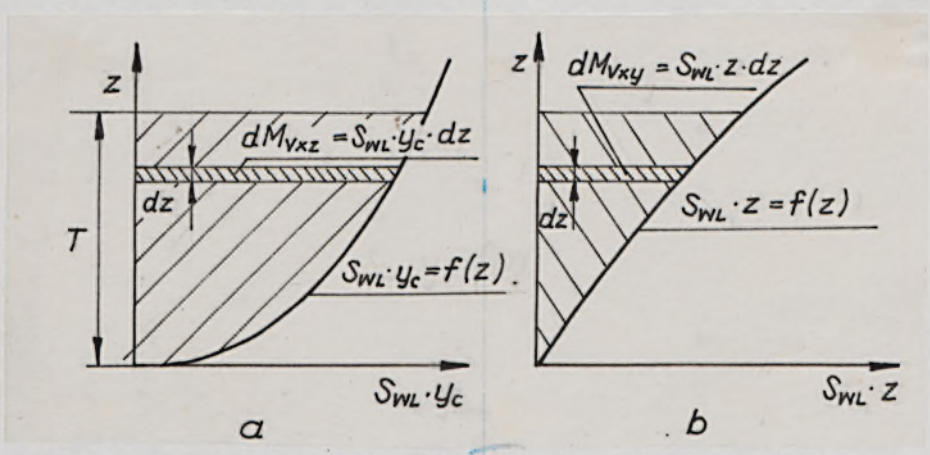
$$x_F = \frac{M_{vyz}}{V} = \frac{\int_0^T S_{wL} x_c dz}{\int_0^T S_{wL} dz} = \frac{\sum_i S_{wL_i} \cdot x_{c_i} \cdot c_{s_i}}{\sum_i S_{wL_i} \cdot c_{s_i}} \qquad (4.18)$$

„i" jest tutaj numerem wodnicy.

W przypadku, gdy kadłub jest niesymetryczny względem płaszczyzny xz, należy obliczyć poprzeczną współrzędną środka objętości. Aby to wykonać, należy wpierw obliczyć odpowiadające środki ciężkości y_c wszystkich wodnic. Wówczas elementarny moment statyczny objętości względem płaszczyzny xz równa się $dM_{vxz} = S_{wL} \cdot y_c \cdot dz$, a moment całej objętości

$$M_{vxz} = \int_0^T S_{wL}\, y_c dz = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wL_i} \cdot y_{c_i} \cdot c_{s_i}, \qquad (4.19)$$

co jest równoważne zakreskowanemu polu na rys. 4.5a.



Rys. 4.5

Poprzeczna współrzędna środka objętości wyraża się wzorem:

$$y_F = \frac{M_{vxz}}{V} = \frac{\int_0^T S_{wL}\, y_c\, dz}{\int_0^T S_{wL}\, dz} = \frac{\sum_i S_{wL_i} \cdot y_{c_i} \cdot c_{s_i}}{\sum_i S_{wL_i} \cdot c_{s_i}}. \qquad (4.20)$$

Do obliczenia rzędnej środka wyporu z_F należy znać wartość momentu statycznego wyporności względem płaszczyzny podstawowej xy. Taki elementar-

ny moment jest równy elementarnej objętości pomnożonej przez odległość od wybranej płaszczyzny, czyli $dM_{vxy} = zdV = S_{wL} z\, dz$. Moment całej objętości określa całka w granicach do przyjętego zanurzenia

$$M_{vxy} = \int_0^T S_{wL} z\, dz = \frac{2}{3} d^2 \sum_i S_{wL_i} \cdot i \cdot c_{s_i} , \qquad (4.21)$$

którą - podobnie jak inne - rozwiązuje się w sposób numeryczny, określając pole zawarte między osią a krzywą wykreśloną na iloczynach pól poszczególnych wodnic i ich odległości od płaszczyzny podstawowej (rys. 4.5b). Rzędna środka objętości określona jest wyrażeniem

$$z_F = \frac{M_{vxy}}{V} = \frac{\int_0^T S_{wL} z\, dz}{\int_0^T S_{wL}\, dz} = d\, \frac{\sum_i S_{wL_i} \cdot i \cdot c_{s_i}}{\sum_i S_{wL_i} \cdot c_{s_i}} . \qquad (4.22)$$

Przykład 4.2

Dla odpowiednich zanurzeń trawlera przetwórni w tabeli 4.2 podane są wartości powierzchni wodnic i odciętych ich środka ciężkości mierzonych od owręża. Obliczyć dla zanurzenia z = 5 m wyporność i odciętą środka wyporu

Tabela 4.2

z(m)	0	0,5	1	2	3	4	5
S_{wL} (m^2)	35	175	247	327	394	484	554
x_c (m)	-3,60	-0,38	+0,58	+0,58	-0,64	-3,57	-5,28

Rozwiązanie:

Obliczenia wg wzoru Simpsona wykonamy w tabeli 4.3.

Tabela 4.3

z (m)	S_{wL} (m^2)	c_s	$S_{wL} \cdot c_s$ (m^2)	x_c (m)	$S_{wL} \cdot x_c \cdot c_s$ (m^2)
0	35	0,25	9	-3,60	-32
0,5	175	1	175	-0,38	-66
1	247	0,75	185	+0,58	+107
2	327	2	654	+0,58	+379
3	394	1	394	-0,64	-252
4	484	2	968	-3,57	-3456
5	554	0,5	277	-5,28	-1463
		$\sum_1$ = 2662		$\sum_2$ = -4783	

Wyporność $V = \frac{2}{3} d \sum S_{wL} \cdot c_s = \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 2662 = 1780\ m^3$

8. 11. 1984
B-5
33%

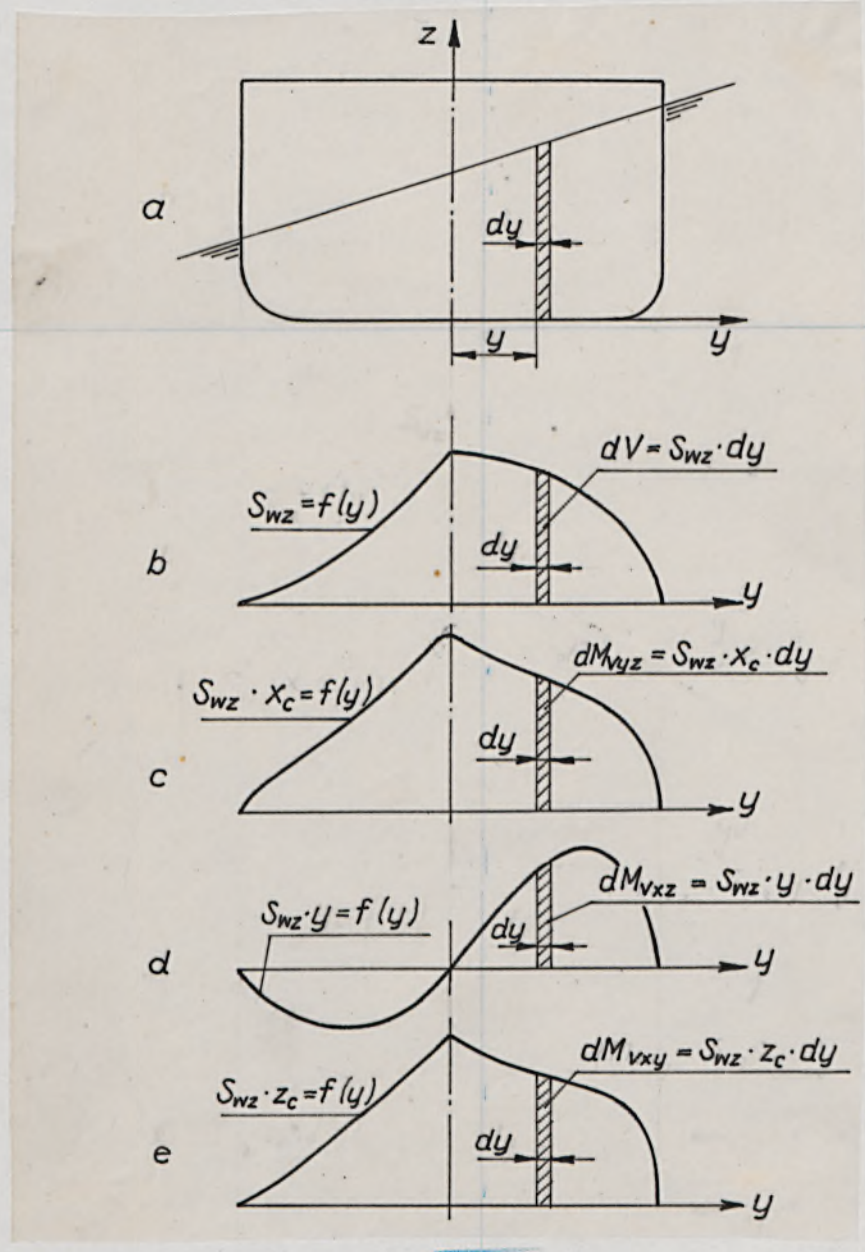
Odcięta środka wyporu $x_F = \frac{M_{vyz}}{V} = \frac{\sum S_{wL} \cdot x_c \cdot c_s}{\sum S_{wL} \cdot c_s} = \frac{-4783}{2662} = -1{,}80$ m.

4.5. Obliczenia za pomocą pól wzdłużnicowych

Podobnie, jak i w poprzednich przypadkach, wyodrębnijmy przekrój wzdłużnicowy o polu S_{wz} w odległości y od płaszczyzny xz, a w nieskończenie bliskiej odległości dy drugi taki przekrój. Zawarta między tymi wzdłużnicami elementarna objętość kadłuba jest równa $dV = S_{wz}\, dy$, a objętość całego kadłuba

$$V = \int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, dy = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wz_i} \cdot c_{s_i}, \qquad (4.23)$$

co sprowadza się do obliczenia pola zawartego pod krzywą pól wzdłużnicowych wykreślonych w funkcji szerokości okrętu (rys. 4.6b). $d = \frac{B}{n}$ jest tutaj odstępem między obliczonymi uprzednio polami przekrojów wzdłużnico-



Rys. 4.6

wych. Do obliczenia odciętej środka wyporu x_F konieczny jest moment statyczny objętości względem płaszczyzny owręża. Taki elementarny moment jest równy iloczynowi elementarnej objętości przez odległość jej środka

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°/₀

objętości od płaszczyzny owręża, lecz ponieważ dy jest nieskończenie małe, odcięta ta pokrywa się z odciętą środka ciężkości pola rozpatrywanej wzdłużnicy, więc $dM_{vyz} = S_{wz} \cdot x_c \cdot dy$, a cały moment

$$M_{vyz} = \int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, x_c\, dy = \frac{2}{3}\, d \sum_i S_{wz_i}\, x_{c_i}\, c_{s_i}. \qquad (4.24)$$

Konieczna jest tu więc znajomość pól wzdłużnic i ich środków ciężkości x_c, a geometryczny sens tej całki to pole pod krzywą $S_{wz} \cdot x_c$ wykreśloną w funkcji szerokości okrętu (rys. 4.6c). Odcięta środka wyporu jest więc równa

$$x_F = \frac{M_{vyz}}{V} \frac{\int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, x_c\, dy}{\int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, dy} = \frac{\sum_i S_{wz_i} \cdot x_{c_i} \cdot c_{s_i}}{\sum_i S_{wz_i} \cdot c_{s_i}}. \qquad (4.25)$$

Do obliczenia poprzecznej współrzędnej środka wyporu konieczny jest moment względem płaszczyzny xz. Taki elementarny moment $dM_{vxz} = ydV = S_{wz} \cdot y \cdot dy$, a moment całej objętości

$$M_{vxz} = \int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, y\, dy = \frac{2}{3}\, d^2 \sum_i S_{wz_i} \cdot i \cdot c_{s_i}, \qquad (4.26)$$

gdzie „i" jest bezwymiarową odległością od wybranej płaszczyzny xz. Obliczenia numeryczne sprowadzają się do obliczenia wartości pola pod krzywą iloczynu pól wzdłużnic i ich odległości od wybranej płaszczyzny (rys. 4.6d). Dla statków moment ten liczony jest względem płaszczyzny symetrii. Przy statku przechylonym współrzędna ta ma pewną wartość, a krzywa momentu statycznego pól wzdłużnic czyli krzywa iloczynu pól wzdłużnicowych przez ich odległości od płaszczyzny symetrii okrętu ma charakter dwugałęziowy. Pole pod lewą krzywą jest ujemne ze względu na znak rzędnej y. Współrzędna wyporu jest równa

$$y_F = \frac{M_{vxz}}{V} = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, y\, dy}{\int_{-B/2}^{B/2} S_{wz}\, dy} = d \frac{\sum_i S_{wz_i} \cdot i \cdot c_{s_i}}{\sum_i S_{wz_i}\, c_{s_i}}. \qquad (4.27)$$

Metoda wzdłużnicowa jest szczególnie wygodna do obliczenia współrzędnej y_F, gdyż wymaga się tu tylko znajomości pól wzdłużnic i ich umiejscowienia w stosunku do wybranej płaszczyzny.

Do momentu statycznego objętości względem płaszczyzny podstawowej dojść można przez wyznaczenie elementarnego momentu, który jest równy $d M_{vxy} = z_F \cdot dV = S_{wz} \cdot z_c \cdot dy$. Moment całej objętości jest równy

8. 11. 1984
B-5
33%
~~S/14/85~~ PG MS
S/272/88

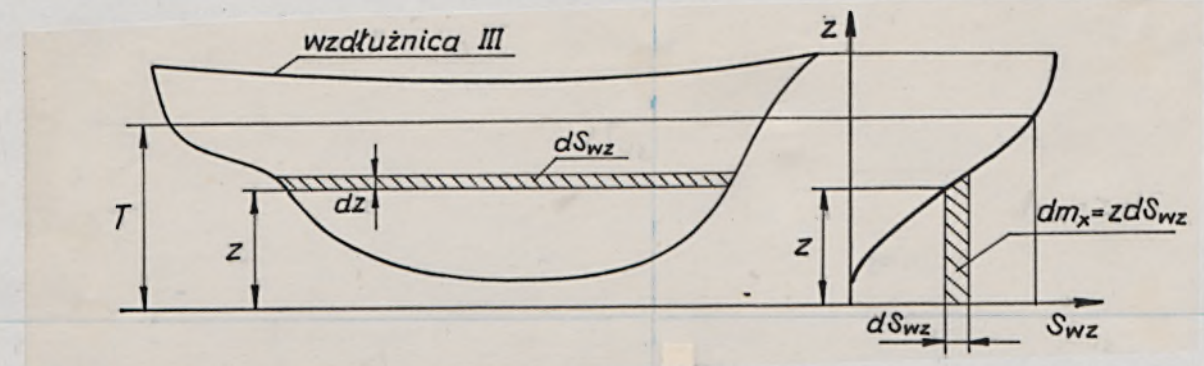
Tf boku ostatniego pionu

$$M_{vxy} = \int_{-B_{/2}}^{B_{/2}} S_{wz}\, z_c\, dy = \frac{2}{3} d \sum_i S_{wz_i} \cdot z_{c_i} \cdot c_{s_i}, \qquad (4.28)$$

gdzie z_c jest rzędną środka ciężkości pola wzdłużnicy względem płaszczyzny podstawowej. Moment statyczny pola wzdłużnicy względem płaszczyzny podstawowej można także otrzymać z zależności:

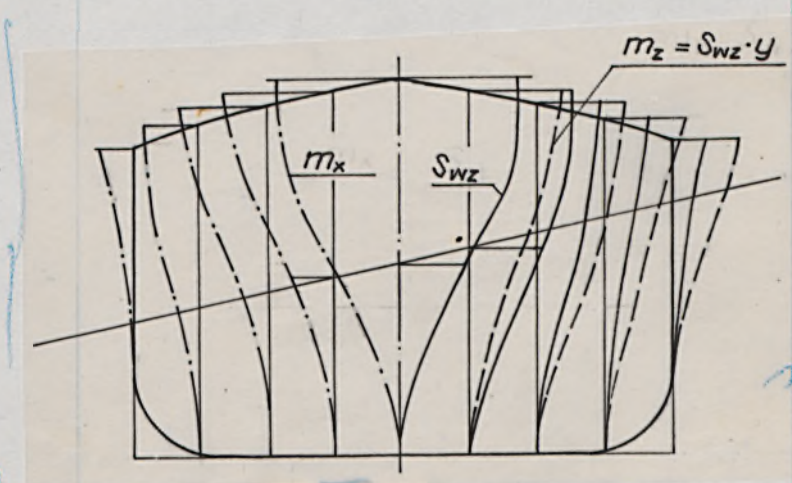
$$m_x = \int_0^{S_{wz}} z\, dS_{wz}, \qquad (4.29)$$

gdzie elementarny taki moment jest iloczynem elementarnego pola dS_{wz} i odległości tego pola od podstawy. Całkę tę przedstawia więc pole pod krzywą powierzchni wzdłużnicy wykreśloną w funkcji wysokości okrętu $S_{wz} = f(z)$ (rys. 4.7). Przy dużej ilości takich obliczeń, np. w celu obliczenia y_F i z_F dla różnych wyporności okrętu i dla różnych kątów przechyłu, opłaca się wykonać wykres pomocniczy, bardzo podobny w swej idei



Rys. 4.7

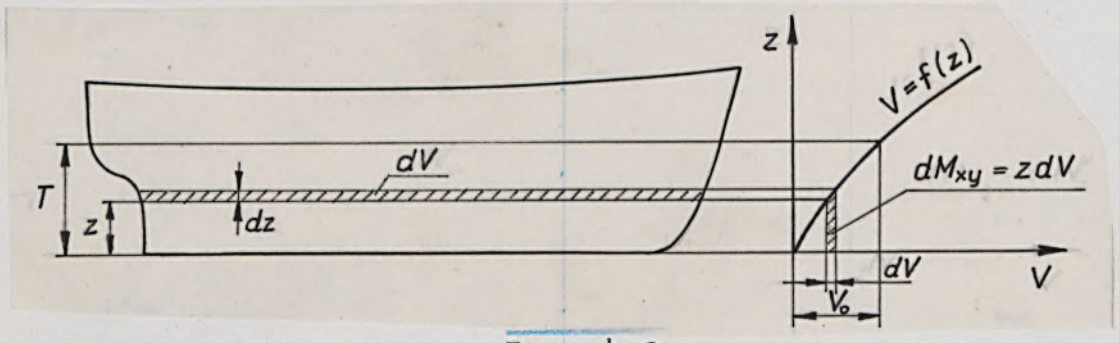
do skali Bonjeana. W rzucie poprzecznym jest zaznaczony kontur statku wraz z podziałem na wzdłużnice. Przy poszczególnych liniach pionowych przedstawiających podział wzdłużnicowy wykreślone są ich pola w funkcji wysokości statku i ich momenty statyczne względem płaszczyzny podstawowej. Dla kadłuba symetrycznego wystarczy z jednej strony płaszczyzny symetrii wykreślić krzywe powierzchni, z drugiej zaś strony, aby wykres był bardziej przejrzysty, krzywe momentów statycznych. Korzystanie z takiego wykresu jest analogiczne do korzystania ze skali Bonjeana, z tą różnicą, że całkowanie odbywa się wzdłuż szerokości okrętu i oblicza się V, y_F i z_F. Przeprowadzona wodnica zaznacza wysokości zanurzenia odpowiedniego przekroju wzdłużnicowego, dla których wartości pól i momentów odczytuje się z wykresu. Wysokości zanurzenia wzdłużnicy po stronie, gdzie nie ma wykreślonej krzywej w funkcji jej wysokości, przerzutowuje się na odpowiednie wzdłużnice na stronę, gdzie te wielkości są wykreślone (rys. 4.8).



Rys. 4.8

4.6. Obliczenie położenia środka wyporu za pomocą krzywej wyporności

Współrzędną środka wyporu bardzo szybko można wyznaczyć, gdy dany jest rozkład objętości. Nietrudno jest określić rzędną środka wyporu z_F względem płaszczyzny podstawowej, gdyż w dokumentacji każdego statku dana jest krzywa wyporności w funkcji zanurzenia. Ponieważ elementarny moment statyczny objętości względem płaszczyzny podstawowej jest równy $dM_{vxy} = zdV$, to wielkość ta jest równa elementarnemu polu pod krzywą wyporności (rys. 4.9). Cały ten moment określony jest całką



Rys. 4.9

$$M_{vxy} = \int_0^{V_o} z\,dV \qquad (4.30)$$

i równy jest całemu polu pod krzywą wyporności do przyjętej wyporności V_o. Rzędna środka wyporu jest więc równa:

$$z_F = \frac{M_{vxy}}{V_o} = \frac{\int_0^{V_o} z\,dV}{V_o} . \qquad (4.31)$$

W praktyce ten sposób obliczania z_F statku nieprzegłębionego, jako najprostszy, jest stosowany najczęściej.

Tę samą zasadę można wykorzystać do obliczenia pozostałych współrzędnych.

Elementarny moment statyczny objętości względem płaszczyzny xz lub płaszczyzny równoległej do niej (np. płaszczyzny stycznej do burty statku) jest równy $dM_{vxz} = ydV$, a cały moment

$$M_{vxz} = \int_0^{V_o} y\,dV , \qquad (4.32)$$

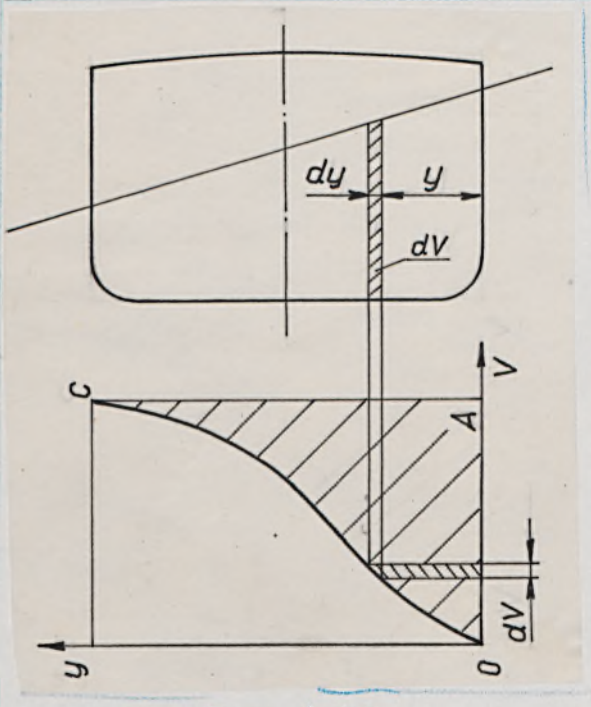
co odpowiada wartości pola pod krzywą V wykreśloną w zależności od szerokości B, czyli jest to pole OAC (rys. 4.10). Stąd

$$y_F = \frac{M_{vxz}}{V_o} = \frac{\int_0^{V_o} y\,dV}{V_o} , \qquad (4.33)$$

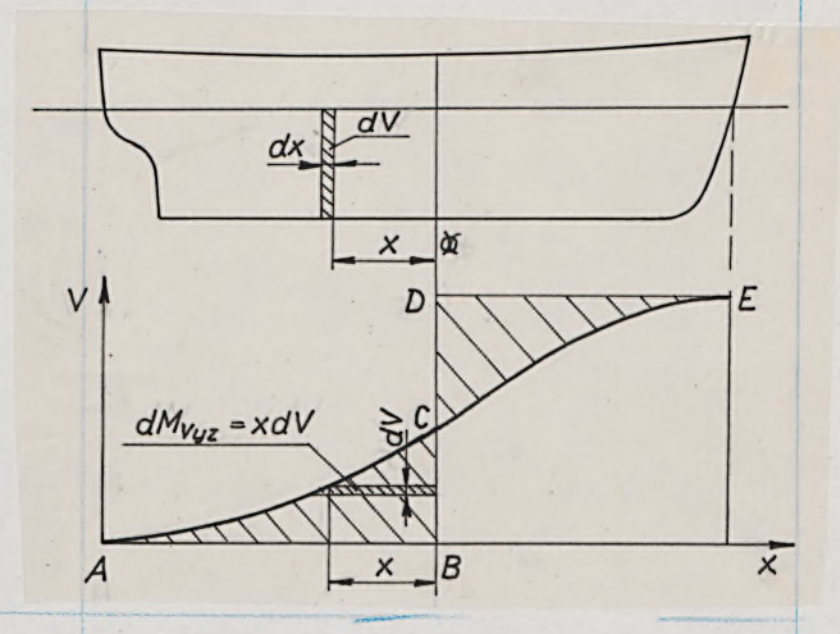
co ma znaczenie dla kadłuba niesymetrycznego lub przechylonego.

Współrzędną x_F wyznaczyć można za pomocą momentu statycznego objętości względem płaszczyzny poprzecznej, np. owręża. Elementarny moment jest równy $dM_{vyz} = xdV$, stąd cały moment

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 4.10



Rys. 4.11

$$M_{vyz} = \int_0^{V_o} x\,dV. \qquad (4.34)$$

Moment ten określony jest przez pole pod krzywą V (rys. 4.11), wykreśloną, dla przyjętego zanurzenia okrętu, w funkcji długości statku. Ponieważ odcięta x od owręża w kierunku rufy jest ujemna, moment statyczny objętości dla części rufowej, określony przez pole ABC, jest ujemny, a dla części dziobowej (pole CDE) jest dodatni. Znak momentu świadczy o tym czy środek wyporu leży przed, czy za owrężem. Odcięta jest równa

$$x_F = \frac{M_{vyz}}{V_o} = \frac{\int_0^{V_o} x\,dV}{V_o}. \qquad (4.35)$$

Za pomocą rozkładu wyporności można więc określić trzy współrzędne środka wyporu dla dowolnej wodnicy pływania. Praktyczne jednak zastosowanie metoda ta znajduje przy obliczeniu rzędnej z_F dla statku nieprzegłębionego i nieprzechylonego, dla którego znana jest krzywa V, lub dla statku przechylonego do obliczenia współrzędnych y_F i z_F. W starszej literaturze okrętowej zasadę tę wykorzystuje tzw. metoda Middendorfa do obliczenia pantokaren.

Przykład 4.3

Znana jest zależność pomiędzy wypornością i zanurzeniem dla holownika portowego. Wartości podane są w tabeli 4.4. Dla wyporności $V_o = 100\ m^3$ obliczyć rzędną środka wyporu od płaszczyzny podstawowej.

Tabela 4.4

V(m^3)	0	10	20	40	60	80	100
z(m)	-0,2	0,5	0,78	1,15	1,46	1,75	2,01

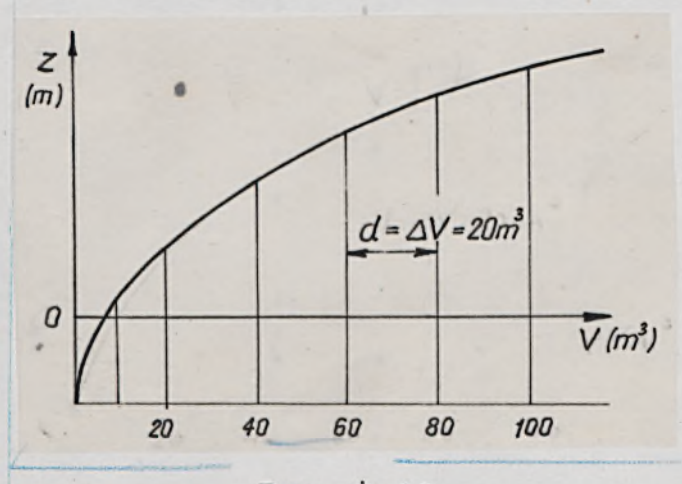
B-5
33%

Rozwiązanie

Rzędna środka wyporu jest równa

$$z_F = \frac{1}{V_o} \int_0^{V_o} z\,dV,$$

a całka przedstawia pole pod krzywą wyporności. Statek ma przegłębienie konstrukcyjne, ponieważ krzywa wyporności statku zaczyna się poniżej płaszczyzny podstawowej (z = 0). Można więc najpierw obliczyć pole pod tą krzywą i osią leżącą o 0,2 m (rys. 4.12) poniżej płaszczyzny podstawowej, a następnie sprowadzić tak obliczoną wartość do płaszczyzny podstawowej. Obliczenia wykonamy w tabeli 4.5.



Rys. 4.12

Tabela 4.5

z (m)	c_s -	$z \cdot c_s$ (m)
0	0,25	0
0,70	1	0,70
0,98	0,75	0,73
1,35	2	2,70
1,66	1	1,66
1,95	2	3,90
2,21	0,5	1,10
		$\sum_1 = 10,79$

Moment statyczny wyporności względem płaszczyzny przechodzącej przez najniższy punkt kadłuba:

$$M_v = \frac{2}{3} d \sum z \cdot c_s = \frac{2}{3} \cdot 20 \cdot 10,79 = 143,87\ m^4.$$

Rzędna względem tej płaszczyzny $z_F' = \frac{M_v}{V_o} = 1,44$ m, a względem płaszczyzny podstawowej $z_F = z_F' - 0,20 = 1,24$ m.

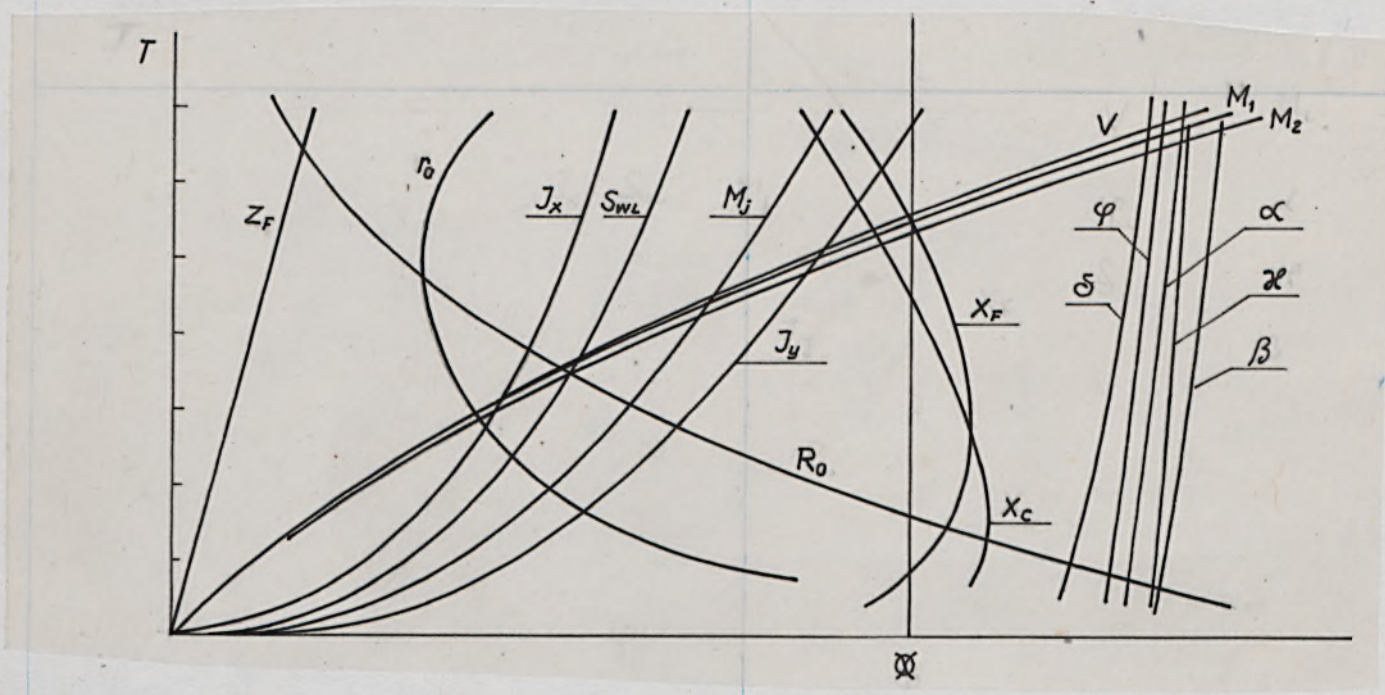
4.7. Wykres krzywych hydrostatycznych

Z podanych powyżej przykładów widać możliwości obliczania wielkości związanych z kształtem kadłuba wg dowolnych przekrojów podanych na liniach teoretycznych. Jeśli chodzi o współrzędne środka wyporu, to widać z tych

6. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

przykładów, że wzdłużne jego położenie x_F najszybciej można wyznaczyć za pomocą pól wrężnicowych, poprzeczne położenie y_F - za pomocą pól wzdłużnicowych a rzędną z_F - za pomocą pól wodnicowych. Nie trzeba znać wówczas momentów statycznych tych pól względem układu odniesienia, lecz tylko wartości tych pól i odległości tych przekrojów od wybranej płaszczyzny. Rzędną środka wyporu jeszcze szybciej można wyznaczyć za pomocą krzywej wyporności, gdyż tę krzywą wykreśla się zawsze. Przy obliczeniach jednak typowych, dla statku nieprzechylonego, aby uniknąć rozbieżności w uzyskiwanych wynikach, wykorzystuje się jeden rodzaj przekrojów, najczęściej przekroje wrężnicowe. Przy powszechnej komputeryzacji tego rodzaju obliczeń trudno mówić o różnicach w pracochłonności. Ważna jest dokładność, a tu decyduje ilość przekrojów.

Obliczone wielkości wykreśla się w zależności od zanurzenia okrętu, gdyż zanurzenie, szczególnie zanurzenie statku handlowego, zmienia się w czasie eksploatacji w szerokich granicach. Zwyczajowo zanurzenie przedstawiane jest na osi rzędnych, zmienne zależne natomiast na osi odciętych. Wykres taki nazywany jest arkuszem krzywych hydrostatycznych. Przedstawia on zbiór krzywych charakteryzujących geometrię kadłuba i wielkości hydrostatyczne. Wykonany jest dla statku nieprzegłębionego lub dla przegłębienia konstrukcyjnego. Przykładowo wykres taki przedstawiony jest na rys. 4.13.



Rys. 4.13

Z reguły podaje się następujące krzywe:

1. Pole wodnic S_{wL},
2. Odcięta środka ciężkości pola wodnic x_c,
3. Moment bezwładności pola wodnic względem płaszczyzny symetrii okrętu J_x,
4. Moment bezwładności pola wodnic względem osi poprzecznej przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy J_y,
5. Objętość podwodnej części kadłuba V,

8. 11. 1994 S/14/85 PG MSW
B-5
33%

6. Wyporność masowa okrętu M w wodzie słodkiej $M_1 = \varepsilon \varrho_1 V = 1{,}005 \cdot V$,
7. Wyporność masowa w wodzie morskiej $M_2 = \varepsilon \varrho_2 V = 1{,}030 \cdot V$,
8. Odcięta środka wyporu x_F,
9. Rzędna środka wyporu z_F,
10. Poprzeczny promień metacentryczny $r_o = \frac{J_x}{V}$,
11. Podłużny promień metacentryczny $R_o = \frac{J_y}{V}$,
12. Jednostkowy moment przegłębiający $M_j = \frac{\varrho J_y}{L}$,
13. Współczynnik pełnotliwości wodnicy α,
14. Współczynnik pełnotliwości owręża β,
15. Współczynnik pełnotliwości kadłuba δ,
16. Wzdłużny współczynnik pełnotliwości kadłuba $\varphi = \frac{\delta}{\beta}$,
17. Pionowy współczynnik pełnotliwości kadłuba $\varkappa = \frac{\delta}{\alpha}$.

Wartości poprzecznego promienia metacentrycznego odkłada się od krzywej z_F w tej samej skali. Suma tych dwu składników $z_F + r_o = z_M$ wyznacza rzędną metacentrum, czyli wznios początkowego punktu metacentrycznego nad płaszczyzną podstawową.

Z reguły krzywe te wykreślane są na arkuszu z siatką milimetrową. Należy pamiętać, aby wszystkie krzywe wykreślone były w podziałce łatwej do odczytania jak: 1:1, 1:2, 1:2,5 i 1:5, lub ich wielokrotności.

4.8. Sprawdzenie poprawności niektórych krzywych hydrostatycznych

Przy wszelkich obliczeniach, m.in. i wielkości hydrostatycznych, należy zawsze kontrolować poprawność otrzymywanych wyników. Do tego celu mogą być przydatne podane tutaj informacje i związki.

1. Krzywa pola przekroju wrężnicowego S_{wr} (skala Bonjeana). Ponieważ zgodnie z rys. 3.10 elementarne pole $dS = 2\,ydz$, więc

$$\frac{dS}{dz} = 2y, \tag{4.36}$$

czyli współczynnik kierunkowy stycznej do tej krzywej w danym punkcie musi być równy szerokości przekroju w tym punkcie. Zależność tę określa także początkowy przebieg tej krzywej. Dla statku z dnem płaskim krzywa ta tworzy z osią z kąt ostry, natomiast dla statku z podobleniem krzywa jest styczna do osi z.

2. Krzywa momentu statycznego pola przekroju wrężnicowego względem podstawy m_y (skala Bonjeana).

Elementarny moment ten jest równy

$$dm_y = zdS = 2\,yz\,dz,$$

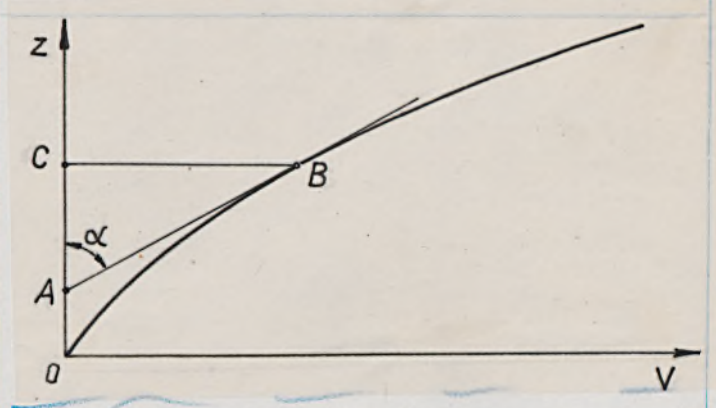
czyli

$$\frac{dm_y}{dz} = 2yz\,, \tag{4.37}$$

tzn. że współczynnik kierunkowy stycznej do tej krzywej jest równy iloczynowi szerokości przekroju w danym punkcie i odległości od pła-

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

płaszczyzny podstawowej. Moment ten można też sprawdzić obliczając rzędną środka ciężkości pola przekroju $z_c = \frac{m_y}{S}$, która winna być większa od połowy wysokości rozpatrywanego przekroju.



Rys. 4.14

3. Krzywa objętości V

Wiemy, że elementarna objętość $dV = S_{wL}dz$, więc

$$\frac{dV}{dz} = S_{wL}, \qquad (4.38)$$

tzn. współczynnik kierunkowy stycznej do krzywej V dla wybranego zanurzenia z = T jest równy wartości pola wodnicy dla tego zanurzenia, czyli (rys. 4.14).

$$tg\alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{dV}{dz} = S_{wL}.$$

Uwzględniając, że odcinek BC = V, mamy

$$AC = \frac{V}{S_{wL}},$$

a ponieważ OC = T, więc stosunek dwu odcinków

$$\frac{AC}{OC} = \frac{V}{S_{wL} \cdot T} = \mathcal{H}$$

jest równy pionowemu współczynnikowi pełnotliwości kadłuba.

4. Krzywa rzędnych środka wyporu

Rzędna środków wyporu jest równa $z_F = \frac{M_{vxy}}{V}$,

a jej pochodna względem zanurzenia

$$z'_F = \frac{dz_F}{dz} = \frac{M' \cdot V - M \cdot V'}{V^2} = \frac{1}{V}\left(M' - V' \cdot \frac{M}{V}\right).$$

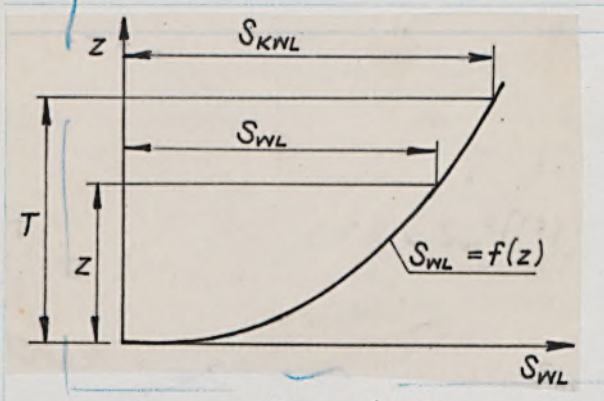
Wiedząc, że $dM_{vxy} = S_{wL} \cdot z \cdot dz$ i stąd $M' = S_{wL} \cdot z$, a $V' = S_{wL}$, otrzymamy wartość pochodnej równą

$$\frac{dz_F}{dz} = \frac{S_{wL}}{V}(z - z_F) \qquad (4.39)$$

lub

$$\frac{dz_F}{dz} = \frac{\alpha LB}{\delta LBz}(z - z_F) = \frac{1}{\mathcal{H}}\left(1 - \frac{z_F}{z}\right). \qquad (4.40)$$

Poprawność więc przebiegu krzywej $z_F = f(z)$ można sprawdzić przez obliczenie współczynnika kierunkowego stycznej do tej krzywej w przyjętym punkcie. Krzywa ta jest monotonicznie rosnąca. Nie może mieć



Rys. 4.15

ekstremum, gdyż zawsze zanurzenie jest większe od rzędnej środka wyporu

$$z > z_F.$$

Wartość z_F można także ocenić wzorem przybliżonym. Jeżeli założyć, że krzywa powierzchni wodnic jest parabolą o wykładniku n w postaci (rys. 4.15)

$$S_{wL} = S_{kwL} \left(\frac{z}{T}\right)^n \qquad (4.41)$$

oraz przyjmując, że współczynnik $\mathcal{H}$ = const w funkcji zanurzenia, to

$$V = \int_0^T S_{wL}\, dz = \frac{S_{kwL}}{T^n} \int_0^T z^n\, dz = \frac{S_{kwL}\, z^{n+1}}{T^n(n+1)} \Bigg|_0^T ,$$

$$V = \frac{S_{kwL} \cdot T}{n+1} .$$

Z drugiej strony $V = \mathcal{H} \cdot S_{kWL} \cdot T$.

Porównując prawe strony równań otrzymujemy wykładnik potęgowy

$$n = \frac{1-\mathcal{H}}{\mathcal{H}} . \qquad (4.42)$$

Moment statyczny objętości względem płaszczyzny podstawowej wynosi

$$M_{vxy} = \int_0^T S_{wL}\, z\, dz = \frac{S_{kwL}}{T^n} \int_0^T z^{n+1}\, dz = \frac{S_{kwL}\, z^{n+2}}{T^n(n+2)} \Bigg|_0^T ,$$

$$M_{vxy} = \frac{S_{kwL}\, T^2}{n+2} ,$$

a rzędna środka wyporu jest równa

$$z_F = \frac{M_{vxy}}{V} = \frac{S_{kwL}\, T^2}{(n+2)\, \mathcal{H}\, S_{kwL}\, T} .$$

Podstawiając otrzymaną zależność (4.42) na n , otrzymamy

$$z_F = \frac{T}{1+\mathcal{H}} . \qquad (4.43)$$

Z tej zależności wynika, że ponieważ $\mathcal{H} < 1$, więc $z_F > \frac{T}{2}$.

Do zgrubnej oceny wartości z_F sprawdzianem poprawności jest przedział występowania $\frac{1}{2} T < z_F < \frac{2}{3} T$.

5. Krzywa rzędnych metacentrum poprzecznego z_M

Rzędna metacentrum jest sumą dwu składników

$$z_M = z_F + r_o = z_F + \frac{J_x}{V}\,, \tag{4.44}$$

a jej pochodna

$$\frac{dz_M}{dz} = \frac{dz_F}{dz} + \frac{dr_o}{dz}\,.$$

Pierwszy składnik z_F, został już określony. Pochodną drugiego składnika obliczymy najpierw względem wyporności

$$\frac{dr_o}{dV} = \frac{J_x' \cdot V - V' \cdot J_x}{V^2} = \frac{1}{V}\,(J_x' - V' \cdot r_o)\,.$$

Ponieważ $V' = \frac{dV}{dV} = 1$,

więc
$$\frac{dr_o}{dV} = \frac{1}{V}\,(\frac{dJ_x}{dV} - r_o). \tag{4.45}$$

Wiemy, że $dV = S_{wL}\,dz$, więc pochodna promienia metacentrycznego względem zanurzenia jest równa

$$\frac{dr_o}{dz} = S_{wL}\,\frac{dr_o}{dV} = \frac{S_{wL}}{V}\,(\frac{dJ_x}{dV} - r_o), \tag{4.46}$$

a stąd pochodna rzędnej metacentrum

$$\frac{dz_M}{dz} = \frac{S_{wL}}{V}\,(\frac{dJ_x}{dV} - r_o + z - z_F)$$

lub
$$\frac{dz_M}{dz} = \frac{S_{wL}}{V}\,(\frac{dJ_x}{dV} + z - z_M). \tag{4.47}$$

Ze związku tego można wyciągnąć wnioski odnośnie do przebiegu tej krzywej. Gdy $\frac{dz_M}{dz} > 0$, czyli gdy

$$z + \frac{dJ_x}{dV} > z_M\,, \tag{4.48}$$

krzywa $z_M(z)$ winna rosnąć, a dla warunku

$$z + \frac{dJ_x}{dV} < z_M \tag{4.49}$$

krzywa maleje.
Ekstremum zaś krzywa ta posiada w punkcie, dla którego

$$z_M = z + \frac{dJ_x}{dV} \tag{4.50}$$

lub
$$z_M = z + \frac{dJ_x}{S_{wL}\,dz}\,. \tag{4.51}$$

8. 11. 1984
B-5
33%

~~S/14/85~~ PG MS S/242/88

6. Wartość promienia metacentrycznego r_o

Promień metacentryczny jest ilorazem momentu bezwładności pola wodnicy przez wyporność okrętu.

$$r_o = \frac{J_x}{V}$$

Dowód na tę zależność podany jest w rozdziale 7. Wartość r_o można oszacować wzorem przybliżonym, dla którego punktem wyjścia jest równanie wodnicy w postaci

$$y = \frac{B}{2}\left[1 - \left(\frac{x}{L/2}\right)^n\right]. \qquad (4.52)$$

Pole wodnicy jest równe

$$S_{wL} = 4\int_0^{L/2} y\,dx = \alpha LB .$$

Z zależności tej obliczyć można wykładnik potęgowy

$$n = \frac{\alpha}{1-\alpha} \qquad (4.53)$$

Podstawiając wartość rzędnej y do wyrażenia na moment bezwładności

$$J_x = \frac{4}{3}\int_0^{L/2} y^3 dx ,$$

otrzymamy

$$J_x = \frac{B^3}{6}\int_0^{L/2}\left[1 - 3\left(\frac{x}{L/2}\right)^n + 3\left(\frac{x}{L/2}\right)^{2n} - \left(\frac{x}{L/2}\right)^{3n}\right]dx =$$

$$= \frac{LB^3}{12}\left(1 - \frac{3}{n+1} + \frac{3}{2n+1} - \frac{1}{3n+1}\right).$$

Podstawiając za n obliczoną wartość, otrzymujemy moment bezwładności pola

$$J_x = \frac{LB^3}{2}\cdot\frac{\alpha^3}{(1+\alpha)(1+2\alpha)} , \qquad (4.54)$$

a wiedząc, że $V = \delta LBT$, również promień metacentryczny

$$r_o = a_r \cdot \frac{B^2}{T} , \qquad (4.55)$$

gdzie

$$a_r = \frac{\alpha^3}{2\delta(1+\alpha)(1+2\alpha)} . \qquad (4.56)$$

Można przyjąć, że dla typowych statków morskich o wodnicach, których współczynnik zawarty jest w granicach $0{,}60 < \alpha < 0{,}85$, wartość $\frac{\alpha}{2(1+\alpha)(1+2\alpha)}$ jest w przybliżeniu stała i wynosi 11,4. Wówczas można zapisać, że

$$a_r = \frac{\alpha^2}{11{,}4\delta}, \qquad (4.57)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/88
B-5
33%

a moment bezwładności pola wodnicy w przybliżeniu jest równy

$$J_x = \frac{\alpha^2}{11,4} B^3 L. \qquad (4.58)$$

7. Wartość podłużnego promienia metacentrycznego R_o

Promień ten jest równy

$$R_o = \frac{J_y}{V} .$$

W podobny sposób, jak wyżej, można obliczyć wzdłużny moment bezwładności pola wodnicy

$$J_y = 4 \int_0^{L/2} x^2 y dx = 2B \int_0^{L/2} x^2 \left[1 - \left(\frac{x}{L/2} \right)^n \right] dx = \frac{BL^3}{4} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{n+3} \right) .$$

Uwzględniając, że $n = \frac{\alpha}{1-\alpha}$,

$$J_y = \frac{BL^3}{12} \cdot \frac{\alpha}{3-2\alpha} , \qquad (4.59)$$

a promień metacentryczny

$$R_o = \frac{\alpha}{12\,\delta(3-2\alpha)} \cdot \frac{L^2}{T} \qquad (4.60)$$

lub

$$R_o = a_R \cdot \frac{L^2}{T} ,$$

gdzie

$$a_R = \frac{\alpha}{12\,\delta(3-2\alpha)} .$$

Dla typowych morskich okrętów o $0,60 < \alpha < 0,85$ wartość $12\,\alpha(3-2\alpha)$ jest w przybliżeniu stała i wynosi około 14. Wówczas

$$a_R = \frac{\alpha^2}{14\,\delta} \qquad (4.61)$$

a moment bezwładności pola wodnicy względem osi y jest w przybliżeniu równy

$$J_y = \frac{\alpha^2 BL^3}{14} . \qquad (4.62)$$

Dla zgrubnej oceny wartość R_o dla wodnicy projektowej jest rzędu długości okrętu L.

8. Krzywa odciętych środków wyporu x_F i środków ciężkości wodnic x_c.

Odcięta środka wyporu jest równa

$$x_F = \frac{M_{vyz}}{V} ,$$

a jej pochodna względem zanurzenia

$$\frac{dx_F}{dz} = \frac{M' \cdot V - V' \cdot M}{V^2} = \frac{1}{V} (M' - V' \cdot X_F) .$$

6. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Ponieważ

$$V' = \frac{dV}{dz} = S_{wL}$$

i

$$M' = \frac{dM}{dz} = S_{wL} \cdot x_c ,$$

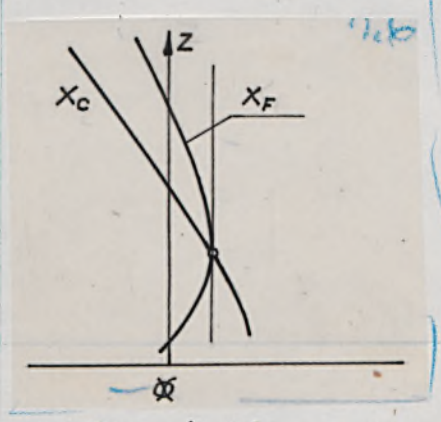
więc

$$\frac{dx_F}{dz} = \frac{S_{wL}}{V} (x_c - x_F). \qquad (4.63)$$

Ekstremum tej krzywej $\left(\frac{dx_F}{dz} = 0\right)$ występuje dla

$$x_c = x_F ,$$

tzn. że x_F ma swą wartość ekstremalną w punkcie przecięcia się krzywych z_F i x_c (rys. 4.16).



Rys. 4.16

Przykład 4.4

Obliczyć, dla jakiego w przybliżeniu zanurzenia okrętu wystąpi ekstremum rzędnej metacentrum poprzecznego.

Rozwiązanie:

$$z_M = z_F + r_o .$$

Wykorzystać można wzory przybliżone

$$z_F = \frac{T}{1+\partial\varepsilon} \quad \text{i} \quad r_o = \frac{\alpha^2 \cdot B^2}{11,4\,\delta\,T} .$$

Pochodna rzędnej Z_M

$$\frac{dz_M}{dz} = \frac{1}{1+\partial\varepsilon} - \frac{\alpha^2 B^2}{11,4\,\delta\,T^2} .$$

Ekstremum występuje, gdy $\frac{dz_M}{dz} = 0$, stąd

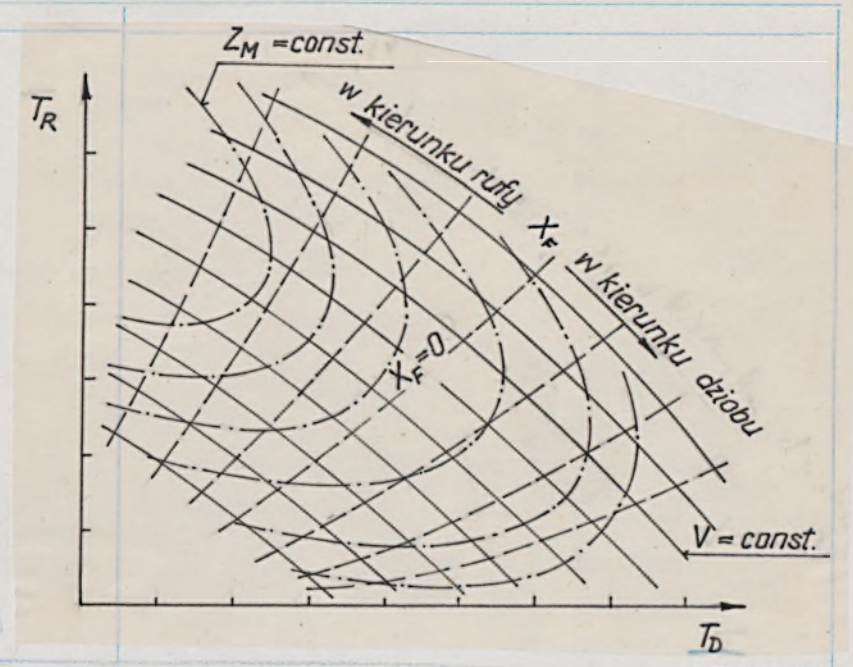
$$T \approx 0,296 \cdot \alpha \cdot B \sqrt{\frac{1+\partial\varepsilon}{\delta}}$$

4.9. Wykres wielkości hydrostatycznych statku przegłębionego

Wykres krzywych hydrostatycznych jest wykonany dla wodnic równoległych do wodnicy konstrukcyjnej. Można z niego też korzystać przy niewielkim przegłębieniu okrętu, odczytując wówczas wielkości dla zanurzenia średniego $T_{śr} = \frac{1}{2}(T_R + T_D)$. W przypadku jednak większego przegłębienia okrętu odczytane wartości mogą różnić się od wartości rzeczywistych. Przy większym więc przegłębieniu nie zaleca się korzystania z arkusza krzywych hydrostatycznych. Celowe jest, aby w skład dokumentacji okrętowej wchodził także wykres przedstawiony w sposób uproszczony na rys. 4.17.

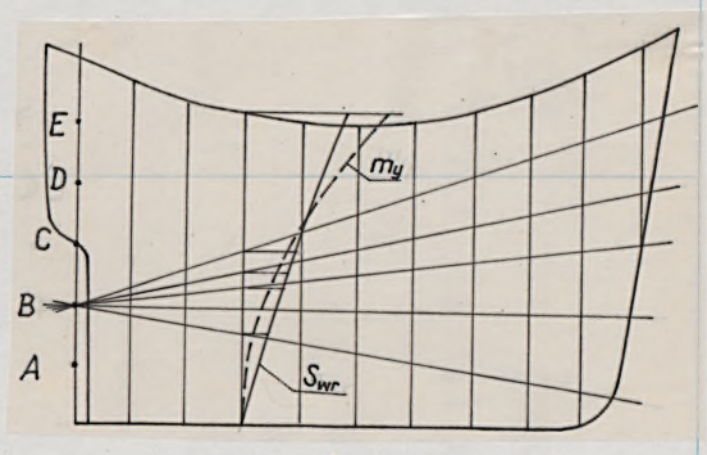
E. 11. 1984
B-5
33%

Na osi odciętych zaznaczona jest skala zanurzenia dziobu T_D, a na osi rzędnych - w tej samej podziałce - zanurzenia rufy T_R, natomiast zbiór krzywych przedstawia wartości stałych wyporności V, odciętej środka wyporu x_F oraz rzędnej metacentrum poprzecznego z_M. Każdej kombinacji zanurzenia dziobu i rufy odpowiada więc jedna tylko wartość V, x_F i z_M, odczytana na odpowiednich krzywych. Gdy punkt przecięcia dla wartości T_D i T_R nie leży na krzywej, wystarczy zastosować interpolację liniową między poszczególnymi krzywymi lub dokonać w oparciu o dwie sąsiednie wartości oceny „na oko".



Rys. 4.17

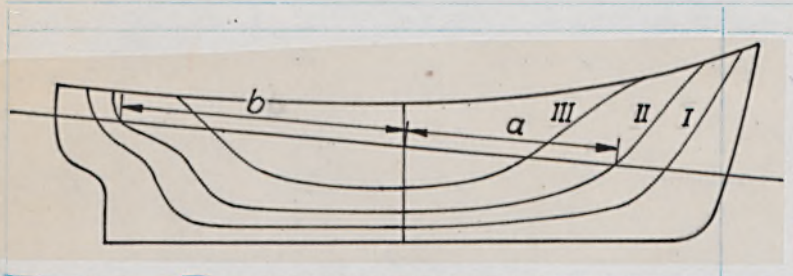
Wykres taki można wykonać w oparciu o skalę Bonjeana oraz linie teoretyczne. Nie można jednak takich krzywych wyznaczyć w sposób bezpośredni, lecz konieczne są tu pewne etapy pośrednie. Na skali Bonjeana na pionie rufowym zaznaczamy w przedziale możliwych do wystąpienia zanurzeń rufy kilka punktów A, B ... (rys. 4.18). Przez taki wybrany punkt wykreślamy pęk wodnic obejmujących w pełnym zakresie możliwe zanurzenia dziobu. Dla tych wodnic ze skali Bonjeana odczytać należy wartości pól wrężnicowych, ich momenty statyczne względem podstawy, a następnie obliczyć objętości V, odcięte środka wyporu x_F i rzędne środka wyporu z_F. Te same wodnice należy też przenieść na linie teoretyczne, gdyż do obliczenia momentu bezwładności pola wodnicy konieczny jest pomiar kształtu wodnicy. Można tego dokonać poprzez pomiar rzędnych poszczególnych wrężnic lub też, po uprzednim wykreśleniu dodatkowych wzdłużnic w sąsiedztwie burt statku, przez pomiar odciętych wszystkich wzdłużnic a i b (rys. 4.19). Wykorzystując pomiary wzdłużnic, wyznacza się moment bezwładności pola wodnicy pływania



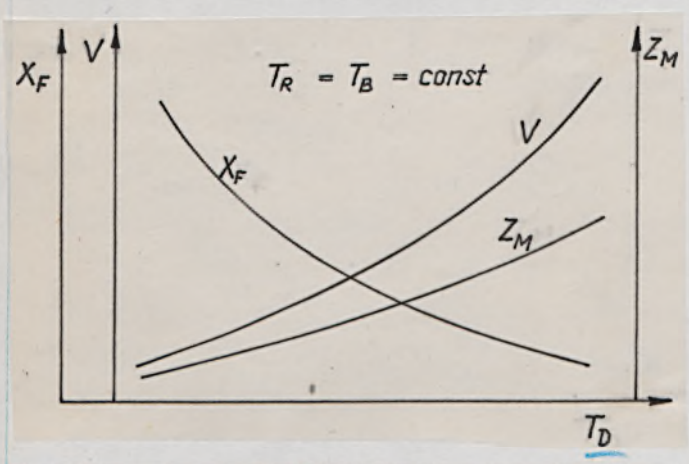
Rys. 4.18

$$J_x = 2\int_0^{B/2} y^2(a + b)dy = \frac{4}{3} d^3 \sum_i i^2(a_i + b_i)c_{si}, \qquad (4.64)$$

gdzie: $d = \frac{B}{2n}$; $i = \frac{y_i}{d}$.



Rys. 4.19



Rys. 4.20

Obliczone wartości V i x_F oraz sumę $z_M = z_F + \frac{J_x}{V}$ zaznacza się na pomocniczym wykresie w funkcji zanurzenia dziobu T_D. Te obliczenia i wynikający z nich wykres na rys. 4.20, wykonany np. dla zanurzenia rufy do punktu B, należy powtórzyć dla wszystkich wybranych punktów na pionie rufowym od punktu A do E. Dopiero z tych pomocniczych wykresów dla całego szeregu stałych wartości V, x_F i z_M wykonuje się główny wykres (rys. 4.17), z którego można później odczytać te wartości dla dowolnego zanurzenia dziobu i rufy.

D-5
33%

5. PODSTAWY HYDROSTATYKI

„Statek zastygł w zupełnym bezruchu. Odnosiło się wrażenie, że powietrze przeobraziło się w czarną ciecz, a woda w ciało stałe".

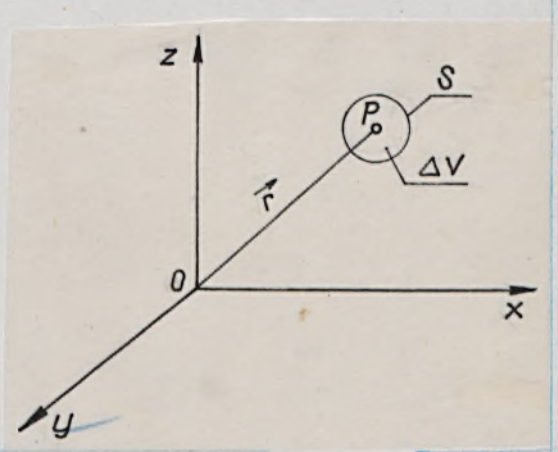
5.1. Wielkości podstawowe

Z punktu widzenia statyki okrętu interesują nas jedynie dwa położenia jednostek pływających w stosunku do powierzchni wody:

- na powierzchni wody - jednostki nawodne mające część kadłuba w wodzie, pozostałą część w powietrzu i utrzymujące się na wodzie bez ruchu postępowego oraz
- poniżej powierzchni wody - okręty podwodne w stanie zanurzonym.

Głównym źródłem oddziaływania środowiska na jednostki pływające jest woda, a podstawowymi czynnikami mającymi wpływ na reakcje są gęstość wody i ciśnienie. Gęstość elementu płynu w punkcie P otoczonego powierzchnią S (rys. 5.1) jest określona wzorem

$$\rho(P) = \rho(\vec{r}) = \lim_{\Delta V/o} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \qquad (5.1)$$



Rys. 5.1

gdzie Δm jest masą tego elementu, a ΔV jego objętością. Dla ciała jednorodnego gęstość jest stosunkiem masy całego ciała do jego objętości

$$\rho = \frac{m}{V} \left[kg/m^3\right] \qquad (5.2)$$

Jeśli gęstość zależy tylko od ciśnienia $\rho(p)$, to taki płyn nazywa się barotropowy, jeśli zaś zależy od ciśnienia i temperatury $\rho(p,T)$, to płyn taki nazywa się baroklinowy (gaz).

8. 11. 1984
B-5
33%

Gęstość wody morskiej zależy od położenia geograficznego i pory roku. Główny wpływ na gęstość ma stopień zasolenia, lecz różnice nie są bardzo duże. Także na różnych głębokościach gęstości mogą być różne. Przy wykonywaniu obliczeń pływalności okrętu przyjmuje się, że $\rho = \text{const}$ i nie uwzględnia się zmiany gęstości wokół kadłuba okrętu. Z reguły dla wody morskiej przyjmuje się standardową wartość $\rho = 1025\ kg/m^3$, a dla wody słodkiej $\rho = 1000\ kg/m^3$. Przeciętne gęstości dla różnych akwenów podaje tabela 5.1.

T a b e l a 5.1

Średnie gęstości wody

A k w e n	gęstość $[kg/m^3]$
Północny Atlantyk - zima	1030
Północny Atlantyk - lato	1028
Południowy Atlantyk	1025
Ocean Spokojny	1025
Ocean Indyjski	1023
Morze Śródziemne	1028
Morze Północne	1026
Morze Bałtyckie	1011

Z gęstością płynu związany jest jego ciężar właściwy

$$\gamma = \rho g = \lim_{\Delta v/o} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad [N/m^3] \tag{5.3}$$

gdzie: g - przyspieszenie ziemskie $[m/s^2]$,
G - ciężar płynu $[N]$.

Prócz gęstości o reakcji hydromechanicznej decyduje ciśnienie. Jest to iloraz siły i powierzchni, na którą ta siła działa. Podstawową jednostką jest

$$1 \text{ paskal} = 1\ N/m^2 = 1\ Pa,$$

$$\text{lub} \quad 1\ kN/m^2 = 10^3\ N/m^2.$$

Często stosowaną jednostką ciśnienia w układzie SI oraz w układzie fizykalnym CGS jest

$$1\ bar = 10^6\ dyn/cm^2 = 10^5\ Pa$$

$$\text{lub} \quad 1\ mbar = 10^3\ dyn/cm^2,$$

$$\text{a} \quad 1\ dyna/cm^2 = 0{,}1\ Pa.$$

Przejściowo dopuszcza się jeszcze jednostki w postaci wysokości słupa cieczy. Jednostką ciśnienia równoważną 1 mm Hg jest 1 tor (Tr). Wówczas

$$1000\ mbar = 750\ mm\ Hg,$$

$$1\ mbar = \frac{3}{4}\ Tr.$$

8. 11. 1984
B-5
33%

We wszelkich okrętowych próbach szczelności chętnie za miarę ciśnienia używa się wysokości słupa wody (10 m słupa wody, to dawna atmosfera techniczna at = 1 kG/cm^2)

$$1 \text{ mm } H_2O = 9{,}807 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ Pa} = 0{,}102 \text{ mm } H_2O.$$

W pewnych zagadnieniach hydrostatycznych nie można pomijać ciśnienia atmosferycznego. Jeśli przyjąć, że wynosi ono 760 Tr, to odpowiada to

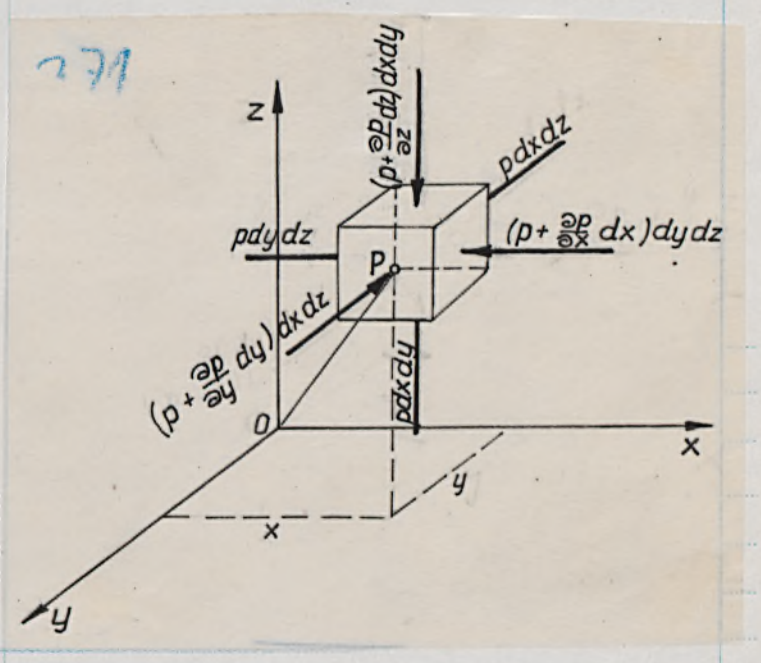
$$1{,}013 \text{ bar} = 1013 \text{ hPa} = 10333 \text{ mm } H_2O.$$

5.2. Równowaga cieczy

W przyjętym lewoskrętnym układzie współrzędnych wydzielmy element płynu w postaci nieskończenie małego prostopadłościanu o bokach dx, dy, dz i wierzchołku P(x,y,z). Rozpatrzmy warunki równowagi płynu o gęstości $\rho(x,y,z)$, który wypełnia pewną przestrzeń i znajduje się w spoczynku. Na ten element płynu, jeśli pominąć siły międzycząsteczkowe, działają siły zewnętrzne w postaci sił masowych i sił powierzchniowych. Jednostkowa siła masowa jest równa

$$\vec{F} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}, \qquad (5.4)$$

gdzie: X, Y, Z są rzutami głównego wektora jednostkowej siły masowej. Jednostkowa siła masowa ma wymiar przyspieszenia. Na wydzielony więc element o masie $dm = \rho dxdydz$ działa siła masowa $\vec{F}\rho dxdydz$, której rzuty na osie współrzędnych są odpowiednio równe: $X\rho dxdydz$, $Y\rho dxdydz$ i $Z\rho dxdydz$. Ciśnienie p panujące w dowolnym punkcie P ma we wszystkich kierunkach stałą wartość zależną tylko od położenia punktu, czyli $p(\vec{r}) = p(x,y,z)$. Jeśli więc siły powierzchniowe działające na ścianki wzajemnie prostopadłe o wierzchołku w punkcie P są równe pdydz, pdxdz i pdxdy, to po przesunięciu w kierunku tych osi przyrosty ciśnień odpowiednio będą: $\frac{\partial p}{\partial x}dx$, $\frac{\partial p}{\partial y}dy$, $\frac{\partial p}{\partial z}dz$, lecz zwrot będą mieć przeciwny. Stąd zgodnie z ogólnymi warunkami równowagi dla dowolnego układu materialnego, w tym i dla wydzielonego elementu płynu, suma rzutów sił na odpowiednie osie współrzędnych jest równa zero (rys. 5.2).



Rys. 5.2

$$X\,\rho\,dxdydz + pdydz - (p + \frac{\partial p}{\partial x}\,dx)dydz = 0,$$

$$Y\,\rho\,dxdydz + pdxdz - (p + \frac{\partial p}{\partial y}\,dy)dxdz = 0,$$

$$Z\,\rho\,dxdydz + pdxdy - (p + \frac{\partial p}{\partial z}\,dz)dxdy = 0.$$

Równania po przekształceniu mają postać

$$X = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}\,,$$

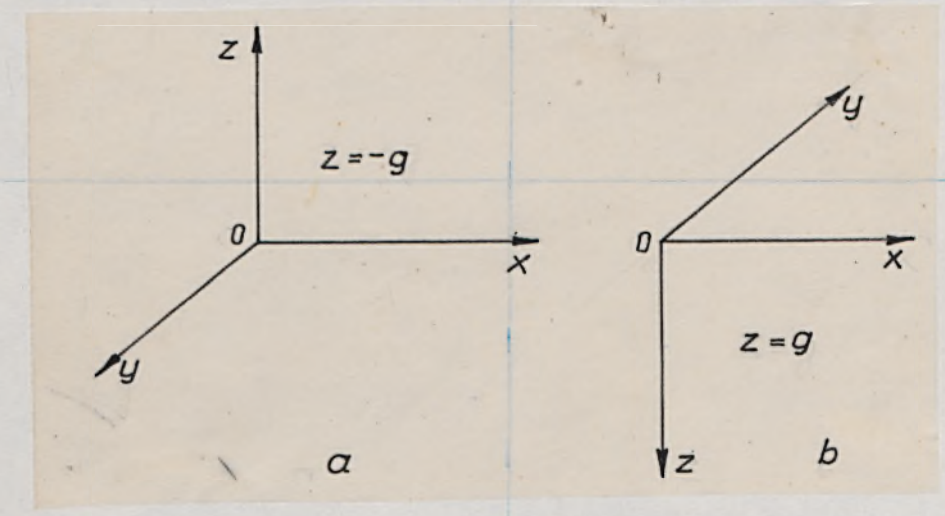
$$Y = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}\,,$$

$$Z = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}\,, \qquad (5.5)$$

i nazywane są równaniami Eulera. Są to podstawowe równania hydrostatyki. Można je zapisać w postaci jednego równania wektorowego

$$\vec{F} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\,\vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y}\,\vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z}\,\vec{k}\right) \qquad (5.6)$$

$$= \frac{1}{\rho}\,\vec{\nabla}p = \frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p.$$



Rys. 5.3

Gdy rozpatrujemy płyn w polu sił ciężkości, to

$$\vec{F} = Z\,\vec{k} = -\vec{k}g\,,$$

co jest słuszne, gdy oś z jest skierowana w górę jak na rys. 5.3a. Jeśli przyjąć układ, w którym płaszczyzna Oxy leży na powierzchni płynu a oś Z jest skierowana pionowo w dół, wówczas

$$Z = g, \quad \text{a} \quad X = 0 \quad \text{i} \quad Y = 0.$$

Jeśli przyjąć układ 5.3a

$$-\vec{k}\,\rho g = \vec{i}\,\frac{\partial p}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial p}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial p}{\partial z}\,,$$

lecz

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \qquad \text{i} \qquad \frac{\partial p}{\partial y} = 0,$$

8. 11. 1984
B-5
33%

gdyż ciśnienie p nie zależy od współrzędnych x i y, więc

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \rho g.$$

Ponieważ w naszych rozważaniach możemy przyjąć, że ρ = const, więc

$$\frac{dp}{dz} = - \rho g,$$

a ciśnienie $p = - \rho g z + C$.

Dla $z = 0$ $p = p_a$, czyli ciśnienie na powierzchni płynu jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, stąd

$$p = - \rho g z + p_a. \qquad (5.7)$$

Wzór (5.7) nosi nazwę wzoru manometrycznego. Przedstawia on zasadę działania urządzeń cieczowych do pomiarów ciśnień.

W przypadku, gdy siły masowe można pominąć (siły powierzchniowe są bardzo duże w stosunku do sił masowych, np. w prasach hydraulicznych), tzn. gdy $\vec{F} = 0$, wówczas

$$\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p = 0, \qquad (5.8)$$

czyli $p = \text{const}$.

Znaczy to, że w każdym punkcie cieczy ciśnienie jest jednakowe. Jest to tzw. prawo Pascala.

W przypadku, gdy gęstość ρ nie jest stała, równowaga cieczy ma też miejsce, gdy powierzchnie stałego ρ pokrywają się z powierzchniami stałego ciśnienia p (płyn barotropowy). Informacja, że linie rozdziału wody o różnej gęstości są równoległe do swobodnej powierzchni, nie jest istotna przy rozpatrywaniu równowagi okrętów nawodnych, ma jednak znaczenie dla okrętu podwodnego w stanie zanurzonym.

5.3. Reakcje hydrostatyczne na ściany płaskie

Jeśli płyn jest w spoczynku lub porusza się np. w naczyniu jako ciało stałe, to wówczas naprężenia styczne są równe zero, a wektor naprężeń jest równy

$$\vec{p}_n = - \vec{n} p,$$

gdzie $\vec{n}$ jest jednostkowym wektorem normalnym, skierowanym na zewnątrz powierzchni. Oddziaływanie płynu na ścianę o powierzchni S sprowadza się do siły i momentu tej siły, określonych przez wzory

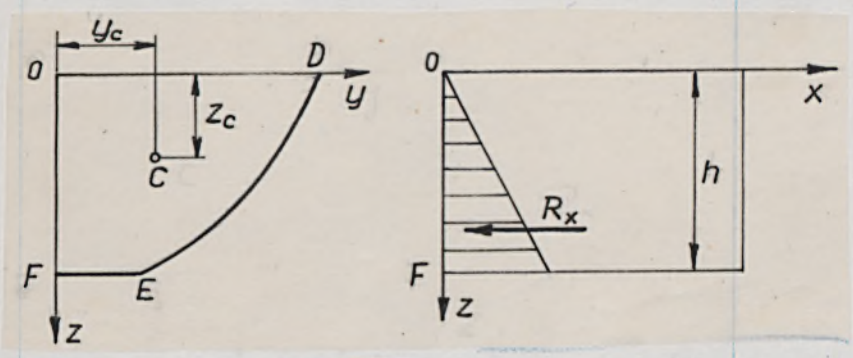
$$\vec{R} = - \int_S \vec{n} p \, dS, \qquad (5.9)$$

i

$$\vec{M} = - \int_S \vec{r} \times \vec{n} p \, dS. \qquad (5.10)$$

Oddziaływanie płynu znajdującego się w równowadze na sztywne ściany, które ograniczają ten płyn, jest reakcją hydrostatyczną. Siłę tę nazywamy parciem lub naporem. Przyjmijmy, że ciecz znajduje się w zbiorniku jak

8. 11. 1984
B-5
33%



Rys. 5.4

na rysunku 5.4. Normalna do ściany ODEF o powierzchni S_x jest $\vec{n} = \vec{i}$, a ciśnienie hydrostatyczne na głębokości z wynosi $p = \varrho gz$. Stąd napór na tę ścianę wynosi

$$\vec{R} = -\int_S \vec{n} p dS = -\int_S \varrho gz\, \vec{i}\, dS = -\vec{i}\,\varrho g \int_S z dS = \vec{i}\, R_x.$$

Całka $\int_S z dS = m_y$ jest momentem statycznym pola względem osi y znajdującej się na powierzchni wody. Zatem moment ten jest równy iloczynowi powierzchni i rzędnej środka ciężkości tej powierzchni, więc

$$R_x = -\varrho g z_c S_x, \qquad (5.11)$$

gdzie znak minus wskazuje, że siła ta jest skierowana przeciwnie do wektora $\vec{n}$. Aby więc wyznaczyć napór na ścianę, należy znać gęstość płynu, pole ściany zbiornika oraz głębokość zanurzenia geometrycznego środka ciężkości tego pola. Reakcja na dno zbiornika jest równa ciężarowi słupa cieczy działającego na jego poziome dno FE (rys. 5.4)

$$R_z = \varrho g h S_z. \qquad (5.12)$$

Aby obliczyć punkt przyłożenia naporu, należy znać moment reakcji hydrostatycznej $\vec{R}$ względem początku układu współrzędnych. Moment ten w naszym przypadku jest równy

$$\vec{M} = -\int_{S_x} \vec{r} \times \vec{n} p dS = -\int_{S_x} \vec{r} \times \vec{i}\, p\, dS.$$

Ponieważ

$$\vec{r} \times \vec{i} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & z \\ 1 & o & o \end{vmatrix} = \vec{j}\, z - \vec{k} y,$$

więc

$$\vec{M} = -\int_{S_x} (\vec{j} z - \vec{k} y)\, \varrho g z dS = -\vec{j}\,\varrho g \int_{S_x} z^2 dS + \vec{k}\,\varrho g \int_{S_x} yz dS$$

$$= -\vec{j}\, M_y + \vec{k}\, M_z$$

Znając moment $\vec{M}$ i siłę $\vec{R}$ działające na daną ścianę płaską, można obliczyć punkt przyłożenia reakcji $\vec{R}$, czyli środek parcia

6. 11. 1984
B-5
33%

$$\vec{M} = \vec{r}_D \times \vec{R} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_D & y_D & z_D \\ R_x & 0 & 0 \end{vmatrix} =$$

$$= \vec{j}\, z_D\, R_x - \vec{k} y_D\, R_x = -\vec{j}\, M_y + \vec{k} M_z,$$

więc

$$z_D = -\frac{M_y}{R_x} = \frac{\int_{S_x} z^2\, dS}{\int_{S_x} z\, dS} \qquad (5.13)$$

i

$$y_D = -\frac{M_z}{R_x} = \frac{\int_{S_x} y\, z dS}{\int_{S_x} z dS} . \qquad (5.14)$$

Całka $\int_{S_x} z^2 dS = J_y$ jest momentem bezwładności pola S_x względem osi y. Wykorzystując wzór Steinera moment ten można zapisać

$$J_y = J_{\bar{y}} + S_x z_c^2 ,$$

gdzie $J_{\bar{y}}$ jest momentem bezwładności pola S_x względem osi przechodzącej przez środek ciężkości tego pola. Tak więc środek naporu

$$z_D = \frac{S_x Z_c^2 + J_{\bar{y}}}{S_x Z_c} = z_c + \frac{J_{\bar{y}}}{S_x Z_c} \qquad (5.15)$$

leży poniżej środka ciężkości pola S_x.

Wyrażenie $\int_{S_x} yzdS = J_{yz}$ jest momentem dewiacyjnym pola względem osi y i z. Moment ten można także wyrazić za pomocą momentu $J_{\bar{y}\bar{z}}$ względem osi przechodzących przez środek ciężkości pola

$$J_{yz} = J_{\bar{y}\bar{z}} + y_c z_c S_x .$$

Wówczas druga współrzędna środka naporu jest równa

$$y_D = y_c + \frac{J_{\bar{y}\bar{z}}}{S_x Z_c} . \qquad (5.16)$$

W ten sposób wyznacza się reakcję hydrostatyczną oraz jej punkt przyłożenia na płaskie ściany o dowolnym konturze nie tylko przy ich położeniu pionowym, ale i odchylonych od pionu. Jest to ważne dla cieczy działających na ściany od wewnętrznej strony zbiornika, jak i od jego strony zewnętrznej, i gdy z przeciwnej strony naporu występuje ciśnienie równe ciśnieniu na powierzchni wody.

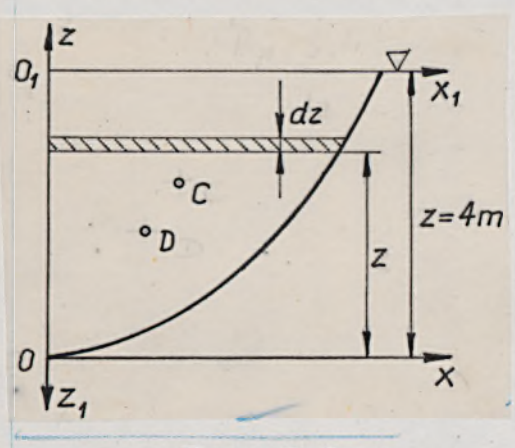
6. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Przykład 5.1

Obliczyć napór wody o gęstości $\varrho = 1025$ kg/m^3 na pionową grodź, której bok krzywoliniowy jest opisany równaniem $z = \frac{1}{16} x^3$. Poziom wody sięga $z = 4$ m. Obliczyć punkt przyłożenia naporu.

Rozwiązanie

Przy rozwiązywaniu tego typu zadań ze względu na zmianę ciśnienia zgodnie ze wzorem manometrycznym wygodnie jest przyjmować początek układu na powierzchni wody, podany zaś w temacie zadania przekrój określony jest w układzie przesuniętym o $z = 4$ m poniżej lustra wody, a oś z jest skierowana w przeciwnym kierunku. Aby uniknąć pomyłki, szczególnie przy obliczaniu momentu dewiacyjnego celowym jest sprowadzenie obliczeń do układu $O_1 x_1 z_1$ (rys. 5.5). Przejście z układu do układu określają związki



Rys. 5.5

$$x_1 = x,$$
$$z_1 = 4 - z.$$

Napór na ściankę wynosi

$$R_y = \int_S p\,dS = \varrho g \int_S z_1\,dS = \varrho g\, z_{c_1} S = \varrho g\, m_{x_1},$$

gdzie m_{x_1} jest momentem statycznym względem osi X_1

$$m_{x_1} = \int (4-z)\,dS = 4S - \int z\,dS = 4S - m_x,$$

a m_x jest momentem statycznym pola względem osi X. Pole ścianki wynosi

$$S = \int_0^z x\,dz = \sqrt[3]{16} \int_0^4 z^{1/3} dz = 4^{2/3} \cdot \frac{3}{4} \cdot z^{4/3} \Big|_0^4 = 12 \text{ m}^2.$$

Moment statyczny

$$m_x = \int_S z\,dS = 4^{2/3} \int_0^4 z^{4/3}\,dz = \frac{3}{7} \cdot 4^{2/3} \cdot z^{7/3} \Big|_0^4 = 27{,}43 \text{ m}^3.$$

Napór na grodź

$$R_y = \varrho g(4S - m_x) = 1025 \cdot 9{,}81(4 \cdot 12 - 27{,}43) = 2{,}07 \cdot 10^5 \text{ N}.$$

Rzędna naporu jest ilorazem momentu naporu względem osi X_1 przez napór. Moment ten jest równy

$$M_{x_1} = \int_S z_1 p\,dS = \varrho g \int_S z_1^2\,dS = \varrho g\, J_{x_1},$$

gdzie J_{x_1} jest momentem bezwładności pola przekroju względem osi x_1.
Moment ten jest równy

$$J_{x_1} = \int_S (4-z)^2 dS = \int (16-8z+z^2) dS = 16S - 8m_x + J_x ,$$

gdzie J_x jest momentem bezwładności pola względem osi X,

który wynosi

$$J_x = \int_S z^2 dS = \int_0^z xz^2 dz = 4^{2/3} \int_0^4 z^{7/3}\, dz = \frac{3}{10} \cdot 4^{2/3} \cdot z^{10/3} \Big|_0^4 = 76,80 \text{ m}^4,$$

a

$$J_{x_1} = 16 \cdot 12 - 8 \cdot 27,43 + 76,80 = 49,36 \text{ m}^4 ,$$

więc

$$Z_D = \frac{M_{x_1}}{R_y} = \frac{J_{x_1}}{m_{x_1}} = \frac{49,36}{4 \cdot 12 - 27,43} = 2,40 \text{ m} .$$

Do obliczenia odciętej naporu konieczny jest moment naporu względem osi Z_1

$$M_{z_1} = \varrho g \int_S X_1 p dS = \varrho g \int_S X_1 Z_1 \, dS = \varrho g \, J_{x_1 z_1},$$

gdzie $J_{x_1 z_1}$ jest momentem dewiacyjnym względem osi X_1 i Z_1. Moment ten jest równy

$$J_{x_1 z_1} = \int_S X(4-Z) dS = 4 \int_S x dS - \int_S xz dS = 4 m_z - J_{xy} ,$$

Moment statyczny względem osi z jest równy

$$m_z = \frac{1}{2} \int_S x dS = \frac{1}{2} \int_0^z x^2 dz = \frac{1}{2} \cdot 4^{4/3} \int_0^4 z^{2/3} dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} \cdot 4^{4/3} \, z^{5/3} \Big|_0^4 = 19,20 \text{ m}^3,$$

a moment bezwładności

$$J_{xz} = \int_S xz dS = \int_0^x x dx \int_0^z z dz = \frac{1}{2} \int_0^z x^2 z dz =$$

$$= \frac{1}{2} \, 4^{4/3} \int_0^4 z^{5/3} dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{8} \cdot 4^{4/3} \cdot z^{8/3} \Big|_0^4 = 48 \text{ m}^4.$$

Odcięta środka naporu jest równa

$$y_D = \frac{M_{z_1}}{R_y} = \frac{J_{x_1 z_1}}{m_{x_1}} = \frac{4 m_z - J_{xz}}{4 S - m_x} = \frac{4 \cdot 19,2 - 48}{4 \cdot 12 - 27,43} = 1,40 \text{ m}.$$

Dla porównania współrzędne środka ciężkości pola są równe

$$z_{c_1} = 4 - \frac{m_x}{S} = 4 - \frac{27,43}{12} = 1,71 \text{ m}.$$

$$y_c = \frac{m_z}{S} = \frac{19,2}{12} = 1,60 \text{ m}.$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°/₀

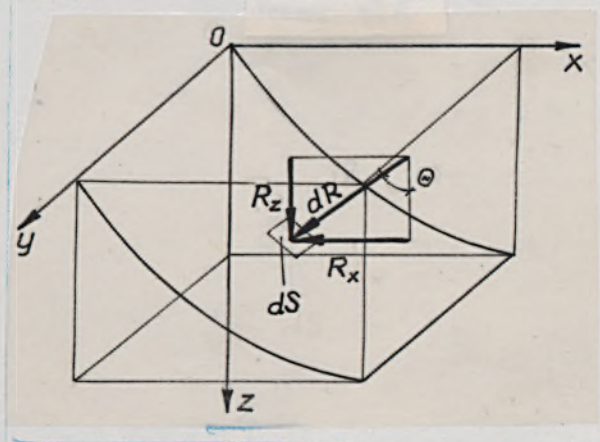
5.4. Reakcje hydrostatyczne na ściany zakrzywione

Jeśli rozpatrywać ścianę o krzywiźnie w jednej tylko płaszczyźnie Oxz (rys. 5.6) składowa pozioma jest równa parciu na rzut tej ściany na płaszczyznę Oyz, czyli

$$dR_x = dR \sin\Theta = \rho g z dS \sin\Theta = \rho g z dS_x ,$$

stąd

$$R_x = -\rho g \int_{S_x} z dS_x = -\rho g\, m_y = -\rho g Z_{c_x} S_x, \qquad (5.17)$$



Rys. 5.6

gdzie Z_{c_x} jest tu pionową odległością środka ciężkości pola S_x od powierzchni cieczy. Jeżeli ściana zbiornika posiada także krzywiznę w płaszczyźnie Oyz, wystąpi druga pozioma składowa

$$R_y = -\rho g \int_{S_y} z dS_y = -\rho g\, m_x = -\rho g Z_{c_y} S_y \qquad (5.18)$$

gdzie Z_{c_y} jest głębokością zanurzenia geometrycznego rzutu pola S_y na płaszczyznę Oxz.

Składową pionową określić można jako ciężar słupa cieczy działający na poziomy rzut powierzchni S.

$$dR_z = dR \cos\Theta = \rho g z\, dS \cos\Theta = \rho g z dS_z = \rho g dV,$$

więc

$$R_z = \int dR_z = \rho g \int_V dV = \rho g V, \qquad (5.19)$$

gdzie V jest objętością słupa cieczy o zmiennych wysokościach Z i podstawie S_z, co jest równoznaczne objętości nad zakrzywioną powierzchnią S. Linia działania tej składowej przechodzi przez środek tej objętości. Wypadkowy napór na ścianę zakrzywioną jest równy

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} . \qquad (5.20)$$

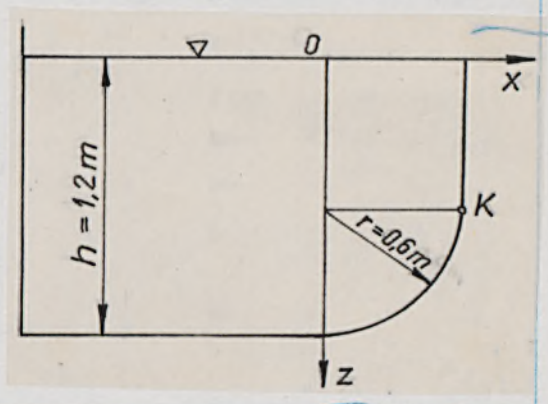
Do utrzymania takiej ściany w równowadze musi być jeszcze przyłożony moment równy sumie momentów wszystkich składowych naporu względem wybranych osi współrzędnych. Składowe momentu określają zależności

$$M_x = \rho g \int_S z(y dS_z - z dS_y),$$
$$M_y = \rho g \int_S z(z dS_x - x dS_z), \qquad (5.21)$$
$$M_z = \rho g \int_S z(x dS_y - y dS_x).$$

8. 11. 1984
B-5
33%

Przykład 5.2

Zbiornik wody posiada fragment ściany w postaci ćwiartki walca o promieniu r=0,6 m. Napełniony jest wodą o $\rho = 1000$ kg/m^3 do wysokości h = 1,2 m. Szerokość zbiornika wynosi a = 0,6 m. Obliczyć wypadkowy napór działający na tę zakrzywioną ścianę zbiornika oraz moment potrzebny do jego zrównoważenia.



Rys. 5.7

Rozwiązanie

Do obliczenia reakcji poziomej konieczny jest rzut powierzchni ściany na płaszczyznę Oyz oraz środek ciężkości tej powierzchni

$$R_x = \rho g Z_c S_x = \rho g(h - \tfrac{1}{2}r)r\cdot a = 1000\cdot 9{,}81(1{,}2 - 0{,}3)0{,}6\cdot 0{,}6 = 3178 \text{ N}.$$

Składowa pionowa jest równa ciężarowi słupa wody na ścianę zakrzywioną

$$R_z = \rho g a(h - r + \frac{\pi r^2}{4}) = 1000\cdot 9{,}81(1{,}2 - 0{,}6\cdot\tfrac{1}{4}\cdot\pi\cdot 0{,}6^2) = 8662 \text{ N}.$$

Wypadkowy napór jest równy

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_z^2} = \sqrt{3178^2 + 8662^2} = 9227 \text{ N}.$$

Środek naporu na poziomym rzucie powierzchni

$$Z_D = Z_c + \frac{J_y}{Z_c S} = h - \frac{r}{2} + \frac{r^3\cdot a}{12(h - \frac{r}{2})\cdot r\cdot a} =$$

$$= 1{,}2 - 0{,}6 + \frac{0{,}6^3\cdot 0{,}6}{12(1{,}2-0{,}3)\cdot 0{,}6\cdot 0{,}6} = 0{,}93 \text{ m}.$$

Środek objętości słupa cieczy nad zakrzywioną ścianką wynosi

$$X_D = \frac{M_{vyz}}{V} = \frac{m_z}{S}.$$

Wiedząc, że odległość środka ciężkości ćwiartki pola koła od osi równa się

$$X_c = \frac{4}{3}\cdot\frac{r}{\pi},$$

$$X_D = \frac{r(h-r)\frac{r}{2} + \frac{\pi r^2}{4}\cdot\frac{4}{3}\cdot\frac{r}{\pi}}{r(h-r) + \frac{\pi r^2}{4}} = \frac{(h-r)\frac{r}{2} + \frac{r^2}{3}}{h-r + \frac{\pi r}{4}} =$$

$$= \frac{(1{,}2 - 0{,}6)0{,}3 + \frac{1}{3}\cdot 0{,}6^2}{1{,}2 - 0{,}6 + \frac{1}{4}\cdot\pi\cdot 0{,}6} = 0{,}280 \text{ m}.$$

8. 11. 1984
B-5
33%
~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
Str. 65

Obliczając moment względem punktu K otrzymamy

$$M = R_z(r-x_D) + R_x\left[Z_D - (h-r)\right] =$$

$$= 8662(0,60 - 0,28) + 3178(0,93 - 1,2 + 0,6) = 3821 \text{ Nm}.$$

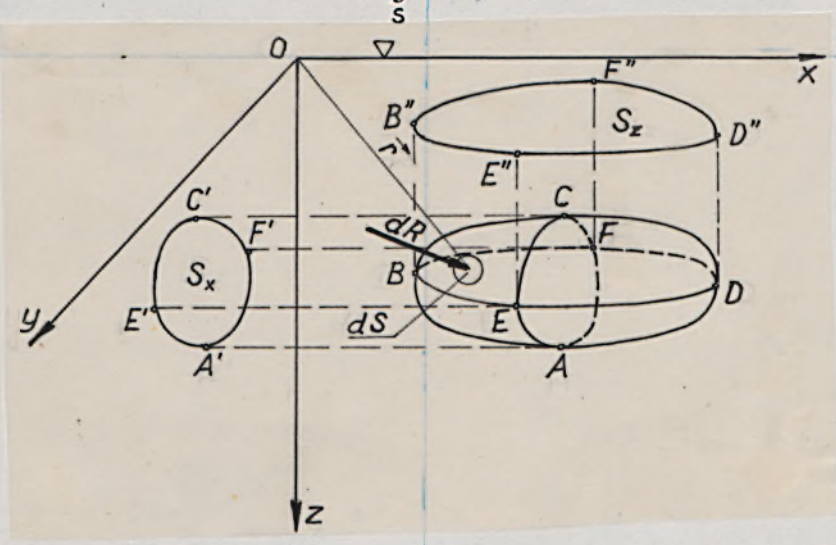
5.5. Reakcja hydrostatyczna na ciało pływające

Przyjmijmy, że ciało sztywne o dowolnym kształcie jest całkowicie zanurzone w płynie będącym w spoczynku. Przyjęty układ osi współrzędnych jest zgodny z rys. 5.8, gdzie pozioma płaszczyzna Oxy pokrywa się ze swobodną powierzchnią płynu, a oś z jest skierowana pionowo w dół [20]. Mają tu zastosowania rozwiązania określające siły i momenty działające na sztywną ścianę płaską i zakrzywioną. Na każdy element powierzchni tego zanurzonego ciała, będący sztywną ścianą zamkniętą, działa elementarny napór $d\vec{R} = -\vec{n}pdS = -\varrho g\,\vec{n}\,zdS$, skierowany do wewnątrz ciała wzdłuż normalnej do elementu powierzchni dS. Całkowity napór hydrostatyczny na dane ciało jako główny wektor elementarnych naporów hydrostatycznych jest równy

$$\vec{R} = -\varrho g \int_S \vec{n}\,zdS,$$

a główny wektor momentu tych sił

$$\vec{M} = -\varrho g \int_S \vec{r} \times \vec{n}\,zdS.$$



Rys. 5.8

Jeśli weźmiemy pod uwagę rzuty poziome głównego wektora naporu hydrostatycznego na osie x i y, to zauważymy, że są one równe zeru, gdyż ich wartości bezwzględne działające na powierzchnię ABC i ADC działają na ten sam kontur AECF, lecz ich zwroty są przeciwne. Pola rzutów powierzchni tego ciała na płaszczyzny prostopadłe do dowolnego kierunku poziomego są równe i są położone na jednakowych głębokościach, stąd składowa pozioma naporu hydrostatycznego w dowolnym kierunku działająca na ciało zanurzone w płynie jest równa zeru, więc

$$R_x = R_y = 0.$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Wobec tego całkowity napór sprowadza się do składowej pionowej. Jest ona równa różnicy dwóch naporów pionowych, działających na dwie części powierzchni: na dolną BAD i górną BCD. Rzuty tych powierzchni na płaszczyznę Oxy są równe. Zatem napór na górną powierzchnię jest równy

$$\vec{R}_1 = \vec{k}\,\rho g \int_{S_1} z\,dS = \vec{k}\,\rho g\, V_1,$$

a na dolną

$$\vec{R}_2 = -\vec{k}\,\rho g \int_{S_2} z\,dS = -\vec{k}\,\rho g\, V_2,$$

gdzie V_1 jest objętością przestrzeni ograniczoną tworzącymi stycznymi do powierzchni tego ciała i prostopadłymi do płaszczyzny Oxy, a którą od góry określa powierzchnia S_z, a od dołu powierzchnia S_1 obejmująca kontur BCD. Z kolei objętość V_2 jest ograniczona od dołu powierzchnią S_2, w skład której wchodzi kontur BAD. Kierunki tych naporów są przeciwne. Zatem napór wypadkowy jest równy

$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 = -\vec{k}\,\rho g(V_2 - V_1).$$

Jak widać, różnica objętości $V_2 - V_1$, jest równa objętości ciała zanurzonego w płynie; można też powiedzieć, że jest to objętość płynu wypartego przez zanurzone ciało. Jest to tzw. prawo Archimedesa. Zatem

$$\vec{R} = -\vec{k}\,\rho g\, V$$

jest siłą skierowaną pionowo w górę prostopadle do powierzchni wody, a jej moduł

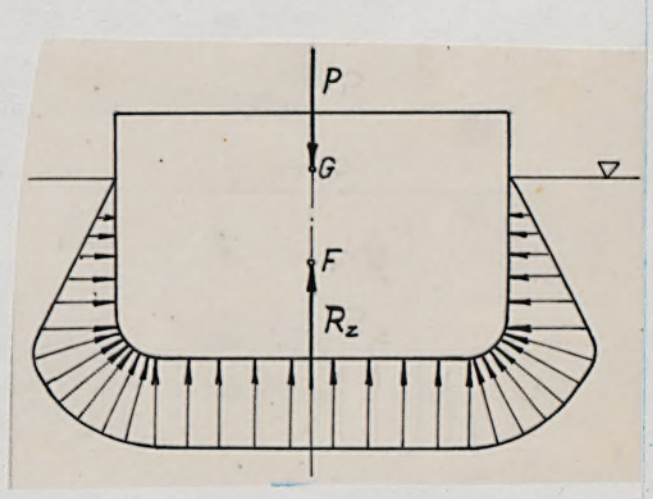
$$R_z = \rho g\, V,$$

co nie nastręcza trudności w obliczeniu, gdyż sprowadza się do określenia objętości danego ciała. Siłę tę nazywamy wyporem, a jej moduł wypornością.

Ten sam sposób rozumowania można zastosować dla ciała lub okrętu pływającego na powierzchni wody (rys. 5.9). Objętość V jest ograniczona tu powierzchnią zwilżoną kadłuba S i polem wodnicy S_{wL}. Wówczas także

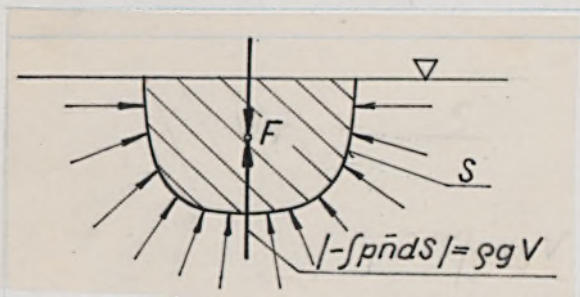
$$\vec{R} = -\vec{k}\,\rho g\, V,$$

czyli reakcja jest taka sama jak dla ciała całkowicie zanurzonego. Decyduje tu objętość zanurzonej części kadłuba. Reakcja ta przechodzi przez środek objętości zanurzonej bryły. W przypadku kadłuba punkt ten nazywamy środkiem wyporu. Znajomość położenia tego punktu jest niezbędna przy rozpatrywaniu równowagi okrętu. Dlatego, jeśli wziąć pod uwagę skomplikowany kształt jaki posiada kadłub okrętu, umiejętność obliczania wyporności i położenia środka wyporu odgrywa bardzo doniosłą rolę.



Rys. 5.9

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 5.10

Wartość reakcji naporu hydrostatycznego działającą na ciało pływające lub całkowicie zanurzone oraz określenie punktu przyłożenia tej siły można też wyznaczyć wykorzystując tzw. zasadę zesztywnienia, wprowadzoną po raz pierwszy do hydrostatyki w drugiej połowie XVI wieku przez S. Stevina [20]. Wyobraźmy sobie, że do płynu będącego w stanie równowagi wprowadzimy powierzchnię kontrolną S ograniczającą pewną przestrzeń o objętości V. Możemy teraz myślowo zesztywnić cały płyn na zewnątrz i wewnątrz powierzchni S. Równowaga płynu nie może być zakłócona, gdy na miejsce zesztywnionego wewnątrz powierzchni S płynu wstawimy ciało o tym samym kształcie, tej samej objętości i tym samym ciężarze. Reakcja więc musi być równa ciężarowi usuniętego płynu $\rho g V$ (lub wypartego przez ciało pływające), co jest równoznaczne z prawem Archimedesa, i reakcja ta musi przechodzić przez środek ciężkości tego płynu, co jest równoznaczne ze środkiem objętości tego kształtu (rys. 5.10).

B-5
33%

6. PŁYWALNOŚĆ OKRĘTU

„Kiedy się ładunek rozłoży na nabrzeżu, wydaje się niepodobieństwem, aby wszystko to mogło się zmieścić na tym oto statku"

6.1. Warunki równowagi

Równowaga okrętu pływającego na wodzie spokojnej sprowadza się do spełnienia dwu warunków:

$\sum \vec{F} = 0$ - suma sił działających na okręt jest równa zero,

$\sum \vec{M} = 0$ - suma momentów zewnętrznych jest równa zero.

Warunki te wyznaczają położenie równowagi okrętu względem powierzchni wody. Wiadomo, że istnieją trzy rodzaje równowagi: stała, obojętna i chwiejna. Ta ostatnia, określająca stan niestateczny, może być odrzucona przy rozpatrywaniu równowagi okrętu. Przy badaniu warunków pływania okrętu równowaga musi być stała, dla niektórych stopni swobody - a okręt jest układem o 6 stopniach swobody - dopuszcza się równowagę obojętną.

Równowaga jest stała, jeśli okręt pod wpływem działania jakiegoś zakłócenia wychyli się z położenia równowagi, a po zniknięciu tego zakłócenia wróci do swojego początkowego położenia. Dlatego, aby to nastąpiło, przy wychyleniu okrętu muszą pojawić się siły i momenty przywracające, które sprowadzą wychylony okręt do pierwotnego położenia. Takie siły i momenty przywracające muszą mieć zatem znaki przeciwne do wychyleń s. Ogólnie warunek ten można zapisać

$$\frac{\partial F_s}{\partial s} < 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial M_s}{\partial s} < 0. \qquad (6.1)$$

Jeśli brak jest sił i momentów przywracających, nie można mówić o równowadze stałej.

Gdy okręt utrzymuje się na powierzchni wody, to wówczas warunek równowagi sił w układzie prostokątnym można zapisać

$$\sum F_x = 0 \; ; \qquad \sum F_y = 0 \; ; \qquad \sum F_z = 0.$$

Dwa pierwsze warunki są zawsze spełnione, gdyż $R_x = R_y = 0$. Po przesunięciu okrętu pod wpływem jakiegoś impulsu wzdłuż osi x i y kształt podwodnej części kadłuba nie ulega zmianie, dlatego też nie pojawi się siła przywracająca, która by przemieściła okręt z powrotem do jego początkowego położenia, więc

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0.$$

Zatem jest to stan równowagi obojętnej. Podobnie ma to miejsce przy odchyleniu okrętu o kąt ψ wokół pionowej osi z. Wówczas także nie pojawia się moment przywracający i

$$\frac{\partial M_\psi}{\partial \psi} = 0.$$

Widać stąd, że okręt unoszący się nieruchomo na wodzie jest w równowadze obojętnej względem wszelkich zakłóceń działających w płaszczyźnie poziomej i po ustaniu działania tego zakłócenia okręt nie powraca do swego położenia pierwotnego.

W kierunku pionowym działają na okręt dwie siły. Jedną z nich jest hydrostatyczny napór, czyli siła wyporu równa

$$R_z = - D = - \varrho g V, \tag{6.2}$$

skupiona w środku wyporu w punkcie F o współrzędnych (x_F, y_F, z_F). Drugą siłą jest ciężar okrętu P. Siła ta związana jest z środkiem ciężkości okrętu G o współrzędnych (x_G, y_G, z_G). Ciężar okrętu

$$P = gM = g \sum m_i \tag{6.3}$$

jest równy sumie wszystkich mas składających się na okręt i przewożony ładunek pomnożonych przez przyspieszenie ziemskie. Położenie środka ciężkości okrętu określa iloraz momentu statycznego wszystkich składowych mas przez całą masę okrętu

$$\vec{r}_G = \frac{\sum m_i \cdot \vec{r}_i}{\sum m_i} = \vec{i}\, x_G + \vec{j}\, y_G + \vec{k}\, z_G. \tag{6.4}$$

Współrzędne środka ciężkości okrętu względem wybranego układu odniesienia są równe

$$x_G = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \; ; \quad y_G = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} \; ; \quad z_G = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i} \; . \tag{6.5}$$

Aby zachodziła równowaga, spełniona musi być zależność

$$\sum F_z = D + P = 0 \tag{6.6}$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

wskazująca, że wypór okrętu jest równy ciężarowi okrętu. Siły te działają prostopadle do powierzchni wody, są równe, lecz przeciwnie skierowane.

W przypadku, gdy $P > D$, okręt tonie lub gdy posiada wyporność rezerową, zanurza się głębiej, zaś gdy $P < D$ - okręt wynurza się aż do momentu równowagi wyporu i ciężaru. Momenty tych sił będą zerem, gdy obie te siły leżą na jednej prostej. Dla statku pływającego bez przechyłu i przegłębienia spełnione muszą być wówczas następujące zależności

$$y_F = y_G = 0$$

i

$$x_F = x_G \tag{6.7}$$

Dla jednostki nawodnej środek ciężkości G przeważnie zawsze znajduje się powyżej środka wyporu F i okręt jest w równowadze trwałej. Orientacyjnie rzędna środka ciężkości okrętu w odniesieniu do wysokości wynosi

$$z_G = a \cdot H, \tag{6.8}$$

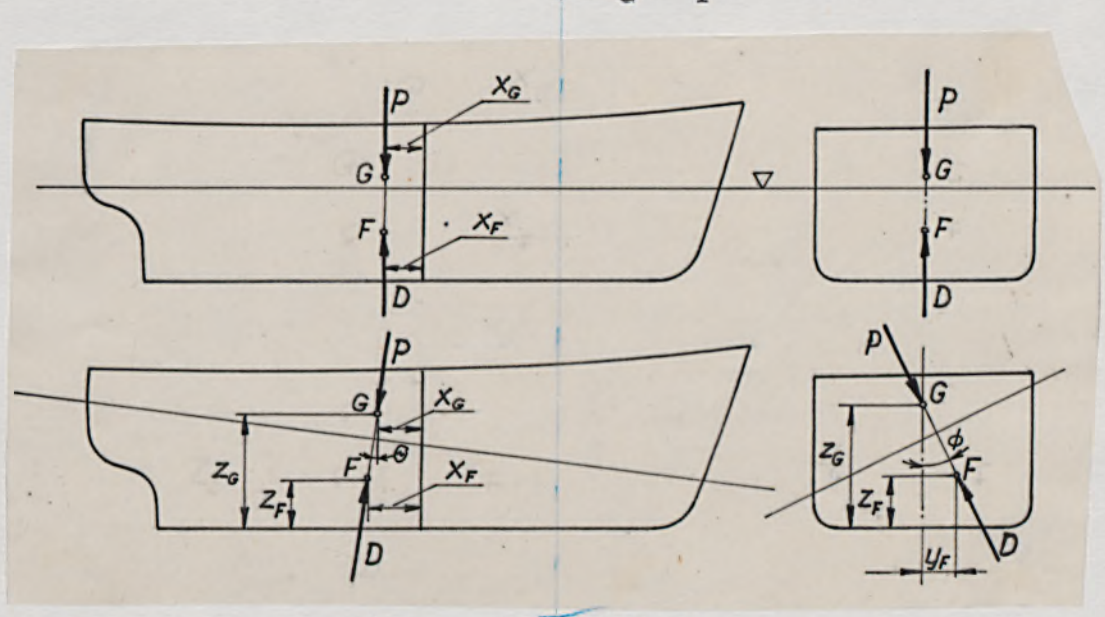
gdzie a występuje w przedziale 0,5 - 1,0.

Gdy okręt pływa z przechyłem, warunkiem, aby te dwie siły leżały na jednej prostej, jest związek (rys. 6.1).

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{y_F - y_G}{z_G - z_F}, \tag{6.9}$$

a gdy pływa z przegłębieniem

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{x_F - x_G}{z_G - z_F}. \tag{6.10}$$



Rys. 6.1

Aby okręt pływał w równowadze trwałej, musi on być odporny na pozostałe zakłócenia, tzn. wzdłuż osi z i wokół osi x i y.

Zatem muszą być spełnione następujące nierówności

$$\frac{\partial F_z}{\partial z} < 0; \qquad \frac{\partial M_\phi}{\partial \phi} < 0; \qquad \frac{\partial M_\Theta}{\partial \Theta} < 0. \tag{6.11}$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Pierwsza nierówność określa tzw. stateczność wysokościową [11], zaś dwie następne odpowiednio stateczność poprzeczną i podłużną. Stateczność poprzeczna i podłużna omówiona będzie w następnych rozdziałach.

Zachodzi teraz pytanie, czy okręt ma trwałą równowagę wysokościową. Załóżmy, że okręt pływa zanurzony do wodnicy W_o. Ciężar jego jest P, a wypór $D = \varrho g V$. Jeśli zadziała zakłócenie w kierunku osi Z_1, to statek powiększy swoje zanurzenie o $Z > 0$ i nowa objętość będzie teraz

$$V_1 = V + \Delta V.$$

Załóżmy, że kierunek siły ciężkości P pokrywa się z kierunkiem działania nowej siły wyporu $D_1 = \varrho g V$. Pojawi się teraz siła (rys. 6.2) przywracająca, równa

$$F_{z_1} = - D_1 + P = - \varrho g(V + \Delta V) + P,$$

a ponieważ

$$P = \varrho g V,$$

$$F_{z_1} = - \varrho g \Delta V. \qquad (6.12)$$

Jeśli przyrost zanurzenia jest nieduży, to wówczas można przyjąć, że w obrębie zmiany zanurzenia pole wodnicy pływania nie uległo zmianie i wtedy

$$\Delta V = S_{wL} \cdot z. \qquad (6.13)$$

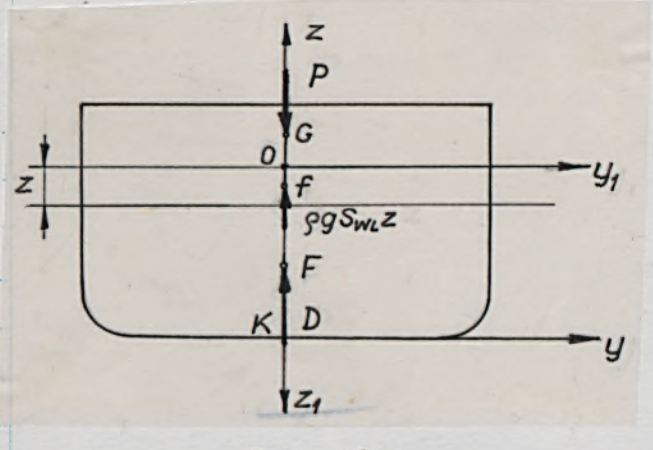
Siła przywracająca jest więc równa

$$F_{z_1} = - \varrho g \cdot S_{wL} \cdot z, \qquad (6.14)$$

a jej pochodna

$$\frac{\partial F_{z_1}}{\partial z} = - \varrho g \, S_{wL} < 0$$

jest ujemna, gdyż zawsze $\varrho g > 0$ i $S_{wL} > 0$.



Rys. 6.2

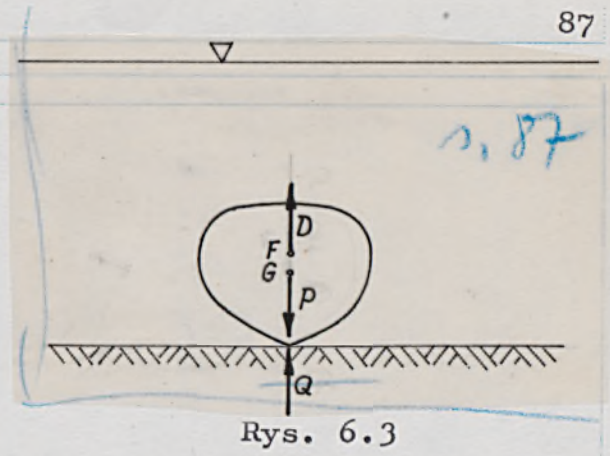
Wynika stąd wniosek, że okręt nawodny posiada stałą równowagę wysokościową. Nie można tego powiedzieć o okręcie podwodnym w stanie całkowitego zanurzenia, gdyż wówczas $S_{wL} = 0$ i $\frac{\partial F_z}{\partial z} = 0$, a zatem jest to stan równowagi obojętnej.

Rozpatrzmy jeszcze równowagę ciała spoczywającego na dnie. Jeśli takie ciało dotyka dna w jednym tylko punkcie, to reakcja gruntu lub siła, jakiej trzeba użyć (rys. 6.3), aby pod-

8. 11. 1984
B-5
33

nieść to ciało, jest równa różnicy siły ciężaru i siły wyporu

$$Q = P - D. \qquad (6.15)$$



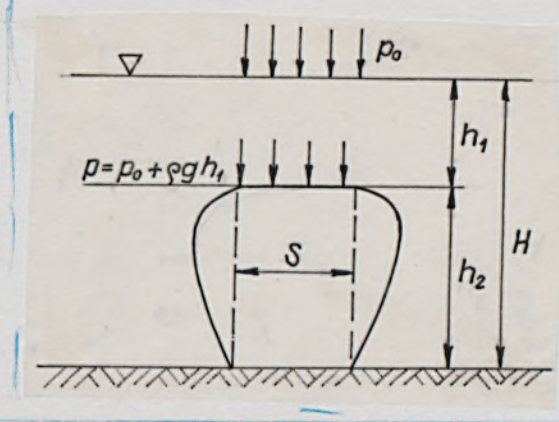
Rys. 6.3

Gdy ciało natomiast dotyka dna na pewnej swej powierzchni, należy uwzględnić ciśnienie atmosferyczne, które nie jest równoważone tu od dołu, jak również brak jest reakcji hydrostatycznej na powierzchni styku ciała z dnem. Reakcja więc gruntu na to ciało lub siła, jaka jest potrzebna do oderwania ciała od dna, czyli przezwyciężenia tzw. „siły przyssania", jest równa (rys. 6.4)

$$Q = P + pS - (\varrho gV - \varrho gh_2 S).$$

Ponieważ ciśnienie działające na górną część ciała na powierzchnię S równą powierzchni styku z dnem wynosi

$$p = p_o + \varrho gh_1,$$



Rys. 6.4

więc siła

$$Q = P + p_o S + \varrho gh_1 S - \varrho gV + \varrho gh_2 S,$$

$$Q = P - \varrho gV + S(p_o + \varrho gH), \qquad (6.16)$$

gdzie

$H = h_1 + h_2$ jest głębokością wody.

Przykład 6.1

Holownik portowy o masie M = 120 t i powierzchni wodnicy S_{wL} = 105 m^2 został zwodowany za pomocą dźwigu do zamkniętego basenu wypełnionego wodą o ϱ = 1015 kg/m^3. Wymiary basenu na poziomie zwierciadła wody są: l = 40 m i b = 12 m.

Obliczyć, o ile podniesie się poziom wody w basenie.

Obliczyć, o ile podniesie się poziom wody, gdy zanurzenie holownika zwiększy się o $\triangle T$ = 0,20 m.

Rozwiązanie:

Wyparta masa wody jest równa masie statku

$$M = lb \triangle H_1 \varrho ,$$

czyli woda podniesie się o

$$\triangle H_1 = \frac{M}{lb} = \frac{120}{40 \cdot 12 \cdot 1{,}015} = 0{,}246 \text{ m}.$$

Ten sam warunek jest spełniony przy zwiększonym zanurzeniu statku

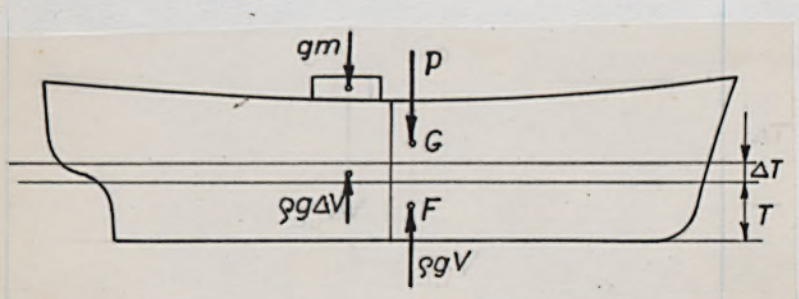
$$S_{wL} \cdot \Delta T = lb\Delta H_2,$$

$$H_2 = \frac{S_{wL} \cdot \Delta T}{l \cdot b} = \frac{105 \cdot 0{,}20}{40 \cdot 12} = 0{,}044 \text{ m}.$$

6.2. Wpływ ładunku na zmianę zanurzenia okrętu

Jeśli na statek przyjęto ciężar $p = gm$, to ciężar ten musi być zrównoważony przez dodatkowy wypór

$$p = -\varrho g \Delta V.$$



Rys. 6.5

Jeśli ciężar ten nie jest zbyt duży i nie przekracza dla typowych morskich statków handlowych $p \leqslant 0{,}1 \cdot D$, wówczas można przyjąć, że powierzchnia wodnicy w obrębie zmiany zanurzenia nie ulega zmianie i

$$\Delta V = S_{wL} \cdot \Delta T, \quad (6.17)$$

więc przyrost zanurzenia można obliczyć ze wzoru

$$\Delta T = \frac{p}{\varrho g S_{wL}}. \quad (6.18)$$

Gdy jednostka pływająca posiada na całej swej długości i w zakresie możliwej zmiany zanurzenia burty pionowe, to wzór ten daje dokładne wyniki bez żadnych ograniczeń co do przyjętego ładunku. W przypadku przyjęcia na statek ładunku p jest dodatnie, wówczas ΔT też jest dodatnie i zanurzenie okrętu powiększa się, zaś w przypadku zdjęcia ładunku p jest ujemne i zanurzenie okrętu zmniejsza się. Przyjęcie ładunku w dowolnym miejscu na statku spowoduje nie tylko zmianę zanurzenia, lecz także wywoła przechył i przegłębienie. Jeśli statek pływał bez przechyłu, to umiejscowienie środka ciężkości przyjętego ładunku w płaszczyźnie symetrii okrętu nie wywoła przechyłu. Wzdłużne umieszczenie ciężaru nie powodujące zmiany przegłębienia winno znajdować się na linii działania dodatkowej siły wyporu $\varrho g \Delta V$. W naszym przypadku przy niewielkim ładunku p przegłębienie nie ulegnie zmianie, gdy ciężar będzie przyjęty w punkcie o współrzędnej $x = x_c$ równej odciętej środka ciężkości wodnicy.

Zmianę zanurzenia okrętu można też obliczyć dokładniej, gdy znany jest pionowy współczynnik pełnotliwości $\mathcal{H}$. Jeśli założymy rozkład wodnic w postaci

$$\frac{S_{wL}}{S_{wLo}} = \left(\frac{z}{z_o}\right)^n \quad (6.19)$$

i współczynnik $\mathcal{H} = \text{const}$, to wykładnik potęgowy

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$$n = \frac{1-\varkappa}{\varkappa}, \tag{6.20}$$

a stosunek wyporności odpowiadających zanurzeniu z i z_o

$$\frac{V}{V_o} = \frac{\varkappa z\, S_{wL}}{\varkappa z_o S_{wL_o}} = \left(\frac{z}{z_o}\right)^{1/\varkappa}$$

lub

$$\frac{z}{z_o} = \left(\frac{V}{V_o}\right)^{\varkappa} = \left(\frac{D}{D_o}\right)^{\varkappa}. \tag{6.21}$$

Ponieważ $z_o = T$, a $z = T + \triangle T$ i $D = D_o + p$,

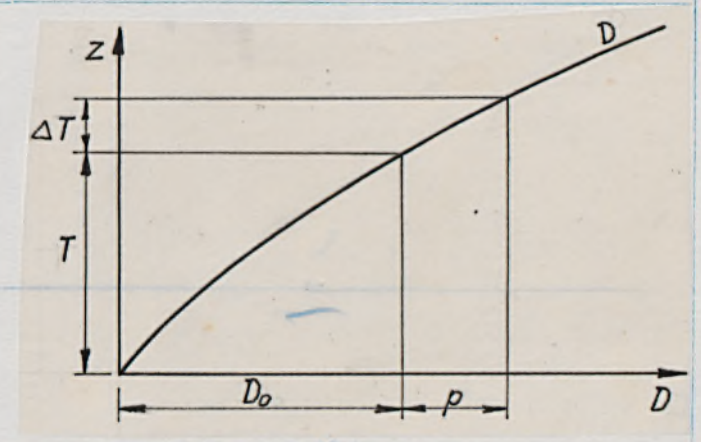
więc

$$1 + \frac{\triangle T}{T} = \left(1 + \frac{p}{D_o}\right)^{\varkappa}.$$

Zmiana więc zanurzenia pod wpływem przyjęcia ciężaru p wynosi

$$\triangle T = T\left[\left(1 + \frac{p}{D_o}\right)^{\varkappa} - 1\right]. \tag{6.22}$$

W praktyce zmianę zanurzenia pod wpływem przyjęcia lub zdjęcia ładunku określa się za pomocą krzywej wyporu dla odpowiedniej gęstości wody zgodnie z rys. 6.6. Sposób ten nie ma żadnych ograniczeń co do ilości przyjmowanego ciężaru. Stosować go można od minimalnego do maksymalnego zanurzenia. Należy jednak pamiętać, że krzywa wyporu jest obliczana i wykreślana na arkuszu krzywych hydrostatycznych dla statku nieprzegłębionego lub dla wodnic z przegłębieniem konstrukcyjnym. W przypadku dużego przegłębienia należy posłużyć się skalą Bonjeana lub wykresem omówionym w punkcie 4.9. Krzywa wyporu odgrywa więc doniosłą rolę przy wszystkich operacjach ładunkowych. Można za jej pomocą szybko ocenić, jakie będzie średnie zanurzenie okrętu, gdy znany jest ciężar, który winien być załadowany lub też odwrotnie - z pomiaru zanurzenia można szybko określić ilość przyjętego ładunku.



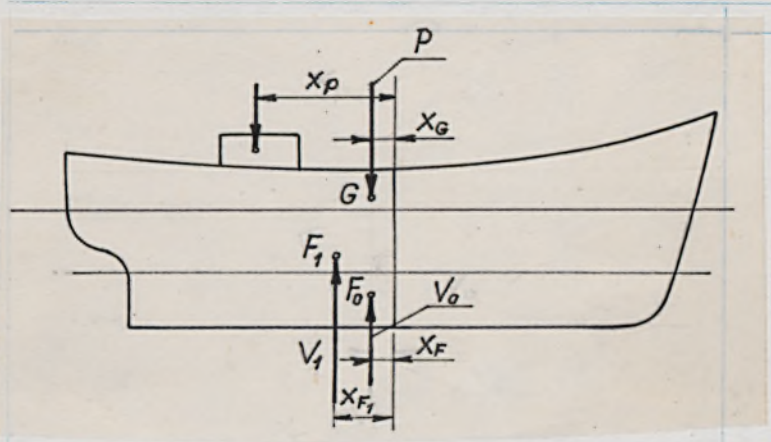
Rys. 6.6

Gdy przyjęty ładunek jest duży, z równania momentów można wyznaczyć, w jakim miejscu wzdłuż osi x należy umieścić ciężar p, aby nie wywołać przegłębienia (rys. 6.7).

Równanie momentów ma postać

$$P \cdot x_G + p \cdot x_p = \varrho g \cdot V_1 \cdot x_{F_1},$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 6.7

a odcięta ciężaru p

$$x_p = \frac{V_1 x_{F_1} - V_o x_{F_o}}{V_1 - V_o}, \quad (6.23)$$

gdzie przyjęty ciężar

$p = \varrho g(V_1 - V_o)$, a $x_G = x_{F_o}$

i $P = \varrho g V_o$.

Umieszczenie ciężaru p od tego punktu w kierunku dziobu spowoduje przegłębienie na dziób i odwrotnie, umieszczenie ciężaru w punkcie o $x < x_p$ spowoduje zwiększenie zanurzenia rufy i zmniejszenie zanurzenia dziobu.

6.3. Wpływ gęstości wody na zanurzenie okrętu

Przyjmijmy, że okręt pływa w wodzie o gęstości ϱ_o, zanurzenie jego wynosi T_o, a objętość podwodnej części kadłuba jest V_o. Jeśli okręt ten wpłynie na akwen, w którym gęstość wody jest ϱ_1, zmienia się jego zanurzenie, które wówczas wynosić będzie T_1 przy wyporności V_1. Pomija się tutaj zużycie zapasów, przyjmując, że przez cały czas P = const.

Musi być spełnione równanie pływalności, czyli

$$\varrho_o g V_o = \varrho_1 g V_1$$

lub

$$\varrho_o V_o = \varrho_1 (V_o + \Delta V).$$

Różnica między ϱ_o i ϱ_1, jak wynika z tabeli 5.1, jest niewielka, stąd zmiana objętości też jest nieduża, można więc przyjąć, że w obrębie zmiany zanurzenia pole wodnicy nie ulega zmianie, więc

$$\Delta V = S_{wL} \cdot \Delta T,$$

stąd zmiana zanurzenia wynosi

$$\Delta T = \frac{V_o(\varrho_o - \varrho_1)}{S_{wL} \cdot \varrho_1} \quad (6.24)$$

lub

$$\Delta T = \text{æ} \cdot T_o \cdot \frac{\varrho_o - \varrho_1}{\varrho_1}, \quad (6.25)$$

gdzie $V_o = \text{æ} \cdot S_{wL} \cdot T_o$.

Jeśli $\varrho_o - \varrho_1 > 0$, tzn. gdy statek wpływa z wody słonej do wody o mniejszym zasoleniu lub słodkiej, wówczas przyrost zanurzenia będzie dodatni i zanurzenie okrętu powiększa się. W przypadku przejścia z wody

8.11.1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

słodkiej do słonej zanurzenie okrętu zmniejsza się. Praktycznie zmiany zanurzenia są niewielkie. Jeśli przyjąć $\rho_o = 1025$ kg/m^3, a $\rho_1 = 1000$ kg/m^3, wówczas zmiana zanurzenia jest rzędu 2,5% zanurzenia statku.

Pływanie po akwenach o różnych gęstościach ma także wpływ na zmianę położenia środka wyporu, co z kolei wpływa na przegłębienie okrętu. Objętość podwodnej części kadłuba jest równa

$$V = \frac{D}{\rho g} .$$

W równaniu tym D i g są stałe a wielkościami zmiennymi są V i ρ. Różniczkując otrzymamy

$$dV = - \frac{D d\rho}{g \rho^2} = - \frac{V d\rho}{\rho} .$$

Wiedząc, że $dV = S_{wL}\, dz$,

$$V = - \rho S_{wL} \frac{dz}{d\rho} . \qquad (6.26)$$

Podstawiając wyrażenie na V (6.26) do wzoru (4.63) na pochodną odciętej środka wyporu

$$\frac{dx_F}{dz} = \frac{S_{wL}}{V} (x_c - x_F),$$

otrzymamy zmianę położenia odciętej środka wyporu w zależności od zmiany gęstości wody

$$dx_F = - \frac{d\rho}{\rho} (x_c - x_F). \qquad (6.27)$$

Dla współczesnych statków handlowych w zakresie zanurzeń eksploatacyjnych zawsze środek ciężkości wodnicy jest bardziej przesunięty ku rufie niż środek wyporu, tzn. $x_c < x_F$. Jeśli więc $d\rho > 0$, czyli gdy ma miejsce przejście okrętu z wody słodkiej do słonej, zmiana dx_F jest dodatnia, czyli środek wyporu przesuwa się w kierunku dziobu i statek ma tendencję do przegłębienia na rufę. W przypadku przejścia z wody słonej do słodkiej przegłębienie wystąpi na dziób. W rzeczywistości przegłębienia te są niewielkie i nie mają większego znaczenia. Zmiana zanurzenia pod wpływem zmiany gęstości wody ma także wpływ na rzędną środka wyporu. Korzystając ze wzoru (4.39) na pochodną rzędnej środka wyporu

$$\frac{dz_F}{dz} = \frac{S_{wL}}{V} (T - z_F),$$

otrzymamy wzór na zmianę rzędnej środka wyporu przy zmianie gęstości wody

$$dz_F = - \frac{d\rho}{\rho} (T - z_F). \qquad (6.28)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Ze wzoru tego widać, że przy przejściu okrętu z wody słodkiej o ρ_o do słonej o ρ_1, tzn. gdy $\rho_1 - \rho_o = d\rho > 0$ (warunki końcowe minus warunki początkowe), przyrost rzędnej jest ujemny $dz_F < 0$, gdyż wyrażenie w nawiasie jest zawsze dodatnie. Znaczy to, że środek wyporu obniża się. Przy przejściu odwrotnym środek wyporu podnosi się do góry. Zmiany te są zgodne z przyrostem zanurzenia okrętu.

Przykład 6.2

Ze statku o zanurzeniu $T_o = 6{,}00$ m, stojącego w porcie A, w którym gęstość wody wynosi $\rho_o = 1000$ kg/m^3, zdjęto ładunek o masie $m_o = 100$ t. Zanurzenie statku wskutek tego zmniejszyło się o $\Delta T = 0{,}08$ m. Po rozładowaniu statek wpłynął do portu B o $\rho_1 = 1025$ kg/m^3, zużywając po drodze $m_1 = 30$ t zapasów. W porcie B przyjęto ładunek $m_2 = 400$ t. Zanurzenie statku wynosi teraz $T_1 = 6{,}10$ m. Obliczyć objętość podwodnej części kadłuba przed zdjęciem ładunku w porcie A.

Rozwiązanie

Z równania pływalności

$$V_o \cdot \rho_o - m_o - m_1 + m_2 = V_1 \cdot \rho_1 .$$

Przyrost objętości kadłuba jest równy iloczynowi powierzchni wodnicy i przyrostu zanurzenia

$$V_1 - V_o = S_{wL}(T_2 - T_1).$$

Powierzchnię wodnicy obliczyć można z informacji o zmianie zanurzenia w porcie A

$$m_o = \rho_o \, S_{wL} \, \Delta T,$$

a stąd

$$S_{wL} = \frac{m_o}{\rho_o \Delta T} = \frac{100}{1 \cdot 0{,}08} = 1250 \text{ m}^2.$$

Wykorzystując powyższe równania, otrzymamy

$$V_1 \cdot \rho_1 - V_o \cdot \rho_o = m_2 - m_1 - m_o,$$

$$\left[(T_2 - T_1) S_{wL} + V_o\right] \rho_1 - V_o \cdot \rho_o = m_2 - m_1 - m_o$$

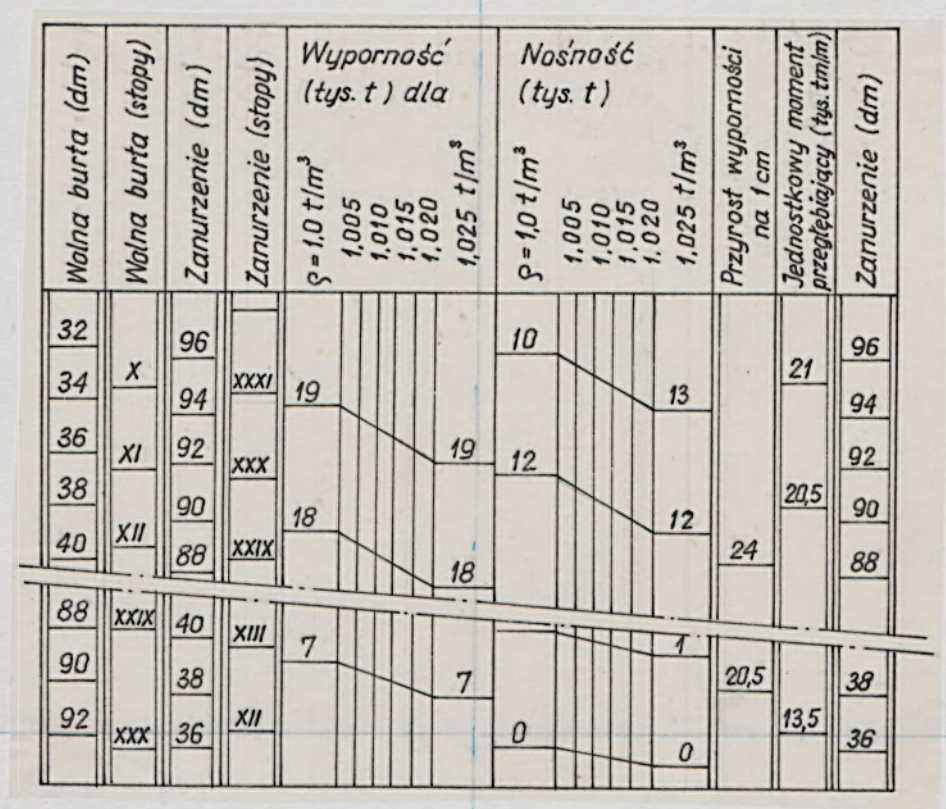
$$V_o = \frac{m_2 - m_1 - m_o - \rho_1 \cdot S_{wL}(T_1 - T_o)}{\rho_1 - \rho_o} =$$

$$= \frac{400 - 30 - 100 - 1{,}025 \cdot 1250(6{,}10 - 6{,}00)}{1{,}025 - 1{,}000} = 5675 \text{ m}^3.$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

6.4. Skala załadowania

Mimo że korzystanie z krzywej wyporności w celu określenia zmiany zanurzenia pod wpływem zmiany ilości ładunku nie jest kłopotliwe, to jednak dla załogi, a właściwie dla oficera pokładowego odpowiedzialnego za załadunek statku, przygotowuje się specjalny dokument, tzw. skalę załadowania, wygodniejszy w praktycznym zastosowaniu. Jest to nomogram wykonany na podstawie krzywej wyporności, służący do szybkiego wyznaczenia



Rys. 6.8

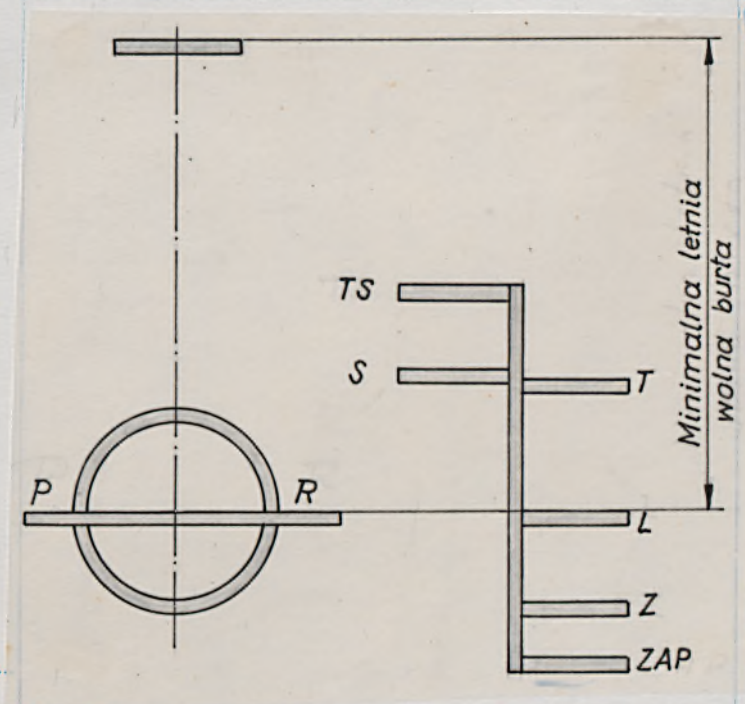
nowego zanurzenia przy zmianie ilości ładunku w warunkach różnej gęstości wody. Z nomogramu tego można też szybko odczytać, jaka będzie wolna burta lub ile jeszcze ładunku może statek przyjąć, aby osiągnąć dopuszczalne zanurzenie. Skala załadowania przedstawia zbiór różnych skal (rys. 6.8). Podana jest skala zanurzeń w dm w postaci cyfr arabskich oraz skala zanurzeń w stopach (cyfry rzymskie) z mniejszą podziałką w calach, gdyż takie same skale zaznaczone są na pionach rufowym i dziobowym na obu burtach statków morskich. Ponadto w tych samych jednostkach podana jest skala wolnej burty określona z zależności

$$F_b = H - T. \qquad (6.29)$$

Minimalna wolna burta jest więc odległością pionową pomiędzy górną krawędzią pokładu a dopuszczalnym, maksymalnym zanurzeniem okrętu. Istnieją bardzo szczegółowe przepisy instytucji klasyfikacyjnych, dotyczące wyznaczenia takiej wolnej burty. Z punktu widzenia armatora korzystna jest jak najmniejsza wolna burta, a tym samym jak największa ilość przewożonego ładunku i jak największe zyski z tytułu frachtu. Przepisy o wolnej burcie ograniczają jednak zanurzenie statku. Wolna burta decyduje o bezpieczeństwie statku, gdyż od niej zależy zapas pływalności, wytrzymałość

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°

kadłuba oraz zakres stateczności okrętu. Dopuszczalne zanurzenie dla danej wielkości statku zależy od typu statku i przewożonego ładunku, od współczynnika pełnotliwości kadłuba i stosunku L/H, od wielkości nadbudówek, od wzniosu i wypukłości pokładu. Zależy także od wytrzymałości wiązań konstrukcyjnych. Dopuszczalne więc zanurzenie określa znak wolnej burty, który w postaci tzw. dysku Plimsolla (od nazwiska członka parlamentu angielskiego, który w 1875 r. przyczynił się do wprowadzenia takiego znaku) zaznaczony jest na owrężu na obu burtach statku. Okręg ten zgodnie z przepisami posiada 300 mm średnicy zewnętrznej przy grubości linii 25 mm, przedzielony jest linią poziomą, o długości 450 mm, której górna krawędź przechodząca przez środek okręgu wyznacza dopuszczalne zanurzenie dla wody morskiej w lecie. Po obu stronach okręgu umieszcza się inicjały towarzystwa klasyfikacyjnego, pod nadzorem i wg przepisów którego statek był budowany. I tak przykładowo inicjały PR oznaczają Polski Rejestr Statków, AB - American Bureau of Shipping, BV - francuski Bureau Veritas, GL - RFN Germanischer Lloyd, LR - angielski Lloyd's Register of Shipping, PC - radziecki Morski Rejestr, NV - norweski Det Norske Veritas. Linia ładunkowa dla wody morskiej w lecie daje wolną burtę podstawową, obliczoną wg przepisów. Niezależnie od tego znaku obok dysku na obu burtach statku zaznaczony jest szereg linii poziomych (rys. 6.9) połączonych linią pionową. Górna krawędź linii poziomych wyznacza dopuszczalne zanurzenie dla różnych akwenów i pór roku. Widać z tej skali, że statek operujący na wodach słodkich może przewozić więcej ładunku niż statek pływający po wodach o większej gęstości. Lewa strona tej drabinki dotyczy wody słodkiej. Symbole przy znakach są następujące: TS (TF) - tropik woda słodka; S (F) - woda słodka. Prawa strona dotyczy wody morskiej: T (T) - tropik; L (S) - lato; Z (W) - zima; ZAP (WNA) - zima Atlantyk Północny. W nawiasach podano odpowiedniki angielskie. Znak zimowej wolnej burty powiększa ją o $\frac{1}{48}$ zanurzenia letniego, natomiast znak dla zimy (Północny Atlantyk) znajduje się dla statków o długości L≤100 m o 50 mm poniżej linii „zima". Dla statków o długości L > 100 m linia Z pokrywa się z linią ZAP. Oczywiście linia ZAP dotyczy tylko statków, które zachodzą na jakąś część tego akwenu. Tropikalną minimalną wolną burtę otrzymuje się przez zmniejszenie letniej wolnej burty o $\frac{1}{48}$ zanurzenia letniego. Widać z tego, że poszczególne linie dla wody morskiej mają znacznie większe odstępy niż to wynika z różnicy gęstości wody. Przepisy wykorzystują tu doświadczenie żeglugowe,



Rys. 6.9

8. 11. 1984
B-5
33%
S/141/85 PG MS

uwzględniają też w ten sposób burzliwość akwenu. Znak wolnej burty dla wody słodkiej wynika z różnicy gęstości wody słodkiej i morskiej.

Dysk Plimsolla wraz z „drabinką" dopuszczalnych zanurzeń zaznaczony jest także na arkuszu skali załadowania. Do przestrzegania, aby statek przy wyjściu na morze nie był nadmiernie załadowany i nie przekroczył dopuszczalnego zanurzenia, zobowiązana jest administracja portu, w Polsce - Urzędy Morskie. Na skali załadowania podana jest także, dla różnych gęstości wody, nośność statku, na którą składa się przewożony ładunek i zapasy konieczne do utrzymania statku w ruchu. Skalę nośności określa się wg zależności

$$P_N = \varrho g V - P_o, \qquad (6.30)$$

gdzie: P_o jest ciężarem statku pustego.

Bardzo często na skali załadowania podane są też przyrosty wyporności na jednostkę zanurzenia (ilość masy, która powoduje zmianę zanurzenia statku o 1 cm lub o 1 cal) oraz jednostkowy moment przegłębiający.

6.5. Plan ładunkowy

Prócz skali załadowania dużą rolę na morskich statkach towarowych odgrywa plan ładunkowy. Czasami plan ładunkowy występuje na jednym arkuszu wraz ze skalą załadowania. Plan ładunkowy jest uproszczonym rysunkiem statku, na którym pokazane jest rozmieszczenie wszystkich pomieszczeń przeznaczonych na ładunek i zapasy. Prócz widoku bocznego pokazany jest rzut poziomy, a przede wszystkim widok na dno, gdyż w dnie podwójnym znajduje się większość zbiorników na paliwo, wodę balastową czy słodką. Konieczne są informacje, jak wielkie są te pomieszczenia lub jaka ilość płynu zmieści się do zbiornika i jakie jest ich usytuowanie w kierunku wzdłużnym, pionowym i poprzecznym. Z linii teoretycznych można obliczyć objętość każdego przedziału kadłuba, lecz będzie to objętość zawyżona. We wszystkich pomieszczeniach należy uwzględnić elementy konstrukcji okrętu, które zmniejszają obliczoną objętość. Średnio dla zbiorników dna podwójnego, przeznaczonych na ładunek płynny, potrąca się 3% objętości teoretycznej. Zbiorniki takie przeznaczone na olej napędowy winny jeszcze przyjmować o 2-3% ładunku mniej niż to wynika z obliczonej objętości zbiornika, a to ze względu na możliwość rozszerzenia się oleju pod wpływem wzrostu temperatur. Dla zbiorników wysokich ze względu na rozszerzalność oleju wielkość ta wynosi 1-1,5%. Natomiast pojemność ładowni uniwersalnego statku towarowego określa się w dwojaki sposób. Rozróżnia się pojemność dla ziarna i bali. Pojemność dla ziarna jest to pojemność przedziału liczona na wewnętrznej krawędzi poszycia z uwzględnieniem elementów konstrukcyjnych jak wręgi, usztywnienia grodzi, wzdłużniki itp. Potrącenia sięgają tu 3-5% objętości teoretycznej. Jest to pojemność, którą jest w stanie zapełnić bardzo drobne, sypkie medium. Pojemność wyrażona w balach jest o 6-10% mniejsza od pojemności ziarna. Jest to pojemność ładowni, obliczona do wewnętrznej krawędzi szalunków czy innych elementów

8. 11. 1984
B-5
33%

konstrukcyjnych. Jest to pojemność, którą może wykorzystać ładunek w opakowaniu mający znaczne gabaraty, i którego nie można umieszczać między wręgami czy usztywnieniami grodzi. Jeszcze mniejszą pojemność użytkową mają ładownie chłodzone. Potrącenia sięgają tu 25-35% kształtu teoretycznego. Pojemności użytkowe wszystkich pomieszczeń przeznaczonych na ładunek czy zapasy muszą być znane. Wszystkie one podane są wraz ze współrzędnymi środka objętości na planie ładunkowym statku. Przy zbiornikach na płyny stosuje się czasami skalowanie ciągłe w postaci wykresu w funkcji wysokości zbiornika, aby na podstawie pomiaru poziomu cieczy można było ocenić zawartość zbiornika i położenie środka ciężkości płynu.

Wielkość poszczególnych przedziałów danego statku jest stała, a przewożony ładunek może być różnorodny. Każdy jednak ładunek ma znane właściwości, które opisuje współczynnik załadowania lub tzw. współczynnik sztauerski. Jest to wymagana ilość metrów sześciennych przypadających na 1 tonę masy ładunku. Tak więc znając pojemność przedziału bez trudu można określić, ile ton masy odpowiedniego ładunku można do tego przedziału załadować. Oficer pokładowy odpowiedzialny za ładunek zawsze przed rozpoczęciem załadunku wykonuje projekt rozmieszczenia wszystkich ciężarów. Rozmieszczając na planie wszystkie zgłoszone ładunki można określić stopień zapełnienia poszczególnych ładowni, stopień wykorzystania pojemności i nośności statku. Znając położenie środków ciężkości poszczególnych grup ładunkowych obliczyć można położenie środka ciężkości całego statku, a stąd określić zanurzenie dziobu i rufy, stateczność statku, oraz ocenić obciążenie konstrukcji okrętu. W przypadku, gdy ładunek ze względu na wyżej wymienione czynniki został zaplanowany niewłaściwie, należy w porę dokonać niezbędnych poprawek w rozmieszczeniu ładunku. Przy załadunku należy też zawsze uwzględnić kolejność rozładunku w następujących po sobie portach lub specyfikę niektórych ładunków, które trzeba izolować od innych.

Przykładowo tabela 6.1 przedstawia dla kilku rodzajów ładunku wartości ich współczynników załadowania.

T a b e l a 6.1

Współczynniki załadowania

Wyszczególnienie	Opakowanie	Współczynnik załadowania [m^3/t]
Bawełna prasowana	bale	1,50 - 2,60
Blacha aluminiowa	skrzynie	1,20
Blacha stalowa	skrzynie	0,25
Cement	worki	0,98
Drewno budowlane	luzem	3,40
Kształtowniki stalowe	luzem	0,20 - 0,60
Pszenica	luzem	1,30
Rudy żelaza	luzem	0,40 - 0,74
Samochody - rozmontowane	skrzynie	0,65 - 1,00
Samochody zmontowane	-	6,00 - 8,35
Węgiel kamienny	luzem	1,30

8. 11. 1984
B-5
33%

Obecnie coraz więcej ładunków drobnicy przewożonych jest w kontenerach. W powszechnym użyciu są trzy rodzaje kontenerów: 20 stopowe, 40' i 40'R - kontenery chłodzone. Ich wymiary w stopach są następujące: 20' x 8' x 8' i 40' x 8' x 8'. W tabeli 6.2 podane są w oparciu o badania statystyczne przeciętne wartości ich mas. Ostatnia pozycja, masa przeciętna, jest masą brutto, jaka występuje najczęściej ze względu na niewykorzystanie pełnej pojemności kontenera.

T a b e l a 6.2

Masa kontenera

Typ kontenera	Masa kontenera [t]		
	pusty	pełny	przeciętnie
20'	2,3	20,3	13,6
40'	4,0	30,5	16,2
40' R	6,0	30,5	23,2

7. STATECZNOŚĆ PODŁUŻNA OKRĘTU

„Niektóre okręty żeglowały szybko na równej stępce, inne musiały mieć przegłębienie jedną stopę na rufę, a raz słyszałem o statku, który rozwijał z wiatrem największą szybkość, kiedy miał przegłębienie parę cali na dziób".

7.1. Uwagi ogólne o stateczności okrętu

Stateczność definiuje się jako zdolność okrętu wychylonego z położenia równowagi do powrotu do położenia pierwotnego, jeśli zniknie przyczyna, która spowodowała to wychylenie. W punkcie 6.1 rozpatrywaliśmy, jakie są możliwe wychylenia okrętu z położenia równowagi. Stwierdzono, że wychylenia okrętu w płaszczyźnie poziomej, a mianowicie liniowe wzdłuż osi x i y oraz kątowe wokół osi z, nie powodują zmiany kształtu kadłuba, stąd nie pojawiają się siły i moment przywracający, a zatem okręt jest w równowadze obojętnej. Wykazano również, że statek jest zawsze w równowadze stałej względem wszelkich zakłóceń liniowych wzdłuż osi z, co nazywamy statecznością wysokościową. Statek ma lub powinien mieć także, aby mógł pływać bezpiecznie, równowagę stałą w stosunku do dwu pozostałych zakłóceń kątowych wokół osi x i y. W tym rozdziale będziemy rozpatrywać wychylenia okrętu względem osi poprzecznej y, co wiąże się z tzw. statecznością podłużną. Przy pochyleniu okrętu wokół osi y lub tzw. przegłębieniu pojawia się moment przywracający, zwany też prostującym, który sprowadza statek do początkowego stanu, gdy zniknie moment przegłębiający, który takie przegłębienie wywołał. Wystąpienie momentu prostującego przeciwnie skierowanego do pochylenia okrętu, co wyraża związek

$$\frac{\partial M_\Theta}{\partial \Theta} < 0, \qquad (7.1)$$

jest warunkiem równowagi trwałej. Z reguły związek ten dla każdego typowego statku w stanie nieuszkodzonym jest zawsze spełniony. Nie słyszy się o utracie podłużnej stateczności okrętu nawodnego. Natomiast bardzo po-

8. 11. 1984 ~~S/114/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°/₀

datny jest okręt na wychylenia kątowe wokół osi x, czyli na tzw. przechyły. Mówimy wówczas o stateczności poprzecznej. Ten rodzaj wychyleń uzależniony jest od występującej wielkości momentu prostującego. Przez nieodpowiednie załadowanie statku moment ten może być niewystarczający i zaistnieje stan równowagi nietrwałej, co powoduje przewrócenie się okrętu. Stateczność poprzeczna, charakteryzująca się większymi wychyleniami, omówiona będzie w następnym rozdziale.

Wszelkie wychylenia okrętu, zgodnie z nazwą przedmiotu, są tutaj rozpatrywane w sposób statyczny, a więc bez prędkości liniowych i kątowych i takich przyspieszeń. Zjawiska takie mają miejsce przy spokojnej wodzie. Siły i momenty zewnętrzne działają tu też w sposób statyczny, bardzo wolno. Ma to miejsce przy przyjmowaniu lub zdejmowaniu ładunku ze statku, przepompowywaniu zawartości zbiorników wewnątrz kadłuba czy przy przejściu pasażerów z burty na burtę. Wszelkie rozpatrywane zagadnienia dotyczące stateczności podłużnej ograniczają się do małych kątów pochyleń, mieszczących się w granicach do $\Theta = 5^{o}$. Jako przykład weźmy statek o długości $L = 100$ m. Przy kącie pochylenia $\Theta = 1^{o}$ różnica między zanurzeniem rufy i dziobu, czyli tzw. przegłębienie, wynosi $t = 1{,}75$ m, a przy $\Theta = 5^{o}$ przegłębienie $t = 8{,}75$ m, co dla takiego statku jest przegłębieniem niespotykanym. Wszystkie problemy stateczności podłużnej są tu więc rozwiązywane w ramach tzw. stateczności początkowej, wyodrębnionej w wielu podręcznikach teorii okrętu, kiedy uznaje się, że punkt metacentryczny nie zmienia swego położenia. Celem obliczenia stateczności podłużnej jest wyznaczenie zanurzenia dziobu i rufy okrętu przy dowolnym stanie załadowania lub też pod wpływem przesunięcia ładunku w jego wnętrzu. Kąt przegłębienia odgrywa tu tylko pośrednią rolę.

7.2. Moment prostujący

Załóżmy, że okręt jest zanurzony do wodnicy W_o. Siła wyporu przechodzi przez punkt F_o, a siła ciężkości leży na tej samej linii pionowej i zaczepiona jest w punkcie G. Gdy okręt ten pod wpływem momentu przegłębiającego M_{py} zostanie pochylony np. na dziób (rys. 7.1) i zanurzony jest teraz do wodnicy W_Θ, to kształt podwodnej części kadłuba zmieni się. Powoduje to, że środek wyporu przesunie się do punktu F_Θ. Podczas tego pochylenia wyporność okrętu nie ulega zmianie, zatem klin części kadłuba, który teraz zanurzył się w wodzie ze środkiem objętości w punkcie A_2, musi być równy objętości klina wynurzonego, ze środkiem w punkcie A_1. Gdy kąt Θ jest niewielki, objętość części wynurzonej jest równa

$$dV_1 = \frac{1}{2}\,\Theta \int_B \xi_1^2\, d\eta\,, \qquad (7.2)$$

gdyż powierzchnia boczna tego klina jest równa $\frac{1}{2}\xi \cdot \xi \cdot \Theta$, a elementarna objętość o grubości plastra $d\eta$ jest równa $\delta V_1 = \frac{1}{2}\,\Theta\,\xi^2\, d\eta$. Całkę tę (7.2) w granicach szerokości okrętu da się rozwiązać w sposób numeryczny za pomocą przekrojów wzdłużnicowych. Objętość klina dziobowego jest określona podobnym wyrażeniem

$$dV_2 = \frac{1}{2}\,\theta \int_B \xi_2^2\, d\eta \,. \qquad (7.3)$$

Ponieważ objętości te muszą być sobie równe, więc zachodzi związek

$$\frac{1}{2}\int_B \xi_1^2\, d\eta = \frac{1}{2}\int_B \xi_2^2\, d\eta \,, \qquad (7.4)$$

gdyż kąt θ jest różny od zera. Każda z tych całek przedstawia moment statyczny pola wodnicy względem osi poprzecznej, która jest osią obrotu. Momenty statyczne pola wodnicy dla części rufowej i dziobowej są sobie równe, gdyż oś ta przechodzi przez środek ciężkości pola tych wodnic. Wynika stąd wniosek, że wodnica W_θ odcina wtedy tę samą objętość co przed pochyleniem, gdy obie wodnice przecinają się wzdłuż osi przechodzącej przez środek ciężkości obu tych wodnic.

Pod wpływem pochylenia okrętu środek objętości klina wynurzonego A_1 przemieści się do punktu A_2, a środek wyporu z punktu F_o do punktu F_θ. Oba te przemieszczenia są do siebie równoległe $A_1A_2 \parallel F_oF_\theta$, a stosunek tych przemieszczeń, zgodnie z twierdzeniem o przesuwaniu mas, jest odwrotnie proporcjonalny do przemieszczonych objętości

$$\frac{F_oF_\theta}{A_1A_2} = \frac{dV}{V} \,, \qquad (7.5)$$

gdzie V - jest objętością kadłuba.

Iloczyn $A_1A_2 \cdot dV = (A_1C + CA_2)dV$ jest momentem statycznym objętości dV względem osi obrotu. Moment ten jest równy

$$(A_1C + CA_2)dV = \frac{1}{2}\int_B \xi_1^2 \cdot \theta \cdot \frac{2}{3}\xi_1 d\eta + \frac{1}{2}\int_B \xi_2^2 \cdot \theta \cdot \frac{2}{3}\cdot \xi_2 \cdot d\eta =$$

$$= \frac{1}{3}\,\theta \int_{-B/2}^{B/2} (\xi_1^3 + \xi_2^3)d\eta \,; \qquad (7.6)$$

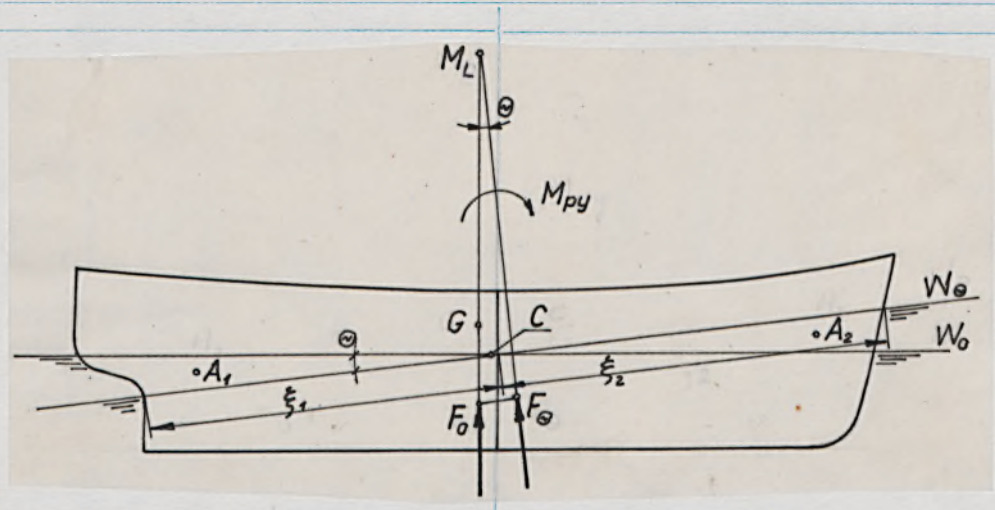
ξ_1 - jest odciętą obrysu wodnicy dla strony wynurzonej, a ξ_2 dla strony zanurzonej, obie odcięte mierzone są od osi przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy x_c. Gdy statek pływa bez przechyłu, wodnica jest symetryczna względem płaszczyzny symetrii okrętu i wówczas można zapisać, że

$$(A_1C + CA_2)dV = \frac{2}{3}\,\theta \int_0^{B/2} (\xi_1^3 + \xi_2^3)d\eta \,.$$

Całka ta ze współczynnikiem 2/3 jest momentem bezwładności pola wodnicy względem osi przechodzącej przez środek ciężkości. Moment ten można też obliczyć całkując wzdłuż długości okrętu. Można więc zapisać, że

$$J_y = \frac{2}{3}\int_0^{B/2} (\xi_1^3 + \xi_2^3)d\eta = 2\int_L (x-x_c)^2 y\,dx. \qquad (7.7)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°/₀



Rys. 7.1

Wykorzystując równanie (7.5) mamy:

$$F_o F_\Theta \cdot V = J_y \Theta \ .$$

Z drugiej strony długość łuku, po którym przemieścił się środek wyporu, jest równa iloczynowi promienia i kąta

$$F_o F_\Theta = R_o \cdot \Theta \ , \qquad (7.8)$$

a więc promień krzywizny, po której przemieszcza się środek wyporu, jest równy

$$R_o = \frac{J_y}{V} \ . \qquad (7.9)$$

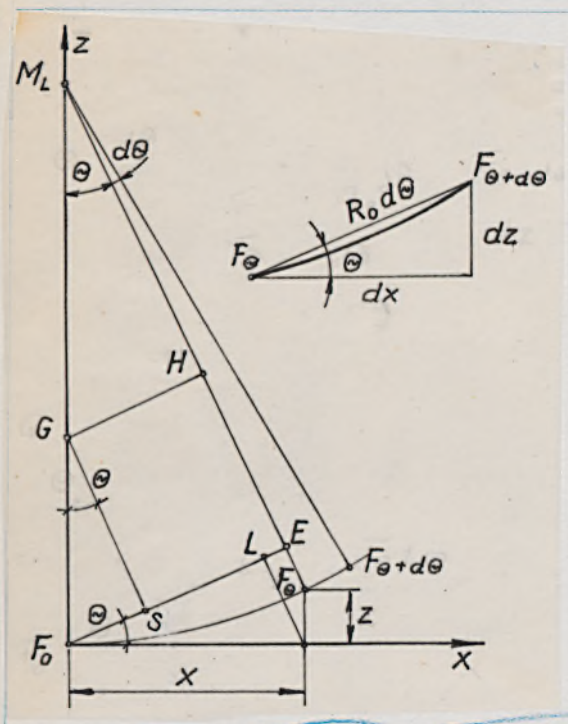
Wielkość R_o nazywa się promieniem metacentrycznym. Zależy on tylko od momentu bezwładności pola wodnicy i objętości podwodnej części kadłuba. Ponieważ przy rozpatrywaniu stateczności poprzecznej także wystąpi promień metacentryczny, wielkość R_o dla rozróżnienia nazywać będziemy dużym promieniem lub podłużnym promieniem metacentrycznym. Ponieważ R_o jest promieniem łuku krzywej środków wyporu, jest to więc odległość od środka wyporu F do punktu M_L, w którym przecinają się nieskończenie blisko siebie leżące kierunki sił wyporu. Ten punkt M_L nazywany jest metacentrum. Metacentrum jest więc środkiem krzywej środków wyporu F. Gdy kąty pochyleń są niewielkie, a tak jest w istocie, można przyjąć, że punkt nie zmienia swego położenia i duży promień metacentryczny jest wielkością stałą (dla danego zanurzenia okrętu), a krzywa F jest łukiem koła.

W tym przypadku szybko można obliczyć współrzędne środka wyporu po obrocie okrętu o kąt Θ. Jeśli pochylenie Θ powiększy się jeszcze o nieskończenie mały kąt dΘ, to długość łuku $F_\Theta F_{\Theta+d\Theta}$ (rys. 7.2) jest równa

$$F_\Theta F_{\Theta+d\Theta} = R_o \cdot d\Theta \ ,$$

więc przyrosty współrzędnych są równe

$$dx = R_o \cos\Theta \, d\Theta \ ; \qquad dz = R_o \sin\Theta \, d\Theta \ . \qquad (7.10)$$



Rys. 7.2

Ponieważ R_o jest stałe, więc

$$x = R_o \sin \Theta;$$

$$z = - R_o \cos \Theta \Big|_0^{\Theta} = R_o(1-\cos \Theta). \qquad (7.11)$$

Kąty Θ są małe można więc przyjąć, że

$$\cos \Theta \approx 1 \quad \text{i} \quad \sin \Theta \approx \Theta ,$$

stąd

$$dx = R_o d\Theta \quad \text{i} \quad dz = R_o \, \Theta \, d\Theta,$$

więc

$$x = R_o \Theta \quad \text{i} \quad z = R_o \frac{\Theta^2}{2} . \qquad (7.12)$$

Współrzędne te mierzone są w układzie, dla którego początkiem jest punkt F_o - środek wyporu okrętu w początkowym stanie pływania.

Często początek układu przyjmuje się w punkcie nie związanym z zanurzeniem okrętu, a z punktem stałym, związanym z kadłubem, a mianowicie z górną krawędzią stępki, z punktem K. Wówczas współrzędne te będą równe

$$x_{(K)} = x_{(F)} \quad \text{i} \quad z_{(K)} = z_{(F)} + z_{F_o} \sin \Theta. \qquad (7.13)$$

Gdy okręt został wychylony pod wpływem momentu przegłębiającego M_{py} z położenia równowagi, pojawia się moment, który stara się sprowadzić okręt do pierwotnego położenia. Ten moment prostujący jest równy

$$M_{We} = - D\overline{GH} = - D\overline{GM}_L \sin \Theta = - D \, H_o \sin \Theta .$$

Odcinek $\overline{GH} = l$ nazywamy ramieniem prostującym, a $\overline{GM}_L = H_o$ dużą wysokością metacentryczną. Ta wysokość metacentryczna jest równa

$$\overline{GM}_L = \overline{KF}_o + \overline{F_oM}_L - \overline{KG} = \overline{KM}_L - \overline{KG} \qquad (7.14)$$

lub przy oznaczeniach jednoliterowych

$$H_o = z_F + R_o - z_G = z_{M_L} - z_G. \qquad (7.15)$$

Wysokość metacentryczna ma więc dwa składniki: jeden zależy od kształtu kadłuba, a drugi od położenia środka ciężkości okrętu.

Zgodnie z rys. 7.2 ramię prostujące można przedstawić

$$\overline{GH} = \overline{F_oE} - \overline{F_oS} = l_k - l_c \qquad (7.16)$$

Ramię $$\overline{F_oE} = \overline{F_oL} + \overline{LE} = l_k$$

gdzie: $$l_k = x \cos \Theta + z \sin \Theta = R_o \sin \Theta, \qquad (7.17)$$

8. 11. 1984
B-5
33%

nazywamy ramieniem kształtu, gdyż zależy tylko od położenia środka wyporu, co związane jest z kształtem kadłuba. Ramię $\overline{F_oS} = l_c = a \cdot \sin\theta$, zależy tylko od położenia środka ciężkości okrętu, zależy więc od rozłożenia masy wewnątrz okrętu i nazywamy je ramieniem ciężaru. Zatem ramię prostujące jest równe

$$l = l_k - l_c = (R_o - a)\sin\theta = H_o \sin\theta , \qquad (7.18)$$

a moment prostujący $M_{W\theta} = - DH_o \sin\theta.$ (7.19)

Iloczyn DH_o nazywamy współczynnikiem stateczności okrętu. Równowaga trwała wystąpi, gdy spełniony jest warunek

$$\frac{\partial M_{We}}{\partial \theta} < 0.$$

Ponieważ wypór okrętu D jest stały i dodatni, więc

$$- D \frac{dl}{d\theta} = - DH_o \cos\theta < 0 . \qquad (7.20)$$

Warunek ten jest zawsze spełniony, gdyż H_o jest rzędu długości okrętu, zawsze jest więc dodatnie, wobec czego w zakresie przegłębień okręt ma zawsze równowagę trwałą. Ponieważ $\cos\theta \approx 1$, równowaga trwała występuje, gdy

$$H_o > 0, \qquad (7.21)$$

czyli gdy podłużna wysokość metacentryczna jest dodatnia. Aby statek pływał w równowadze musi być jeszcze spełniony warunek równości sił i momentów.

7.3. Wyznaczenie wodnicy równoobjętościowej

Jak już powiedziano powyżej, klin objętości kadłuba, jaki zanurzył się w wodzie przy pochyleniu okrętu, będzie równy objętości wynurzonej tylko wówczas, gdy obie wodnice przecinają się wzdłuż osi, która przechodzi przez środki ciężkości obu tych wodnic. Środek ciężkości pola początkowej wodnicy x_c znamy, gdyż wartość ta, gdy okręt nie jest przegłębiony, podana jest na wykresie krzywych hydrostatycznych. Po pochyleniu okrętu o kąt θ, który ma jednak wartość skończoną, a nie nieskończenie małą, nowa wodnica pływania może różnić się swym kształtem od poprzedniej, więc i odcięta środka ciężkości może różnić się od wartości x_c. Celowym więc staje się wyznaczenie krzywej, po której przemieszczają się środki ciężkości wodnic, co jest równoznaczne z określeniem promienia ρ_L tej krzywej. Wodnice równoobjętościowe są styczne do takiej krzywej. Można przyjąć, że promień ρ_L jest stały w małym zakresie kątów. Określmy tę wielkość [11].

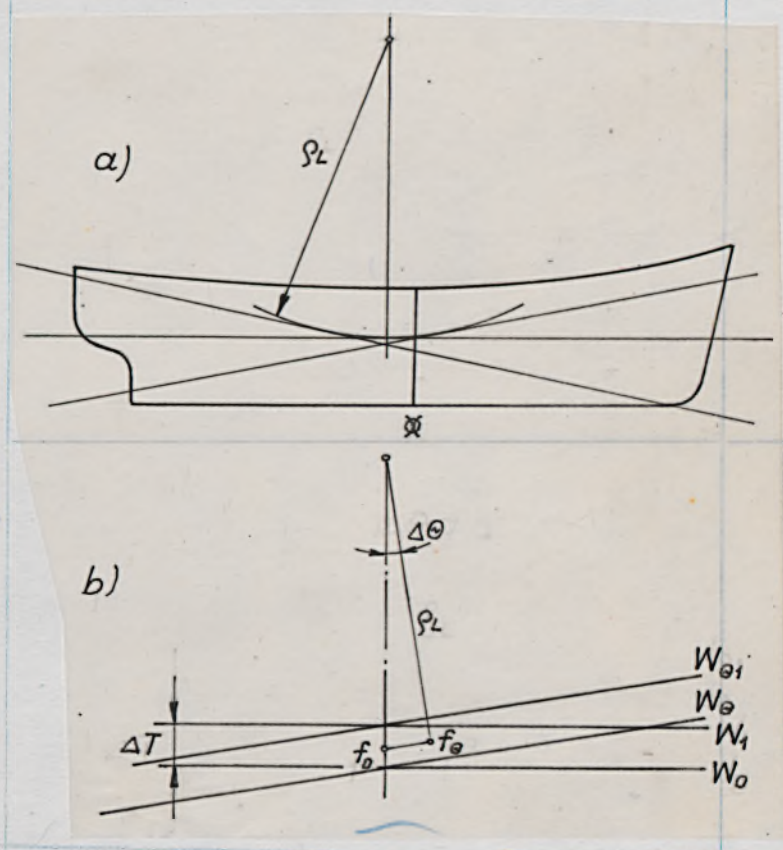
Przyjmijmy, że okręt posiada zanurzenie T, któremu odpowiada wyporność V_o, promień metacentryczny $R_o = \frac{J_y}{V_o}$, a środek wyporu znajduje się

8. 11. 1984
B-5
33%

w punkcie F_o. Gdy zwiększymy zanurzenie okrętu o $\triangle T$, wyporność będzie teraz $V_1 = V_o + \triangle V$, promień metacentryczny $R_{o_1} = \frac{J_y + \triangle J_Y}{V_o + \triangle V}$, a środek wyporu przemieści się do punktu F_1. Gdy pochylimy okręt o kąt $\triangle\theta$, to współrzędna środka wyporu zgodnie ze wzorem (7.12) przesunie się wzdłuż długości okrętu o:

- przy zanurzeniu T: $\triangle x_o = R_o \triangle\theta$,
- przy zanurzeniu T_1: $\triangle x_1 = R_{o_1} \triangle\theta$.

Środek objętości dodatkowej warstwy, o grubość której zwiększył okręt swoje zanurzenie, przesunie się z punktu f_o do punktu f_θ. Przesunięcie to jest równe (rys. 7.3)



Rys. 7.3

$$\overline{f_o f_\theta} = \xi_c = \rho_L \triangle\theta,$$

gdzie promień

$$\rho_L = \lim_{\Delta\theta/o} \frac{\xi_c}{\triangle\theta} \qquad (7.22)$$

jest promieniem, po łuku którego wędruje środek objętości warstewki o grubości $\triangle T$. Napiszmy równanie momentów względem osi pionowej

$$(V_o + \triangle V)\triangle x_1 = V_o \triangle x_o + \triangle V \xi_c,$$

Podstawiając wyrażenia na $\triangle x_o$, $\triangle x_1$ i ξ_c, uzyskujemy wyrażenie na promień ρ_L

$$\rho_L = \frac{\triangle J_y}{\triangle V}. \qquad (7.23)$$

Gdy przyrost zanurzenia $\triangle T \to 0$, to wodnica W_1 dąży do wodnicy W_o, a krzywa f dąży do krzywej środków ciężkości wodnic C. Wówczas

$$\rho_L = \frac{\triangle J_y}{\triangle V} = \frac{dJ_y}{dV} = \frac{1}{S_{wL}} \frac{dJ_y}{dz}, \qquad (7.24)$$

tzn. promień krzywizny krzywej środków ciężkości wodnic jest równy pochodnej momentu bezwładności pola wodnicy względem wyporności, lub pochodnej momentu bezwładności dla wodnicy względem zanurzenia podzielonej przez powierzchnię wodnicy. Z braku danych do obliczenia ρ_L można zastosować wzór przybliżony

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

$$\varrho_L \approx 3 R_o(1-\varkappa) \frac{2}{2 + \frac{\Delta V}{V}(3\varkappa - 2)} \qquad (7.25)$$

lub

$$\varrho_L \approx 3 R_o(1-\varkappa) \qquad (7.26)$$

gdzie:

$$\varkappa = \frac{\delta}{\alpha} \quad \text{lub} \quad \varrho_L \approx 0{,}025 \frac{L^2}{T\delta} \qquad (7.26a)$$

Jak jednak praktycznie wyznaczyć nową wodnicę pływania, gdy statek pochyli się o kąt Θ? W pierwszym przybliżeniu wykreślamy wodnicę W_1 pod kątem Θ w stosunku do wodnicy W_o, która przechodzi przez punkt C_o o odciętej x_c, licząc od owręża. Z wody wynurzy się klin o objętości dV_1, a zanurzy się klin o objętości dV_2. Aby wodnica W_1 odcinała tę samą objętość V co wodnica W_o, musi być spełniony warunek [11]

$$dV = dV_2 - dV_1 = 0.$$

Różnica objętości tych klinów jest równa

$$dV = \frac{1}{2}\Theta \int_B \xi_2^2 \, d\eta - \frac{1}{2}\Theta \int_B \xi_1^2 \, d\eta = (m_{2\Theta} - m_{1\Theta})\,\Theta,$$

czyli

$$dV = m_{\eta\,\Theta}\,\Theta. \qquad (7.27)$$

Gdy różnica momentów statycznych pola wodnicy $m_{\eta\,\Theta}$ jest równa zero, znaczy to, że środek ciężkości pochylonej wodnicy W_1 pokrywa się ze środkiem ciężkości pola wodnicy W_o i wodnica W_1 odcina tę samą objętość co i wodnica W_o. Gdy natomiast $m_{\eta\Theta} \neq 0$, to wówczas o wartość dV należy dokonać poprawki, przesuwając wodnicę w stosunku do W_1 w górę lub w dół. Jeśli moment statyczny jest dodatni, $m_{\eta\,\Theta} > 0$, to środek ciężkości wodnicy przesuwa się w kierunku strony zanurzonej, wówczas objętość dV jest też dodatnia, więc wodnica W_1 odcina objętość $V_1 = V + dV$ za dużą, wobec czego wodnicę równoobjętościową należy przesunąć w dół w stosunku do W_1. Przy ujemnym momencie $m_{\eta\,\Theta}$ kierunek jest odwrotny.

Przyjmijmy, że $m_{\eta\,\Theta} > 0$, więc

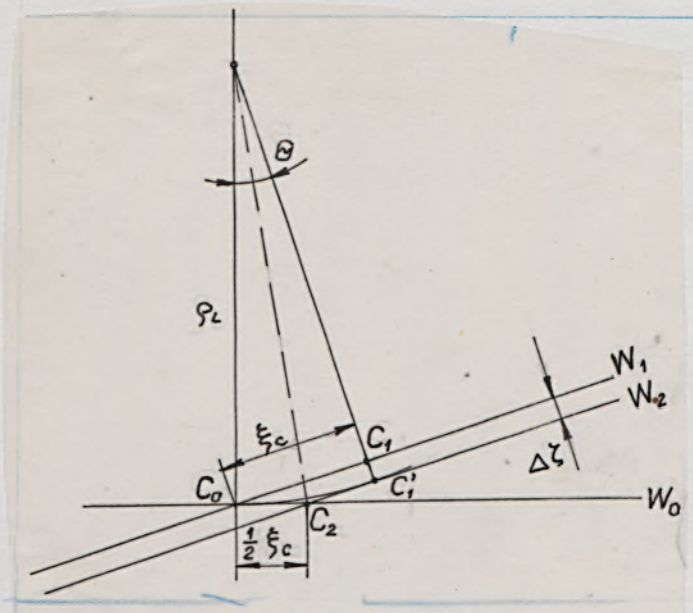
$$dV = m_{\eta\Theta}\, d\,\Theta = S_{wL\Theta}\, d\,\zeta$$

i stąd odległość, na jaką należy przesunąć wodnicę w dół, jest równa

$$\Delta\zeta = \int_0^{\Theta_1} \frac{m_{\eta\Theta}}{S_{wL\Theta}} \, d\Theta \,.$$

Jeśli całkę tę wyznaczymy za pomocą wzoru trapezów, wiedząc, że dla $\Theta = 0$ $m_\eta = 0$, to otrzymamy

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%



Rys. 7.4

$$\Delta\zeta = \frac{m\,\eta\,\theta}{S_{wL\theta}} \cdot \frac{\theta}{2} = \frac{1}{2}\cdot\xi_c \cdot \theta, \quad (7.28)$$

gdzie ξ_c jest odciętą środka ciężkości wodnicy w stosunku do punktu C_o czyli $\xi_c = \overline{C_o C_1}$. Zgodnie więc ze wzorem (7.28) odmierzamy od punktu C_o na wodnicy W_o wartość $\frac{1}{2}\xi_c$ i przez ten punkt (rys. 7.4), równolegle do wodnicy W_1 prowadzimy wodnicę równoobjętościową W_2. Ponieważ

$$\xi_c = \overline{C_o C_1} \approx \overline{C_o C'_1} = \rho_L\,\theta\,,$$

więc nowa równoobjętościowa wodnica W_2 przecina wodnicę w punkcie C_2 o odciętej

$$x_c' = x_c + \frac{1}{2}\,\rho_L\,\theta\,. \quad (7.29)$$

Gdy statek ma przegłębienie, to jego wyporność można odczytać z krzywej wyporności dla statku nieprzegłębionego. Odczytu tego nie można dokonać dla zanurzenia średniego. Obecnie budowane statki o rufach pawężowych odznaczają się, w rejonie zanurzeń konstrukcyjnych, bardzo znacznym przesunięciem odciętej środka ciężkości wodnicy x_c w kierunku rufy, dlatego nieuwzględnienie tej odciętej może prowadzić do znacznych błędów. Zanurzenie, dla którego należy odczytać wartość V z krzywych hydrostatycznych, gdy statek ma przegłębienie, jest równe

$$T = \frac{1}{2}(T_R + T_D) + (x_c + \frac{1}{2}\,\rho_L\,\theta)\theta\,, \quad (7.30)$$

gdzie x_c jest odciętą środka ciężkości wodnicy okrętu nieprzegłębionego a $\theta = \frac{T_R - T_D}{L}$.

7.4. Obliczenie przegłębienia okrętu

Aby okręt pływał w równowadze w stanie przegłębionym, moment, który spowodował to przegłębienie, musi być równoważony momentem prostującym, musi być więc spełniony warunek

$$M_{py} + M_{w\theta} = 0. \quad (7.31)$$

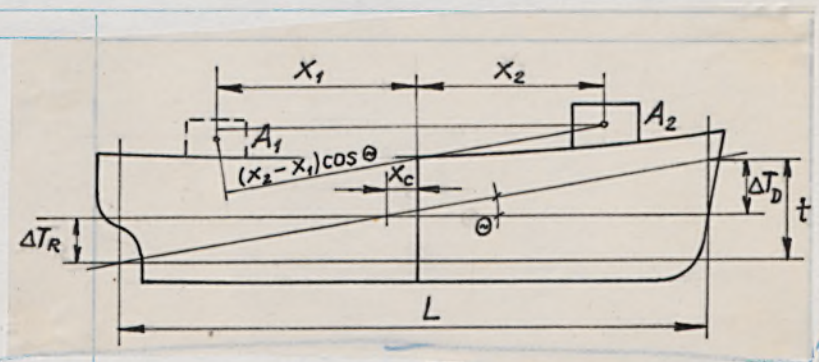
Jeśli to przegłębienie zostało wywołane np. przesunięciem masy m z punktu x_1 do punktu x_2 równolegle do płaszczyzny podstawowej, to moment M_{py} będzie równy

3. 11. 1984
B-5
33%

$$M_{py} = mg(x_2 - x_1)\cos\theta. \qquad (7.32)$$

Wiemy, że moment prostujący określony jest zależnością

$$M_{w\vartheta} = - DH_o \sin\theta .$$



Rys. 7.5

Z równości momentów kąt przegłębienia będzie

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{mg(x_2 - x_1)}{DH_o} \qquad (7.33)$$

lub

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{m(x_2 - x_1)}{MH_o}, \qquad (7.34)$$

gdzie M jest masą okrętu. W zagadnieniach stateczności podłużnej mniej nas interesuje kąt pochylenia okrętu, ile zanurzenie dziobu i rufy okrętu. Przegłębienie okrętu jest różnicą między zanurzeniem rufowym i dziobowym

$$t = T_R - T_D, \qquad (7.35)$$

więc kąt θ jest też równy (rys. 7.5)

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{t}{L}, \qquad (7.36)$$

gdzie L jest długością między pionami, gdyż na pionie rufowym i dziobowym zaznaczona jest skala zanurzeń i wg tych znaków dokonuje się odczytów.

Przegłębienie t składa się z dwu elementów: przyrostu zanurzenia na jednym końcu okrętu i wynurzenia drugiego końca

$$t = \Delta T_R - \Delta T_D.$$

Przyrost zanurzenia dziobu wynosi

$$\Delta T_D = (\frac{L}{2} - x_c,)\operatorname{tg}\theta , \qquad (7.37)$$

a przyrost zanurzenia rufy

$$\Delta T_R = (\frac{L}{2} + x_c,)\operatorname{tg}\theta , \qquad (7.38)$$

ponieważ obrót okrętu dokonuje się wokół osi o odciętej

$$x_c, = x_c + \frac{1}{2}\varrho_L \theta,$$

lecz w przybliżeniu $x_c, \approx x_c$.

Zanurzenie więc okrętu będzie równe

$$T_D = T + \triangle T_D = T + (\frac{L}{2} - x_c,)tg\ \theta\ , \qquad (7.39)$$

$$T_R = T - \triangle T_R = T - (\frac{L}{2} + x_c,)tg\ \theta \qquad (7.40)$$

lub

$$T_D = T + \frac{m(x_2-x_1)}{MH_o}(\frac{L}{2} - x_c,), \qquad (7.41)$$

$$T_R = T - \frac{m(x_2-x_1)}{MH_o}(\frac{L}{2} + x_c,). \qquad (7.42)$$

Gdy na statku przesunięcie masy m nie było równoległe do płaszczyzny podstawowej, tzn. gdy pierwotnie masa ta znajdowała się na wysokości Z_1, a po przesunięciu na wysokości Z_2, to pod wpływem tego pionowego przemieszczenia masy przesunie się także środek ciężkości całego okrętu. Zgodnie z twierdzeniem o przesuwaniu mas środek ciężkości okrętu przemieści się w pionie o

$$\triangle Z_G = \frac{m}{M}(Z_2 - Z_1), \qquad (7.43)$$

wobec tego wysokość metacentryczna będzie teraz równa

$$H_{o_1} = H_o - \triangle Z_G = H_o - \frac{m}{M}(Z_2 - Z_1) \qquad (7.44)$$

i tę wysokość metacentryczną należy uwzględnić we wzorach (7.41) i (7.42) lub we wzorze na kąt przegłębienia (7.34). Kąty θ są niewielkie, można więc przyjąć, że

$$\sin\theta \approx tg\,\theta \approx \theta.$$

Stąd moment prostujący może być też przedstawiony w postaci

$$M_{w_\theta} = - DH_o \frac{t}{L}.$$

W praktyce często korzysta się z tzw. jednostkowego momentu przegłębiającego, pod wpływem którego statek przegłębi się o 1 m, czyli t = 1 m. Ponieważ ładunek określa się w jednostkach masy, wygodniej jest stosować moment masy. Jednostkowy więc moment jest równy

$$M_j = \frac{M \cdot H_o}{L} \quad [tm/m]. \qquad (7.45)$$

Stąd przy znanym momencie przegłębiającym M_{py} przegłębienie okrętu można szybko obliczyć

$$t = \frac{M_{py}}{M_j} \qquad (7.46)$$

Ponieważ podłużna wysokość metacentryczna jest w przybliżeniu równa dużemu promieniowi

$$H_o \approx R_o = \frac{J_y}{V},$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

więc jednostkowy moment

$$M_j = \frac{M \cdot J_y}{L \cdot V} = \varrho \cdot \frac{J_y}{L} \quad [tm/m] . \tag{7.47}$$

Tak określony moment jednostkowy zależy tylko od wymiarów i kształtu kadłuba, dlatego można go obliczyć i wykreślić na arkuszu krzywych hydrostatycznych. Wartości tak obliczonego momentu podaje się także dla odpowiedniego zanurzenia na skali załadowania.

Przy wykorzystaniu jednostkowego momentu przegłębiającego, zmiana zanurzenia dziobu i rufy pod wpływem przesunięcia masy jest równa

$$\triangle T_D = \frac{m(x_2 - x_1)}{M_j} \left(\frac{1}{2} - \frac{x_c'}{L}\right), \tag{7.48}$$

$$\triangle T_R = \frac{m(x_2 - x_1)}{M_j} \left(\frac{1}{2} + \frac{x_c'}{L}\right). \tag{7.49}$$

Należy tu pamiętać o znakach. Wynurzenie jest ujemne, a wzrost zanurzenia - dodatni.

Bardzo wygodny jest tu wykres (rys. 4.17) wykonany dla statku przegłębionego. Znając odcięte wszystkich przyjętych ładunków i ich masy oraz masę i odciętą środka ciężkości okrętu przed przyjęciem ładunku można obliczyć odciętą środka ciężkości okrętu X_G po załadowaniu. Korzystając ze wzoru

$$tg\theta = \frac{X_F - X_G}{Z_G - Z_F}$$

lub w przybliżeniu $X_G \approx X_F$

dla punktu przecięcia odciętej środka wyporu X_F i wyporności $V = \frac{M}{\varrho}$ odczytać można od razu z jego wykresu na skali osi odciętych i rzędnych odpowiednie zanurzenie dziobu i rufy okrętu.

Przykład 7.1

Obliczyć, jaką ilość wody należy przepompować z rufowego zbiornika balastowego do dziobowego na odległość $x = 50$ m, aby wyrównać przegłębienie statku. Zanurzenie rufy $T_R = 4{,}5$ m, zanurzenie dzionu $T_D = 3{,}9$ m, jednostkowy moment przegłębiający $M_j = 1500$ tm/m.

Rozwiązanie:

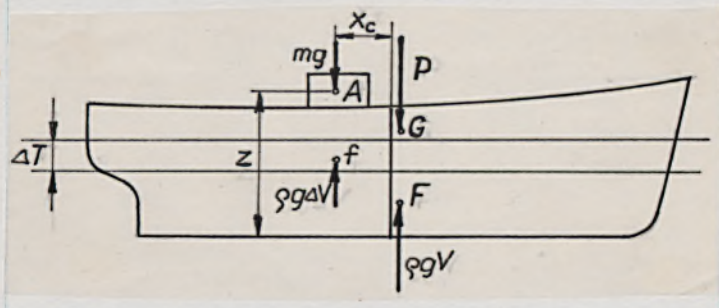
Przegłębienie okrętu jest równe $t = T_R - T_D$. Z drugiej strony przegłębienie $t = \frac{M_{py}}{M_j} = \frac{mx}{M_j}$. Stąd masa wody, jaką należy przepompować, aby przegłębić statek o wielkości t, jest równa

$$m = \frac{(T_R - T_D)M_j}{x} = \frac{(4{,}5 - 3{,}9) \cdot 1500}{50} = 18 \text{ t}.$$

8. 11. 1984
B-5
33°

7.5. Wpływ przyjęcia lub zdjęcia ładunku na zanurzenie dziobu i rufy

Załóżmy, że na statek przyjęto ładunek o masie m w punkcie A leżącym w płaszczyźnie symetrii okrętu oraz o pozostałych współrzędnych x_c i z.



Rys. 7.6

Przyjęcie ładunku w takim punkcie nie wywoła przechyłu ani przegłębienia okrętu. Przyjęcie ciężaru w punkcie o dowolnej odciętej x można rozpatrzyć później, przesuwając go obliczeniowo z punktu A do żądanego miejsca.

Przyjęty ładunek narusza układ wszystkich charakterystycznych punktów mających wpływ na wysokość metacentryczną H_o. Zwiększa się objętość podwodnej części kadłuba, zmieni się położenie środka wyporu, zmieni się także położenie punktu metacentrycznego. Ponieważ wysokościowe położenie z przyjętego ładunku jest dowolne, spowoduje to także zmianę położenia środka ciężkości okrętu G. Nowa wyporność masowa okrętu jest teraz równa

$$M + m = \varrho (V + \Delta V),$$

gdzie: ΔV jest przyrostem objętości zawartej pomiędzy pierwotną i nową wodnicą pływania. Jeżeli przyjęty ładunek jest niewielki, to w obrębie zmiany zanurzenia można przyjąć, że burty są pionowe, wówczas przyrost zanurzenia jest równy

$$\Delta T = \frac{m}{\varrho S_{wL}} . \qquad (7.50)$$

Aby wyznaczyć nową wysokość metacentryczną, rozpatrzmy siły i punkty ich przyłożenia. Dla okrętu pływającego bez przegłębienia siła ciężaru okrętu P przyłożona jest w punkcie G, a siła wyporu $D = Mg = \varrho gV$ w punkcie F. Siły te są sobie równe i przeciwnie skierowane, podobnie jak dodatkowa siła mg w punkcie A oraz $\varrho g\Delta V$ w punkcie f, będącym środkiem wyporu dodatkowej objętości ΔV. Jeśli okręt pochylony zostanie o niewielki kąt θ, to punkty F i f przesuną się odpowiednio do punktów F_θ i f_θ.

Podobnie jak punkt M_L jest środkiem łuku krzywej F, tak i punkt m_L jest środkiem łuku krzywej f. Gdy $\Delta T \to 0$, to promień $\overline{fm}_L$ będzie dążył do promienia krzywizny krzywej środków ciężkości wodnic równoobjętościowych

$$\overline{fm}_L = \varrho_L = \frac{dJ_y}{dV} = \frac{dJ_y}{S_{wL}dz} .$$

Można zapisać, że moment prostujący po przyjęciu ciężaru składa się z dwu składników: momentu prostującego przed przyjęciem ciężaru i przyrostu momentu wywołanego jego przyjęciem [12].

$$M_{w\theta_1} = M_{w\theta} + \Delta M.$$

8. 11. 1984
B-5
33%

Są one równe

$$M_{w\Theta_1} = -(D + p)H_{o_1} \cdot \Theta,$$

$$M_{w\Theta} = -DH_o \cdot \Theta,$$

$$\triangle M = p\,\overline{Am}_L \cdot \Theta.$$

Z rys. 7.7 odcinek $\overline{Am}_L$ jest równy

$$\overline{Am}_L = \overline{KA} - (\overline{Kf} + \overline{fm}_L) = z - (T + \frac{\triangle T}{2} + \varrho_L).$$

Podstawiając poszczególne składniki do równania momentów, a zamiast sił wprowadzając masę, otrzymamy równanie

$$(M + m)H_{o_1} = M \cdot H_o + m\left[T + \frac{\triangle T}{2} + \varrho_L - z\right],$$

z którego można wyznaczyć nową wysokość metacentryczną po przyjęciu ładunku

$$H_{o_1} = H_o + \frac{m}{M+m}\left[T + \frac{\triangle T}{2} + \varrho_L - z - H_o\right], \qquad (7.51)$$

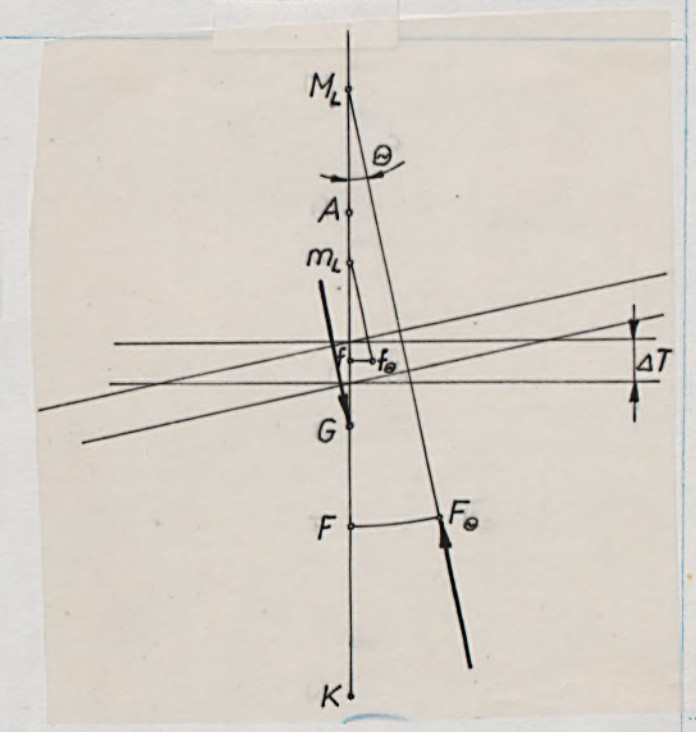
gdzie z jest rzędną środka ciężkości przyjętej masy od płaszczyzny podstawowej.

Wyrażenie $T + \frac{\triangle T}{2} - z$ dla typowych statków morskich jest małe w porównaniu z pozostałymi wielkościami i często pomija się je. Wówczas nowa wysokość metacentryczna jest równa

$$H_{o_1} = \frac{M \cdot H_o + m \cdot \varrho_L}{M+m}. \qquad (7.52)$$

Dla szczególnego przypadku kształtu kadłuba, gdy burty, dziobnica i zarys rufy w obrębie skrajnych części okrętu są pionowe, wówczas $\varrho_L = 0$ i wzór przyjmuje postać

$$H_{o_1} = \frac{M \cdot H_o}{M+m} \qquad (7.53)$$



Rys. 7.7

Masa m jest dodatnia, gdy przyjmuje się ładunek, a ujemna - gdy statek jest rozładowywany.

Podane wzory na wysokość metacentryczną dotyczą jedynie przyjęcia niedużego ładunku $m < 0{,}1 \cdot M$, gdyż tylko dla niewielkiej zmiany zanurzenia można przyjąć, że pole wodnicy nie uległo zmianie.

Jeśli masa m została przyjęta w punkcie o odciętej $x \neq x_c$ należy uwzględnić jej właściwe położenie. Spowoduje to przegłębienie statku, lecz do obliczenia przegłębienia należy teraz przyjąć nową wysokość metacentryczną

$$tg\ \Theta = \frac{m(x-x_c,)}{(M+m)H_{o_1}} . \qquad (7.54)$$

Zmiana zanurzenia dziobu i rufy okrętu będzie teraz składać się z przyrostu średniego zanurzenia spowodowanego przyjętym ładunkiem i zmianą zanurzenia z uwagi na przegłębienie statku

$$T_{D_1} = T_D + \triangle T + \triangle T_D, \qquad (7.55)$$

$$T_{R_1} = T_R + \triangle T - \triangle T_R, \qquad (7.56)$$

gdzie

$$\triangle T_D = (\frac{L}{2} - x_c,)tg\ \Theta = \frac{m(x-x_c,)}{(M+m)H_{o_1}} (\frac{L}{2} - x_c,), \qquad (7.57)$$

$$\triangle T_R = (\frac{L}{2} + x_c,)tg\ \Theta = \frac{m(x-x_c,)}{(M+m)H_{o_1}} (\frac{L}{2} + x_c,). \qquad (7.58)$$

Do określenia zmiany zanurzenia w przypadku przyjęcia (lub zdjęcia) ładunku można także wykorzystać jednostkowy moment przegłębiający.

Gdy mamy cały szereg ładunków i przyjęte masy są duże w stosunku do masy okrętu, wówczas trzeba korzystać z krzywych hydrostatycznych. Suma wszystkich mas wraz z masą okrętu daje aktualną wyporność $V = \frac{\sum m_i}{\rho} = \frac{M}{\rho}$, a z sum momentów statycznych tych mas obliczonych względem owręża i płaszczyzny podstawowej wyznaczyć można współrzędne środka ciężkości okrętu

$$X_G = \frac{\sum m_i\ x_i}{\sum m_i}\ ; \qquad Z_G = \frac{\sum m_i\ z_i}{\sum m_i} .$$

Dla obliczonej wyporności odczytać należy zanurzenie średnie T, a dla tego zanurzenia z kolei wartości X_F, Z_F i R_o. Po obliczeniu podłużnej wysokości metacentrycznej dla danego stanu załadowania

$$H_{o_1} = Z_F + R_o - Z_G,$$

obliczyć można kąt przegłębienia

$$tg\ \Theta = \frac{X_G - X_F}{H_{o_1}}, \qquad (7.59)$$

a w końcu zanurzenie dziobu i rufy okrętu

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

$$T_D = T + (\frac{L}{2} - x_c)tg\ \Theta,$$

$$T_R = T - (\frac{L}{2} + x_c)tg\ \Theta.$$

W drugim przybliżeniu zamiast x_c można podstawić $x_c' = x_c + \frac{1}{2} \rho_L \Theta$. Najwygodniej jednak wyznaczyć można zanurzenie dziobu i rufy z wykresu dla statku przegłębionego, o ile taki wykres jest dostępny. Dla obliczonego V i X_G, które winno być równe odciętej środka wyporu X_F, od razu można odczytać z wykresu T_D i T_R (rys. 4.17).

Przykład 7.2

Statek ma następujące dane: długość L = 60,0 m, szerokość B = 10,8 m, zanurzenie T = 4,4 m, współczynnik pełnotliwości kadłuba δ = 0,65, współczynnik pełnotliwości wodnicy α = 0,75, odcięta środka ciężkości wodnicy pływania x_c = -1,5 m, podłużna wysokość metacentryczna H_o = 68,0 m. Statek pływa bez przegłębienia w wodzie o ρ = 1,025 t/m^3.
Na statek przyjęto ładunki: m_1 = 25 t w punkcie x_1 = -20 m, m_2 = 20 t, x_2 = +12 m; m_3 = 18 t, x_3 = -9 m. Obliczyć zanurzenie dziobu i rufy statku po załadunku.

Rozwiązanie:

Masa statku przed przyjęciem ładunku

$$M = \varepsilon \rho \delta LBT = 1{,}030 \cdot 0{,}65 \cdot 60 \cdot 10{,}8 \cdot 4{,}4 = 1909 \text{ t}.$$

Trzy ładunki można zastąpić jednym o masie $\sum m_i$ i odciętej $x = \frac{\sum m_i x_i}{\sum mi}$, co obliczymy w tabeli 7.1.

T a b e l a 7.1

m_i	x_i	$m_i x_i$
25	-20	-500
20	+12	+240
18	-9	-162
63		-422

$$\sum m_i = 63 \text{ t}$$

$$x = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{-422}{63} = -6{,}70 \text{ m}$$

Przyrost zanurzenia $\Delta T = \frac{m}{\rho \alpha LB} = \frac{63}{1{,}025 \cdot 0{,}75 \cdot 60 \cdot 10{,}8} = 0{,}13$ m .

Kąt przegłębienia $tg\ \Theta = \frac{m(x - x_c)}{(M+m)H_o} = \frac{63(-6{,}70 + 1{,}5)}{1972 \cdot 68} = -0{,}002443$

Przyrost zanurzenia dziobu i rufy pod wpływem przegłębienia

$$\Delta T_D = (\frac{L}{2} - x_c)tg\ \Theta = (30 + 1{,}5)(-0{,}002443) = -0{,}08 \text{ m},$$

$$\Delta T_R = (\frac{L}{2} + x_c)tg\ \Theta = (30 - 1{,}5)(-0{,}002443) = -0{,}07 \text{ m}.$$

Przyrost zanurzenia $\Delta T = \frac{m}{\rho \alpha LB} = \frac{63}{1{,}025 \cdot 0{,}75 \cdot 60 \cdot 10{,}8} = 0{,}13$ m.

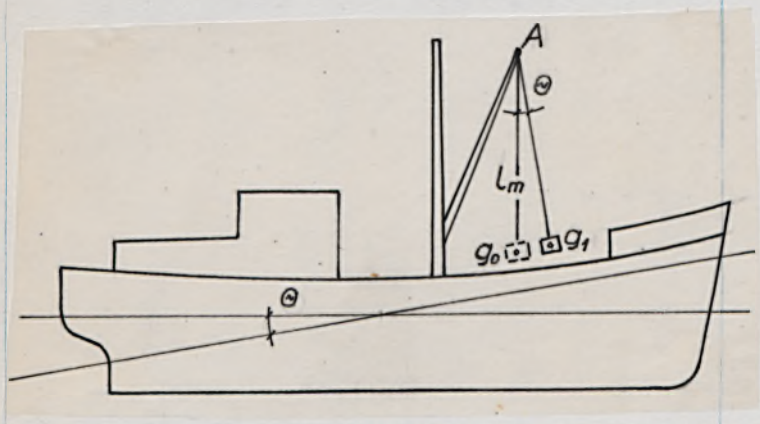
Nowe zanurzenie dziobu i rufy

$$T_D = T + \triangle T + \triangle T_D = 4,4 + 0,13 - 0,08 = 4,45 \text{ m},$$

$$T_R = T + \triangle T - \triangle T_R = 4,4 + 0,13 + 0,07 = 4,60 \text{ m}.$$

7.6. Wpływ ładunków ruchomych na przegłębienie okrętu

Ładunki ruchome na jednostkach pływających, z pominięciem przypadków złego zamocowania, można podzielić na trzy grupy: - podwieszone; - płynne; - sypkie. W zakresie małych kątów pochyleń wpływ na stateczność mają jedynie ciężary podwieszone i płynne.



Rys. 7.8

Przyjmijmy, że ciężar p jest podwieszony na statku na linie o długości l_m. Jeśli na statek zadziała moment przegłębiający M_{py}, to statek przegłębi się, a ciężar p przemieści się po łuku koła o promieniu l_m z punktu g_o do punktu g_1. Linia działania ciężaru p jest prostopadła do nowej wodnicy. Pojawia się więc dodatkowy moment przegłębiający pochodzący od podwieszonego ciężaru równy

$$m_{py} = p\, l_m \sin\Theta. \qquad (7.60)$$

Ponieważ statek pływa w równowadze, musi być spełnione równanie momentów

$$-DH_o \sin\Theta + p l_m \sin\Theta + M_{py} = 0$$

lub

$$D\left(H_o - \frac{p}{D} l_m\right)\sin\Theta = M_{py},$$

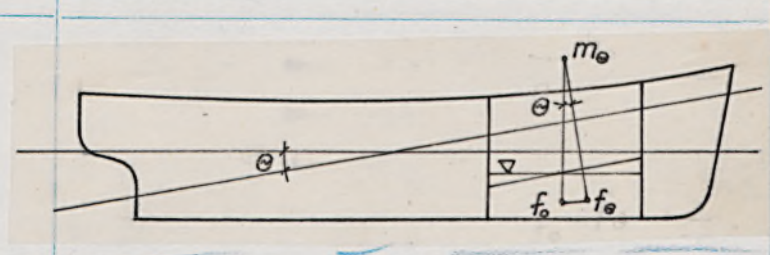
a więc nowa wysokość metacentryczna jest teraz równa

$$H_{o_1} = H_o - \frac{m}{M} l_m. \qquad (7.61)$$

Gdy podwieszonych mas jest więcej, wówczas zamiast iloczynu ml_m trzeba wprowadzić wielkości $\sum m_i l_{mi}$. Z wyrażenia na wysokość metacentryczną widać, że wpływ ładunku podwieszonego jest równoważny przyjęciu tej masy nie w punkcie g, lecz w punkcie A, w punkcie zaczepienia liny na końcu wysięgnika. Praktycznie wpływ ładunków podwieszonych na zmianę podłużnej wysokości metacentrycznej jest niewielki, bardzo mały jest także efekt końcowy - zmiana zanurzenia dziobu i rufy. Dotyczy to typowych statków morskich, można więc wpływ ładunków podwieszonych pominąć. Wpływ ten należy jednak uwzględnić przy jednostkach nietypowych, np. dźwigach pływających.

8. 11. 1984
B-5
33°/₀

Niekorzystny wpływ na stateczność okrętu mają także ładunki płynne. Ma to oczywiście miejsce przy niepełnym zbiorniku, gdy występuje swobodna powierzchnia płynu. Gdy okręt pochyla się, wówczas płyn się przemieszcza, tak że powierzchnia tego płynu jest równoległa do wodnicy pływania. Pojawia się więc dodatkowy moment przegłębiający równy iloczynowi ciężaru płynu i poziomej odległości przemieszczenia się środka ciężkości tego płynu



Rys. 7.9

$$m_p = p\,\overline{f_o f_\Theta}.$$

Środek ciężkości płynu, przez analogię do środka wyporu okrętu F, przemieszcza się w zakresie niewielkich kątów po łuku koła o promieniu

$$\overline{fm} = \frac{i_y}{v}, \tag{7.62}$$

gdzie i_y jest momentem bezwładności pola tej swobodnej powierzchni względem osi przechodzącej przez środek ciężkości tego pola; v - objętość płynu w rozpatrywanym zbiorniku.
Dodatkowy moment przegłębiający pochodzący od przemieszczonego płynu jest równy

$$m_p = p\cdot\overline{fm}\cdot\sin\Theta = \frac{p\cdot i_y}{v}\sin\Theta,$$

a moment wyprostowujący

$$M_{w_1} = M_w + m_p = -DH_o\sin\Theta + \frac{p\cdot i_y}{v}\sin\Theta,$$

$$M_{w_1} = -D\left(H_o - \frac{\rho_p\cdot i_y}{\rho V}\right)\sin\Theta, \tag{7.63}$$

gdzie: ρ_p - jest gęstością płynu w zbiorniku,
ρ - gęstość wody w której pływa okręt.

Widać stąd, że swobodna powierzchnia płynu zmniejsza wysokość metacentryczną o wielkość

$$\Delta H_o = \frac{\rho_p\cdot i_y}{\rho V}. \tag{7.64}$$

Gdy swobodne powierzchnie występują w kilku zbiornikach, poprawka ta ma postać

$$\Delta H_o = -\frac{1}{\rho V}\sum \rho_{p_i}\cdot i_{y_i}, \tag{7.65}$$

tzn. że nie tylko należy uwzględniać momenty bezwładności swobodnych powierzchni, ale także gęstości tych płynów. W przypadku, gdy przyjętym

8. 11. 1984
B-5
33%
S/14/85 PG MS S/272/88

ciężarem jest ładunek płynny, nie zapełniający całkowicie zbiorników, podłużna wysokość metacentryczna ulegnie zmianie o wielkość

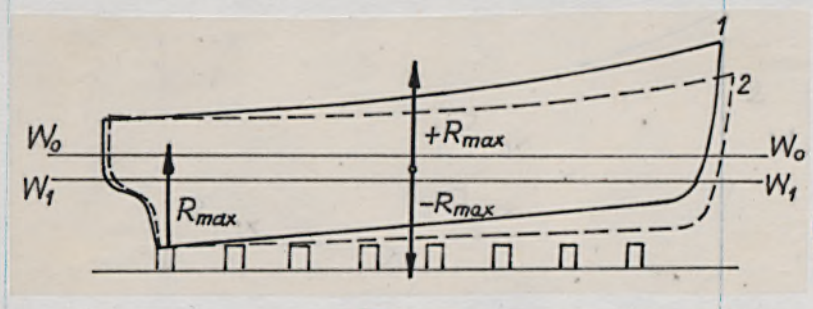
$$\Delta H_o = \frac{\sum m_i}{M + \sum m_i}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_L - z - H_o\right) - \frac{\sum \rho_{p_i} i_{yi}}{M + \sum m_i} =$$

$$= \frac{\sum m_i}{M + \sum m_i}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_L - z - H_o - \frac{\sum \rho_{p_i} i_{yi}}{\sum m_i}\right). \qquad (7.66)$$

Wpływ ładunku płynnego na stateczność podłużną okrętu, a właściwie na określenie zanurzenia dziobu i rufy okrętu, jest podobny do wpływu ładunku podwieszonego, tzn. jest on niewielki i praktycznie dla typowych statków można go pominąć.

7.7. Reakcja na podpory podczas dokowania

Przy dokowaniu statku w celu wynurzenia go ponad poziom wody z reguły wprowadza się statek do doku z pewnym przegłębieniem na rufę, aby łatwiejsze było jego umiejscowienie w ściśle określonym punkcie na podporach dokowych. Powoduje to, że statek przy wynurzaniu się dotyka początkowo podpór dokowych tylko w jednym punkcie. W czasie stopniowego opadania poziomu wody wokół statku reakcja powiększa się, a siła ta na podporze powoduje, że kąt przegłębienia zmniejsza się, aż do momentu, gdy statek na całej długości spocznie na podporach dokowych, na które teraz rozkłada się ciężar wynurzającego się stopniowo okrętu. Bezpośrednio przed posadowieniem statku na podporach dokowych siła skupiona R w rufowej części okrętu osiąga największą wartość. Jeśli w tym momencie wodnicą pływania jest wodnica W_1 i statek zajmuje położenie 2 według rys. 7.10, to równanie sił ma postać [12]



Rys. 7.10

$$P = \rho g V_1 + R_{max},$$

gdzie V_1 jest wyporością okrętu w tym momencie.

Maksymalną reakcję na podporze R_{max} można znaleźć z drugiego równania statyki, z równania momentów. Przyjmujemy, że kąt przegłębienia doku jest równy zero, a początkowy kąt przegłębienia okrętu Θ, czyli

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{T_R - T_D}{L}.$$

Jeżeli w środku objętości ΔV znajdującej się pomiędzy wodnicami W_o i W_1 zaczepić dwie równe, lecz przeciwnie skierowane siły R_{max}, to obecność siły $+R_{max}$ wskazuje, że całkowita siła w tym kierunku jest równa

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%
Str. 129

H wprowadzeniem statku do doku

sile wyporu okrętu przed wprowadzeniem statku do doku. W związku z tym siła ciężaru P i wyporu D dają parę sił, tworząc moment wyprostowujący statek od kąta Θ do 0

$$M_{w\Theta} = - DH_o \cdot \sin \Theta .$$

Równocześnie siły R_{max} i $-R_{max}$ tworzą parę sił, które zmniejszają przegłębienie statku aż do całkowitego posadowienia statku na wszystkich podporach. W przybliżeniu można przyjąć, że ramię tych sił jest równe połowie długości statku. Moment przegłębiający jest więc równy

$$M_{py} = \frac{1}{2} R_{max} \cdot L \cdot \cos \Theta .$$

Z sumy momentów reakcja na podporze jest równa

$$R_{max} = \frac{2 P H_o \operatorname{tg} \Theta}{L} = \frac{2M_j t}{L}, \qquad (7.67)$$

gdzie M_j jest jednostkowym momentem przegłębiającym.

Widać z tego wzoru, że reakcja ta jest wprost proporcjonalna do wstępnego przegłębienia okrętu, stąd zmniejszając przegłębienie, można zmniejszyć i siłę działającą na rufowe podpory.

B-5
33%

8. STATECZNOŚĆ POPRZECZNA OKRĘTU

„Statek jest stworzeniem delikatnym; należy uwzględnić jego wrodzone właściwości, jeśli się chce, aby przyniósł zaszczyt sobie i człowiekowi wśród wiru i zamętu życia".

8.1. Moment prostujący

Wyprowadzone przy rozpatrywaniu stateczności podłużnej związki dotyczą także w postaci ogólnej i przechyłów poprzecznych. W szczególności jednak - o ile poprzednio do wzorów wchodziły wielkości geometryczne kształtu kadłuba związane z osią poprzeczną - teraz mamy do czynienia z wartościami odniesionymi do osi wzdłużnej okrętu. Związki te mają jednak pewne ograniczenia i będą dotyczyć tylko bardzo niewielkich kątów przechyłu. W stateczności poprzecznej okrętu nie można się jednak ograniczyć do przechyłów bliskich zera, gdyż potrafimy sobie wyobrazić sytuację, że statek położy się na burtę, tzn. przechyli się o kąt $\phi = 90^{\circ}$. Oczywiście gorącym pragnieniem wszystkich przebywających na takim statku ludzi będzie, aby powrócił on jak najszybciej do położenia wyprostowanego. Widzimy więc, że przedmiotem zainteresowania musi być stateczność, tj. zdolność powrotu statku do położenia początkowego po ustąpieniu przyczyny, która spowodowała takie przechylenie, w szerokim zakresie kątów przechyłów. Interesuje nas też określenie kąta przechyłu, gdy na statek działa znany moment przechylający.

Rozpatrzmy statek wychylony z położenia równowagi pod wpływem momentu przechylającego M_{px} (rys. 8.1) i który zanurzony jest teraz do wodnicy W_ϕ pływając z przechyłem ϕ. Na statek działają dwie siły: siła ciężkości P w punkcie G i siła wyporu D w punkcie F. Pod wpływem przechylenia ciężar okrętu i jego rozkład nie uległ zmianie, siła P nie zmieniła więc swojej wartości i położenia, natomiast kształt kadłuba uległ zmianie, wskutek czego siła wyporu D działa teraz w punkcie F_ϕ. Siły te, działając równolegle i prostopadle do powierzchni wody tworzą parę sił, która, jak w przypadku z rys. 8.1, stara się sprowadzić statek do położenia pierwotnego. Ramię działania tych sił, podobnie jak i przy

8. 11. 1984
B-5
33%

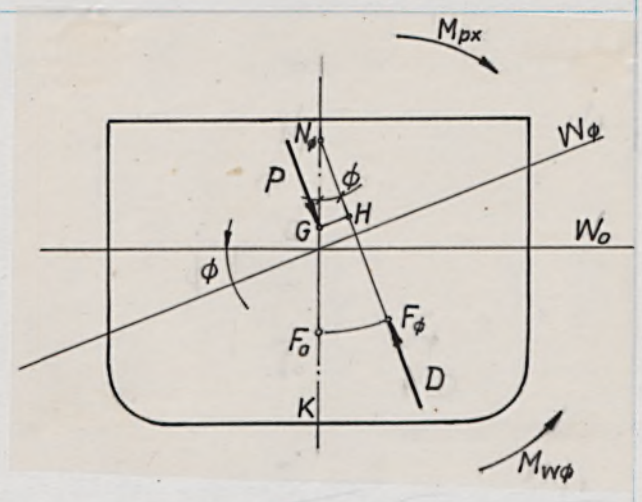
stateczności podłużnej, jest ramieniem prostującym $\overline{GH} = l$, zwanym też ramieniem stateczności statycznej. Obliczmy moment prostujący $M_{w\phi}$. Jeśli obliczymy ten moment względem środka ciężkości okrętu G, eliminujemy siłę P. Moment ten jest równy

$$M_{w\phi} = - Dl$$

a ponieważ

$$l = \overline{GH} = \overline{GN}_{\phi} \sin \phi ,$$

$$M_{w\phi} = - D \overline{GN}_{\phi} \sin \phi \quad (8.1)$$



Rys. 8.1

Ramię stateczności statycznej l zależy od kąta przechyłu ϕ, kształtu statku i rozkładu ciężaru na statku, czyli od położenia punktu G. Jeśli statek jest symetryczny, to odcinek $\overline{GN}_{\phi}$ przy przechyle statku na lewą lub prawą burtę będzie taki sam, stąd wystarczy rozpatrywać przechylenie statku tylko na jedną z burt.

I tu także ramię prostujące można rozłożyć na dwa składniki

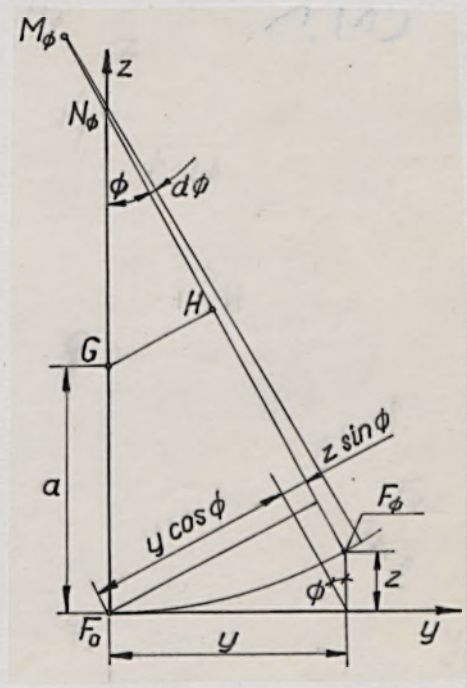
$$l = l_k - l_c = l_{k_1} - l_{c_1}, \quad (8.2)$$

gdzie ramiona ciężaru

$$l_c = Z_G \sin \phi , \quad (8.3)$$

$$l_{c_1} = a \sin \phi = (Z_G - Z_F) \sin \phi \quad (8.4)$$

zależą od położenia środka ciężkości okrętu i od początku przyjętego układu odniesienia. Wartość l_c dotyczy punktu K znajdującego się na wysokości górnej krawędzi stępki, a l_{c_1} dotyczy środka wyporu statku nieprzechylonego F_o. Ramiona l_k, l_{k_1} są ramionami kształtu. Zależą od kąta przechyłu i kształtu okrętu, a także od punktu odniesienia. Ramię prostujące jest oczywiście niezależne od przyjętego układu odniesienia.



Rys. 8.2

Zgodnie z rys. 8.2 ramię stateczności kształtu odniesione do punktu F_o jest równe

$$l_{k_1} = y \cos \phi + z \sin \phi \quad (8.5)$$

lub

$$l_{k_1} = \overline{F_o N}_{\phi} \sin \phi ,$$

a ramię prostujące

8. 11. 1984 ~~6/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

$$l = y \cos\phi + z \sin\phi - a \sin\phi \,. \qquad (8.6)$$

Jeśli natomiast początkiem układu jest punkt K, to wówczas

$$l_k = y \cos\phi + z \sin\phi$$

lub

$$l_k = \overline{KN}_\phi \sin\phi \,,$$

przy czym

$$l_k = l_{k_1} + Z_F \sin\phi \,. \qquad (8.7)$$

Widać z tych zależności, że podstawowe znaczenie dla określenia momentu prostującego ma znajomość współrzędnych środka wyporu okrętu przechylonego, jak również znajomość położenia środka ciężkości okrętu. Dużą rolę odgrywa też tu punkt N_ϕ. Jest to punkt przecięcia się kierunku działania siły wyporu D z płaszczyzną symetrii okrętu xz. Można określić położenie tego punktu znając współrzędne środka wyporu, stąd

$$\overline{KN}_\phi = \frac{l_k}{\sin\phi} = z + y \operatorname{ctg}\phi \,.$$

Gdy kąt ϕ dąży do zera, wówczas

$$KN_\phi = z + \frac{y}{\phi} = Z_F + r_o = Z_M \qquad (8.8)$$

lub

$$\overline{KM} = \overline{KF} + \overline{FM},$$

gdyż punkt N_ϕ pokrywa się wtedy z punktem M_o. Punkt M_o nazywamy poprzecznym metacentrum początkowym lub krótko metacentrum, zaś r_o jest poprzecznym lub małym promieniem metacentrycznym. Wzór 7.9 przedstawia wyrażenie na duży promień metacentryczny. Rozpatrując w ten sam sposób niewielki przechył statku można wyprowadzić wzór na mały promień metacentryczny. Promień ten jest równy

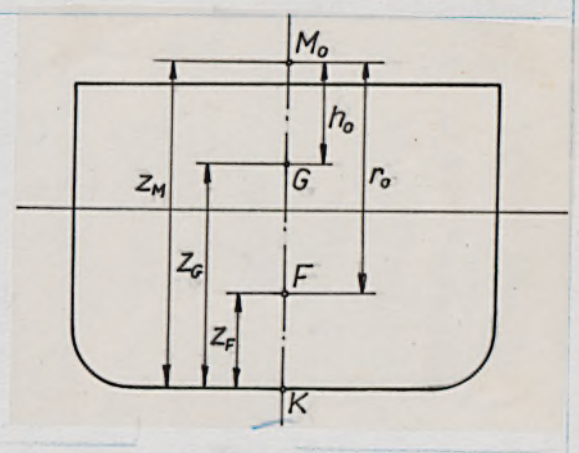
$$r_o = \frac{J_x}{V} \,, \qquad (8.9)$$

gdzie $J_x = \frac{2}{3} \int_L y^3 dx$ jest momentem bezwładności pola wodnicy względem osi wzdłużnej x.

Suma rzędnej środka wyporu i promienia metacentrycznego wyznacza rzędną punktu metacentrycznego nad górną krawędzią stępki okrętu. Z tej też przyczyny na krzywych hydrostatycznych te dwie wartości są ze sobą połączone w tej samej skali, wyznaczając położenie punktu M_o.
Dla warunków początkowych odcinek

$$\overline{GN}_\phi = \overline{GM}_o = h_o.$$

Wielkość tę nazywamy wysokością metacentryczną lub poprzeczną wysokością metacentryczną, dla odróżnienia od podłużnej wysokości H_o. Wysokość metacentryczna h_o jest miarą początkowej stateczności okrętu. Możemy zapisać (rys. 8.3)



Rys. 8.3

$$\overline{GM}_o = \overline{KM} - \overline{KG} = \overline{KF} + \overline{FM} - \overline{KG}$$

lub przy oznaczeniach jednoliterowych

$$h_o = Z_M - Z_G = Z_F + r_o - Z_G. \qquad (8.10)$$

Stąd moment prostujący dla bardzo małych kątów przechyłu jest równy

$$M_{w\phi} = - Dl = - Dh_o \sin\phi \approx - Dh_o\phi \qquad (8.11)$$

i wyrażenie to nazywamy wzorem metacentrycznym. Wzór ten jest podstawą rozwiązywania zagadnień statecznościowych przy niewielkich przechyleniach okrętu. Możemy powiedzieć, że ważność tego wzoru przy przeciętnych wartościach h_o obejmuje przechyły nie większe niż 10^o. Więcej informacji o zakresie stosowania tego wzoru podamy w punkcie 8.7.

Iloczyn Dh_o nazywamy współczynnikiem stateczności. W zakresie małych kątów przechyłów, dla których punkt M_o pokrywa się z punktem N_ϕ, ramiona stateczności kształtu są równe

$$l_k = Z_M \sin\phi \qquad (8.12)$$

lub

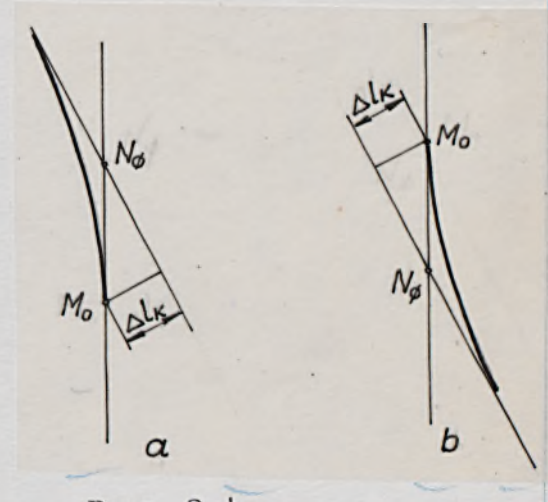
$$l_{k_1} = r_o \sin\phi , \qquad (8.13)$$

a wyrażenia na ramiona stateczności ciężaru pozostają niezmienione.

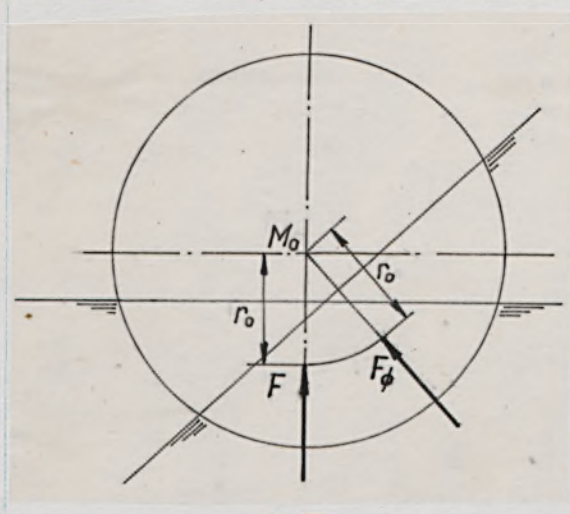
Wprowadźmy jeszcze pojęcie ramienia dodatkowej stateczności kształtu

$$\Delta l_k = l - l_o = \overline{GN}_\phi \cdot \sin\phi - \overline{GM}_o \cdot \sin\phi = \overline{M_oN}_\phi \cdot \sin\phi . \qquad (8.14)$$

Jeśli punkt N_ϕ leży powyżej punktu M_o mówimy, że dodatkowa stateczność kształtu jest dodatnia (rys. 8.4a), a gdy leży poniżej punktu M_o - ramię to jest ujemne. Możemy więc mówić o kształtach korzystnych pod względem statecznościowym i o kształtach niekorzystnych. Np. cylinder o przekroju koła pływając poziomo, bez względu na głębokość zanurzenia, ma ramię dodatkowej stateczności kształtu równe



Rys. 8.4



Rys. 8.5

zeru w pełnym zakresie kątów przechyłu. Środek wyporu pod wpływem przechyłu przemieszcza się po łuku koła o promieniu r_o, a kierunek działania siły wyporu zawsze przechodzi przez środek przekroju kołowego, którym jest metacentrum. A zatem dla takiego przekroju metacentrum nie zmienia swojego położenia (rys. 8.5).

Zbadajmy teraz warunki równowagi statku przechylonego [11], tzn. zbadajmy, kiedy spełniony jest warunek

$$\frac{\partial M_{w\phi}}{\partial \phi} < 0.$$

Moment prostujący jest równy

$$M_{w\phi} = - Dl = - D \overline{GN}_\phi \sin\phi .$$

Pochodna momentu winna być mniejsza od zera

$$\frac{\partial M_{w\phi}}{\partial \phi} = - D \frac{dl}{d\phi} = - D \left(\frac{\partial \overline{GN}_\phi}{\partial \phi} \sin\phi + \overline{GN}_\phi \cdot \cos\phi \right) < 0 .$$

Warunek ten będzie spełniony, gdy

$$\frac{dl}{d\phi} = h_\phi = \frac{\partial \overline{GN}_\phi}{\partial \phi} \sin\phi + \overline{GN}_\phi \cdot \cos\phi > 0. \qquad (8.15)$$

Wielkość h_ϕ nazywamy uogólnioną wysokością metacentryczną. Zatem jeśli statek ma przechył ϕ, będzie on pływać w równowadze trwałej, wówczas gdy uogólniona wysokość metacentryczna będzie dodatnia, czyli

$$h_\phi > 0.$$

Gdy statek pływa w położeniu wyprostowanym, tzn. gdy kąt jest bliski zera, wówczas $\overline{GN}_\phi = \overline{GM}_o = h_o$

i

$$h_\phi = \frac{dl}{d\phi} = \overline{GM}_o \cdot \cos\phi = h_o \cdot \cos\phi > 0,$$

lecz wówczas

$$\cos\phi \approx 1,$$

więc statek jest stateczny, gdy jego początkowa wysokość metacentryczna jest dodatnia

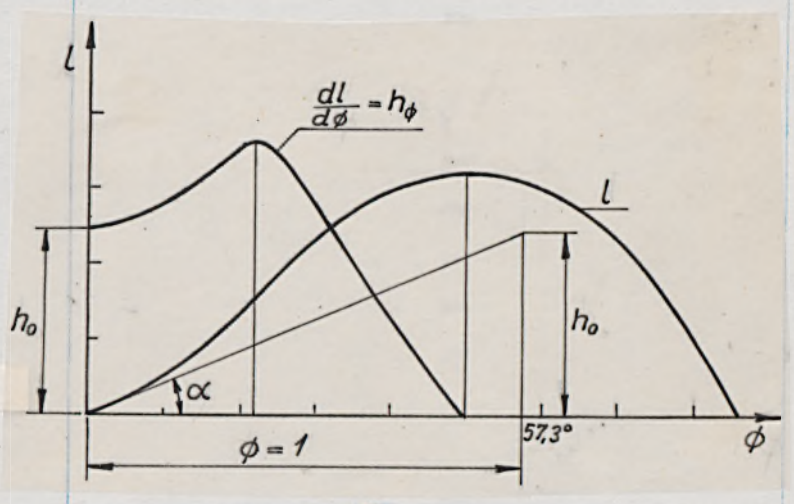
$$h_o > 0. \qquad (8.16)$$

Oczywiście aby statek był w równowadze, musi być także spełniony warunek równości sił $P + D = 0$ i równości momentów $M_{px} + M_{w\phi} = 0$.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

8.2. Wyznaczenie kąta przechyłu

Wiemy już, że aby okręt był stateczny, jego początkowa i uogólniona wysokość metacentryczna muszą być dodatnie. Początkowa wysokość metacentryczna jest miarą stateczności okrętu wyprostowanego z rozszerzeniem stosowania tej miary do kątów około 10^o, lub do kąta wejścia pokładu do wody, jeśli jest mniejszy. Natomiast przy większych kątach przechyłu w praktycznych zagadnieniach tą miarą jest krzywa ramion prostujących l, zwana też krzywą Reeda. Typowy przebieg takiej krzywej w funkcji kąta przechyłu dla morskiego statku towarowego przedstawia rys. 8.6. Poprawność przebiegu takiej krzywej w jej początkowym zakresie sprawdzamy wykorzystując jej własność różniczkową

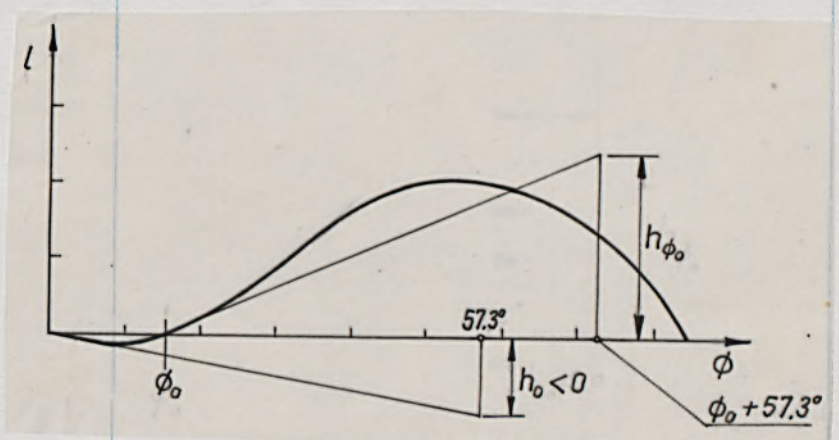


Rys. 8.6

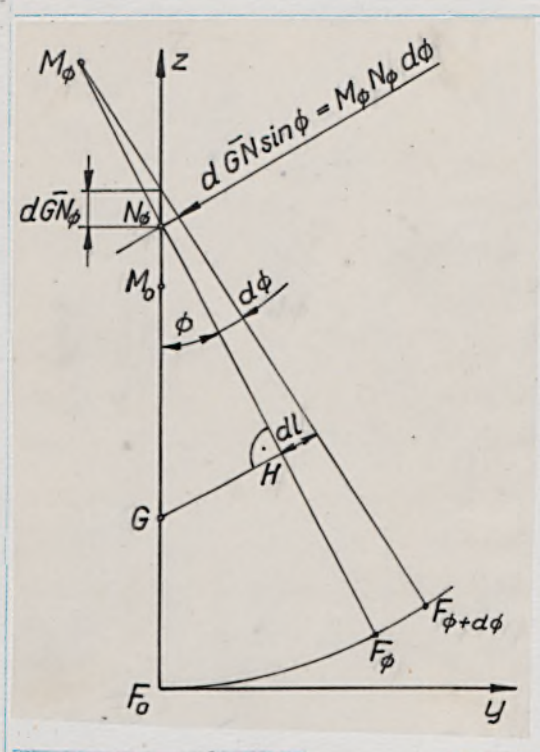
$$\left.\frac{dl}{d\phi}\right|_{\phi=0} = h_o = tg\alpha \ , \qquad (8.17)$$

tzn. prosta poprowadzona przez początek układu i rzędną h_o, wystawioną w punkcie $\phi = 1$ rad $= 57,3^o$, winna być styczna do krzywej w jej początkowym przebiegu. Gdy prosta ta nie jest styczna, należy poszukiwać błędu w obliczeniach. Na rys. 8.6 przedstawiono też przykładowy przebieg uogólnionej wysokości metacentrycznej w funkcji kąta przechyłu.

Zachodzi pytanie, czy statek który ma ujemną początkową wysokość metacentryczną jest stateczny. Krzywa ramion prostujących takiego statku może mieć przebieg jak na rys. 8.7. Taką krzywą mogą mieć statki do przewozu drewna z ładunkiem na pokładzie. Środek ciężkości statku jest wówczas położony bardzo wysoko, lecz dobrze zamocowany ładunek pokładowy powoduje podwyższenie wolnej burty statku, co daje wyporność przy większych kątach przechyłu i ma dodatni wpływ na krzywą ramion prostujących. Statek taki pływa z przechyłem ϕ_o, lecz jest stateczny przy większych kątach przechyłu. W obszarze $\pm \phi_o$ statek jest niestateczny, wskutek tego pod wpływem niewielkiego zakłócenia będzie zmieniać swoje przechylenie z burty na burtę.



Rys. 8.7



Rys. 8.8

Uogólnioną wysokość metacentryczną h_ϕ można też pokazać na przekroju poprzecznym statku w układzie tzw. biegunowym (rys. 8.8). Zgodnie ze wzorem (8.15) uogólniona wysokość metacentryczna jest równa

$$h_\phi = \frac{\partial \overline{GN}_\phi}{\partial \phi} \cdot \sin\phi + \overline{GN}_\phi \cdot \cos\phi .$$

Z rysunku 8.8 widać, że pierwszy składnik jest równy

$$\frac{\partial \overline{GN}_\phi}{\partial \phi} \cdot \sin\phi = \overline{M_\phi N_\phi}$$

a drugi

$$\overline{GN}_\phi \cdot \cos\phi = \overline{N_\phi H},$$

stąd

$$h_\phi = \overline{HN}_\phi + \overline{N_\phi M_\phi} = \overline{HM}_\phi , \qquad (8.18)$$

czyli jest to odległość od punktu metacentrycznego M_ϕ do rzutu środka ciężkości okrętu G na kierunek działania siły wyporu.

Gdy krzywa ramion prostujących osiąga maksimum, wówczas uogólniona wysokość metacentryczna $h_\phi = 0$, co oznacza, że punkt metacentryczny M_ϕ pokrywa się wówczas z punktem H.

Przy rozpatrywaniu stateczności statku interesuje nas nie tylko stwierdzenie, że statek jest stateczny, lecz także jaki będzie przechył, gdy wystąpi moment przechylający. Rozpatrywać będziemy zakłócenia działające w sposób statyczny. Kąt przechyłu wyznaczamy z warunku równości momentu przechylającego i prostującego

$$M_{px} + M_{w\phi} = 0$$

lub (8.19)

$$M_{px} - Dl = 0.$$

Najczęściej używamy za główną statyczną charakterystykę stateczności okrętu krzywą ramion, a nie krzywą momentu prostującego, a to z tej przyczyny, że bez względu na rozmiary statku rząd wielkości tych ramion jest taki sam. Stąd moment przechylający sprowadzony do ramienia przechylającego jest równy

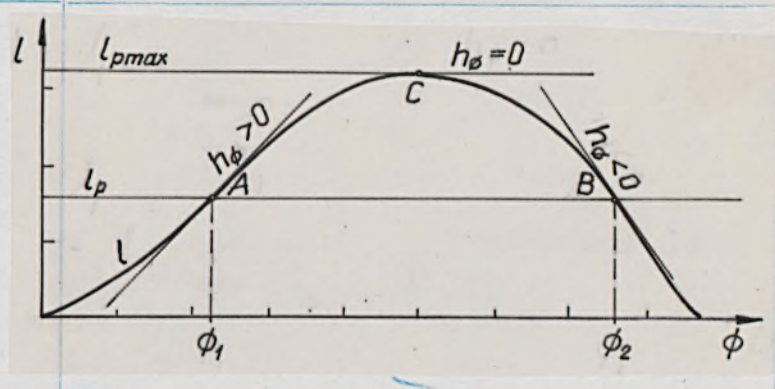
$$l_{px} = \frac{M_{px}}{D} \qquad (8.20)$$

i kąt przechyłu statycznego wyznaczymy z warunku

$$l_p - l = 0, \qquad (8.21)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

co wykonuje się wykreślnie jak na rys. 8.9. Występują tu dwa rozwiązania: kąt przechyłu ϕ_1 jako wynik przecięcia ramienia przechylającego z ramieniem prostującym w punkcie A i kąt ϕ_2 - wynik przecięcia w punkcie B. Jednak tylko w jednym punkcie jest spełniony warunek



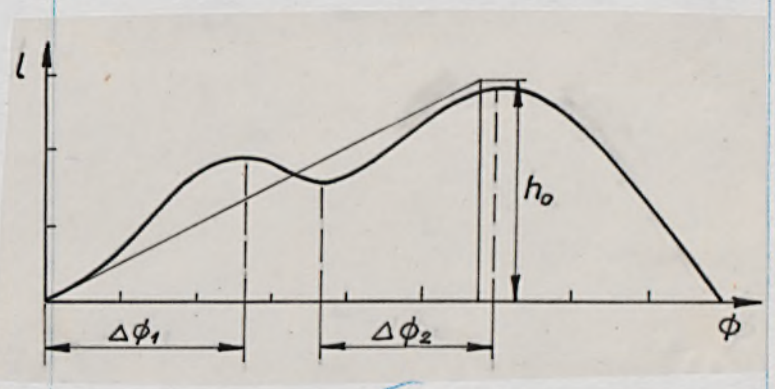
Rys. 8.9.

$$\frac{\partial M_{w\phi}}{\partial \phi} < 0 \quad \text{lub} \quad \frac{\partial (l_p - l)}{\partial \phi} < 0,$$

gdyż w tym punkcie $\frac{\partial l}{\partial \phi} = h_\phi > \frac{\partial l_p}{\partial \phi}$.

Równowaga trwała istnieje tylko w punkcie A i statycznym kątem przechyłu pod wpływem działania momentu M_{px} lub ramienia przechylającego l_p jest kąt ϕ_1. W punkcie B występuje równowaga nietrwała, gdyż nawet najmniejsze zakłócenie w kierunku ϕ powoduje całkowite przewrócenie okrętu. Zatem, gdy ramię przechylające jest stałe w funkcji kąta przechyłu, wówczas maksymalna rzędna krzywej ramion l określa maksymalne, dopuszczalne ramię przechylające $l_{p\,max}$, a punkt styczności C (rys. 8.9) jest maksymalnym statycznym kątem przechyłu okrętu. Większe ramię przechylające od $l_{p\,max}$ powoduje przewrócenie się okrętu.

Gdy w obliczeniach stateczności owych uwzględnić nadbudówki, wówczas na krzywej ramion mogą wystąpić dwa maksima i kształt takiej krzywej będzie jak na rys. 8.10. Statyczne przechylenie statku pod wpływem statycznie działających ramion przechylających będą występować wówczas w zakresie kątów $\Delta\phi_1$ lub $\Delta\phi_2$.



Rys. 8.10

Jeśli z krzywej ramion wynika, że kąt przechyłu będzie niewielki, np. mniejszy od 10^o, to wówczas ramię prostujące można określić wzorem metacentrycznym

$$M_{px} - Dh_o \sin\phi = 0,$$

więc kąt przechyłu jest równy

$$\sin\phi \approx \phi = \frac{M_{px}}{Dh_o}.$$

Gdy moment przechylający pochodzi od przesunięcia ciężaru p na odległość y, to wówczas

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$$py \cos\phi - Dh_o \sin\phi = 0$$

i

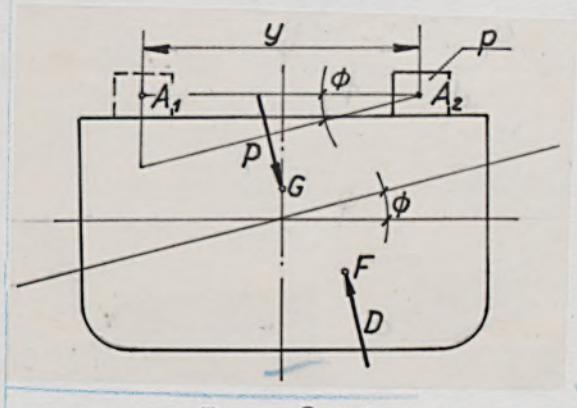
$$tg\,\phi \approx \phi = \frac{py}{Dh_o} . \qquad (8.22)$$

Zamiast siły wyporu i ciężaru częściej używa się mas i wówczas

$$tg\,\phi = \frac{my}{Mh_o} , \qquad (8.23)$$

gdzie M jest masą całego okrętu, a przesunięta masa m wchodzi w skład masy M.

Podobnie do jednostkowego momentu przegłębiającego czasami w użyciu jest jednostkowy moment przechylający statek o jeden stopień



Rys. 8.11

$$M_{jo} = 0{,}0175\ Dh_o , \qquad (8.24)$$

a wtedy kąt przechyłu

$$\phi^o = \frac{M_{px}}{M_{jo}} . \qquad (8.25)$$

8.3. Obliczenie ramion stateczności kształtu

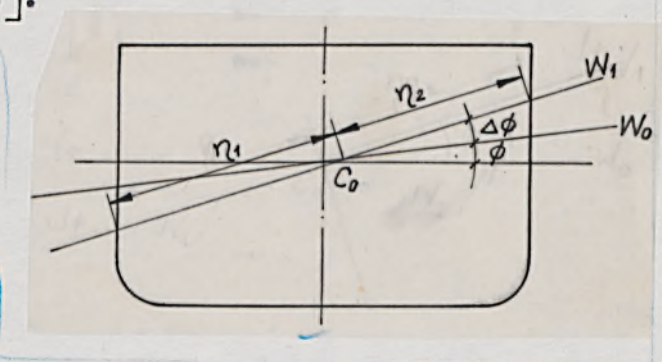
Jak widać z przytoczonych już rozważań, podstawową wielkością decydującą o stateczności okrętu jest jego krzywa ramion prostujących. Obecnie podany będzie jeden ze sposobów obliczenia wartości ramion stateczności kształtu dla wybranej wyporności. Będzie to metoda Kryłowa-Dargniesa. W różnych poradnikach okrętowych można również znaleźć cały szereg innych metod. Podana przykładowo wybrana metoda charakteryzuje się dużą dokładnością, dlatego też jest często stosowana. Metoda ta polega na wyznaczeniu wodnic równoobjętościowych w pełnym zakresie kątów przechyłów, na obliczeniu dla tych wodnic promieni metacentrycznych, a następnie na wyznaczeniu ramion kształtu ze skonstruowanego tzw. biegunowego wykresu stateczności. Przechylając statek i zachowując stałą wyporność stosowanie metody Simpsona do obliczeń charakterystyk całkowych wodnic staje się niewygodne. Dokładniejsza jest tu metoda Czebyszewa. W zależności od ilości przyjętych przekrojów wręgowych rozmieszczonych zgodnie z zasadą metody Czebyszewa wykreśla się nowe owrężenie, najczęściej dwukrotnie większe w stosunku do rysunku linii teoretycznych. Wykreśla się pełne wręgi, symetrycznie dla obu burt aż do wysokości pokładu, kończąc taki przekrój poziomą linią pokładnika. Ilość przekrojów używanych do takich obliczeń wynosi od 8 do 14. Aby uniknąć pomyłek przy odczytach rzędnych η, wszystkie kontury przekrojów muszą być dokładnie opisane.

Istotnym elementem metody Kryłowa-Dargniesa jest wyznaczenie wodnic równoobjętościowych, które przy różnych kątach przechyłu odcinają tę samą wybraną objętość podwodnej części kadłuba. Wyznaczenie takiej wodnicy

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

podano już w punkcie 7.3 przy omawianiu przegłębienia okrętu. Sposób ten można także zastosować i dla przechyłów poprzecznych. Podamy tu jednak teraz bardziej precyzyjny sposób wyznaczania wodnicy równoobjętościowej. Sposób ten poprawia dokładność obliczeń szczególnie przy statkach niskoburtowych i dużych kątach przechyłu [15].

Aby znaleźć wodnicę równoobjętościową nachyloną pod kątem $\phi + \Delta\phi$, rysujemy najpierw wodnicę pomocniczą W_1 przechodzącą przez środek ciężkości C_o poprzedniej wodnicy równoobjętościowej W_o, nachylonej pod kątem ϕ (rys.8.12). Mierząc rzędne η_2 i η_1 wodnicy pomocniczej W_1 na poszczególnych wręgach po obu stronach krawędzi C_o możemy obliczyć jej następujące parametry:



Rys. 8.12

- pole wodnicy

$$S_1 = \int_L (\eta_2 - \eta_1)\,d\xi = \frac{L}{n}\left[\left|\sum_i \eta_2\right| + \left|\sum_i \eta_1\right|\right], \qquad (8.26)$$

gdzie n jest ilością wręgów Czebyszewa,

- moment statyczny pola tej wodnicy względem osi ξ przechodzącej przez C_o

$$m_{1\xi} = \frac{1}{2}\int_L (\eta_2^2 - \eta_1^2)\,d\xi = \frac{L}{2n}\left[\left|\sum \eta_2^2\right| - \left|\sum \eta_1^2\right|\right], \qquad (8.27)$$

- odciętą środka ciężkości wodnicy

$$\eta_{c_1} = \overline{C_o C_1} = \frac{m_{1\xi}}{S_1} = \frac{\left|\sum \eta_2^2\right| - \left|\sum \eta_1^2\right|}{2\left[\left|\sum \eta_2\right| + \left|\sum \eta_1\right|\right]}, \qquad (8.28)$$

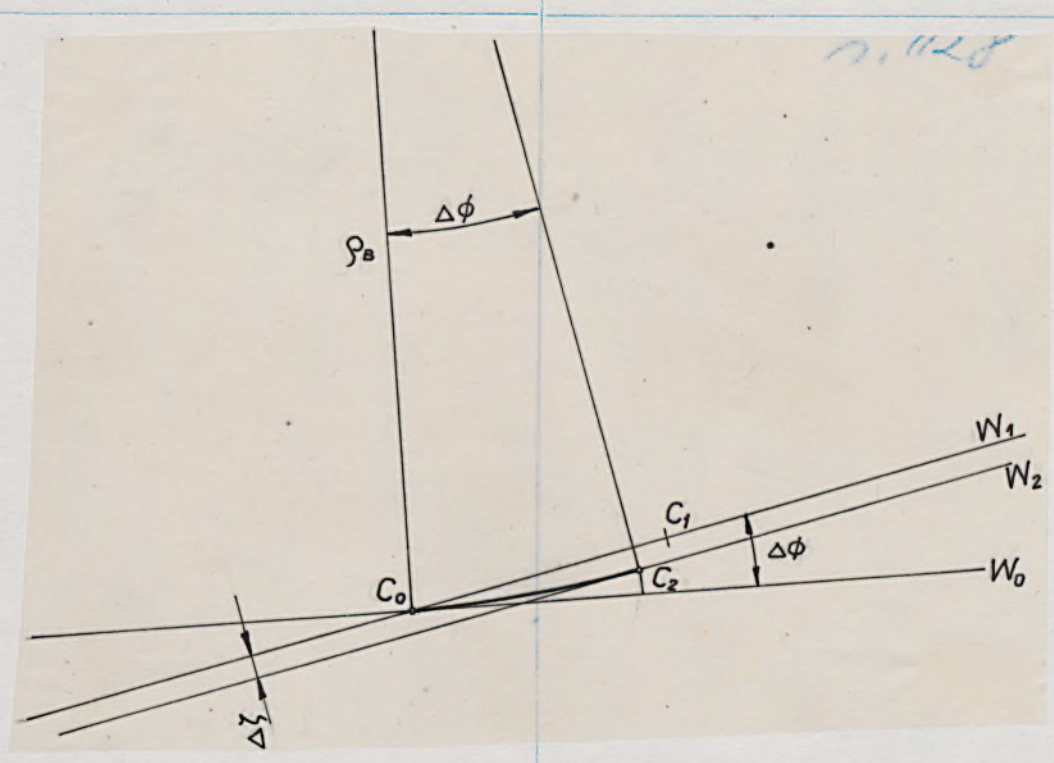
- moment bezwładności pola wodnicy względem osi ξ przechodzącej przez C_o

$$J_o = \frac{1}{3}\int (\eta_2^3 - \eta_1^3)\,d\xi = \frac{L}{3n}\left[\left|\sum \eta_2^3\right| + \left|\sum \eta_1^3\right|\right], \qquad (8.29)$$

- moment bezwładności pola wodnicy względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości pola wodnicy C_1

$$J_1 = J_o - S_1\,\eta_{c_1}^2 . \qquad (8.30)$$

Wodnica W_1 nie jest wodnicą równoobjętościową. Gdy $\eta_{c_1} > 0$, to wodnica równoobjętościowa W_2 będzie leżeć poniżej wodnicy W_1. Konstrukcja znajdowania wodnicy W_2 opiera się na założeniu, że na niewielkim odcinku krzywą środków ciężkości C można aproksymować łukiem koła o promieniu $\rho_B = \frac{dJ}{S_{wL}\,dz}$. Środki ciężkości C_1 i C_2 odpowiednich wodnic



Rys. 8.13

W_1 i W_2 nie leżą na prostej prostopadłej do tych wodnic a ich powierzchnie S_1 i S_2 i momenty bezwładności J_1 i J_2 też nie są sobie równe. Wodnica równoobjętościowa W_2 musi przechodzić przez punkt C_2. Jeśli więc znamy odcinek $\overline{C_o C_2} = \eta_{c_2}$, to punkt C_2 leży w środku łuku zakreślonego promieniem η_{c_2} z punktu C_o (rys. 8.13). Wówczas przesunięcie wodnicy W_2 w stosunku do wodnicy W_1 wynosi

$$\Delta\zeta = -\frac{1}{2}\eta_{c_2}\cdot\Delta\phi \,. \tag{8.31}$$

Wiedząc [6], że pochodna odciętej środka ciężkości wodnicy względem zanurzenia

$$\eta_c' = \frac{d\eta_c}{d\zeta} = \frac{1}{S_{wL}}\cdot\frac{d\,S_{wL}}{d\phi}\,, \tag{8.32}$$

możemy zapisać

$$\eta_c' = \frac{\Delta\eta_c}{\Delta\zeta} = \frac{1}{S_2}\cdot\frac{\Delta S_\phi}{\Delta\phi}$$

i stąd odchylenie środka ciężkości wodnicy od pionu przy równoległym jej przesuwaniu wynosi

$$\Delta\eta_c = \eta_{c_2} - \eta_{c_1} = \eta_c'\cdot\Delta\zeta = \frac{1}{S_2}\cdot\frac{\Delta S_\phi}{\Delta\phi}\left(-\frac{1}{2}\eta_{c_2}\Delta\phi\right),$$

więc

$$\Delta\eta_c = -\frac{\Delta S_\phi}{2S_2}\eta_{c_2},$$

8. 11. 1984
B-5
33%

gdzie $\Delta S_\phi = S_2 - S_o$ jest zmianą pola wodnicy równoobjętościowej przy obrocie o kąt $\Delta\phi$. Z zależności tej obliczyć można poszukiwany odcinek $\overline{C_o C_2} = \eta_{c_2}$. Jest on równy

$$\eta_{c_2} = \frac{2 S_2}{3S_2 - S_o} \eta_{c_1} .$$

Współczynnik przy η_{c_1} można przedstawić też w innej postaci

$$\frac{2 S_2}{3S_2 - S_o} = \frac{2 S_2}{2S_2 - \Delta S_\phi} = \frac{S_2}{S_2 + \frac{1}{2}\Delta S_\phi} = 1 - \frac{\Delta S_\phi}{2 S_2} = \frac{S_2 + S_o}{2 S_2} ,$$

stąd

$$\eta_{c_2} = \frac{S_2 + S_o}{2 S_2} \eta_{c_1} , \qquad (8.33)$$

gdzie wykorzystaliśmy wzór $\frac{1}{1+x} = 1 - x$ gdy x jest bardzo małe. S_o jest polem poprzedniej wodnicy równoobjętościowej W_o, η_{c_1} obliczoną już odciętą środka ciężkości wodnicy W_1 . Nie znamy jeszcze pola wodnicy S_2. Obliczmy wpierw zmianę momentu bezwładności odpowiednich wodnic

$$\Delta J = J_2 - J_1 .$$

Ponieważ promień krzywizny krzywej C jest równy

$$\rho_B = \frac{\Delta J}{S_2 \Delta \zeta} , \text{ jak również } \rho_B = \frac{\eta_{c_2}}{\Delta\phi} ,$$

więc

$$\Delta J = S_2 \rho_B \Delta\zeta = S_2 \cdot \frac{\eta_{c_2}}{\Delta\phi} \left(-\frac{1}{2} \eta_{c_2} \Delta\phi \right)$$

$$\Delta J = -\frac{1}{2} S_2 \eta_{c_2}^2 , \qquad (8.34)$$

stąd moment bezwładności nowej równoobjętościowej wodnicy W_2 będzie równy

$$J_2 = J_1 + \Delta J = J_1 - \frac{1}{2} S_2 \eta_{c_2}^2 \qquad (8.35)$$

lub

$$J_2 = J_o - S_1 \cdot \eta_{c_1}^2 - \frac{1}{2} S_2 \cdot \eta_{c_2}^2 . \qquad (8.36)$$

Aby wyznaczyć pole wodnicy W_2 załóżmy, że stosunek momentów bezwładności wodnic jest proporcjonalny do kwadratu ich powierzchni

$$\frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2$$

lub

$$1 + \frac{\Delta S}{S_1} = \left(1 + \frac{\Delta J}{J_1}\right)^{1/2},$$

więc

$$\frac{\Delta S}{S_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta J}{J_1}.$$

Wykorzystano tu z kolei wzór $(1 + x)^n = 1 + nx$, gdy x jest bardzo małe. Po przekształceniu otrzymamy, przyjmując, że $\Delta J = -\frac{1}{2} S_o \cdot \eta_{c_1}^2$,

$$\Delta S = -\frac{1}{4} S_o S_1 \frac{\eta_{c_1}^2}{J_1}. \qquad (8.37)$$

i

$$S_2 = S_1 + \Delta S \qquad (8.38)$$

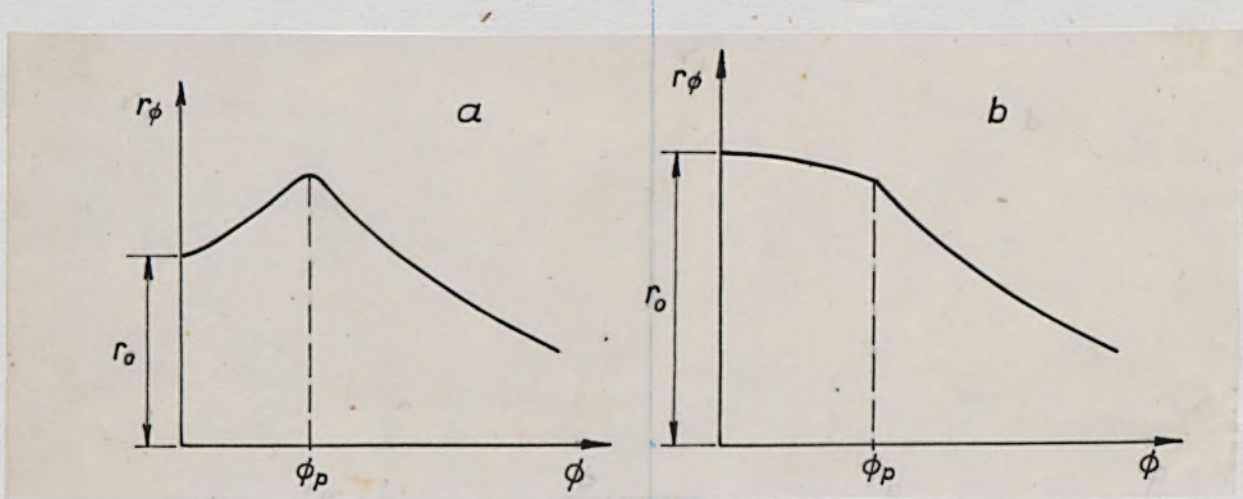
co umożliwia już obliczenie η_{c_2}, wykonanie konstrukcji w celu znalezienia poszukiwanej wodnicy W_2, obliczenia jej momentu bezwładności J_2 i obliczenia promienia metacentrycznego $r_{\phi + \Delta\phi} = \frac{J_2}{V}$. Należy następnie powtórzyć cały tok obliczeń powiększając kąt o następny krok $\Delta\phi$, np. o 10^o lub 15^o. Punkt C_2 staje się teraz punktem C_o a wodnica W_2 wodnicą W_o.

Gdy statek ma dużą wolną burtę, przytoczony schemat obliczeń można uprościć zakładając, że wodnica równoobjętościowa W_2 ma taki sam moment bezwładności jak wodnica pomocnicza W_1, czyli

$$J_1 = J_2.$$

Wówczas

$$J_2 = J_o - \frac{3}{2} S_1 \cdot \eta_c^2. \qquad (8.39)$$

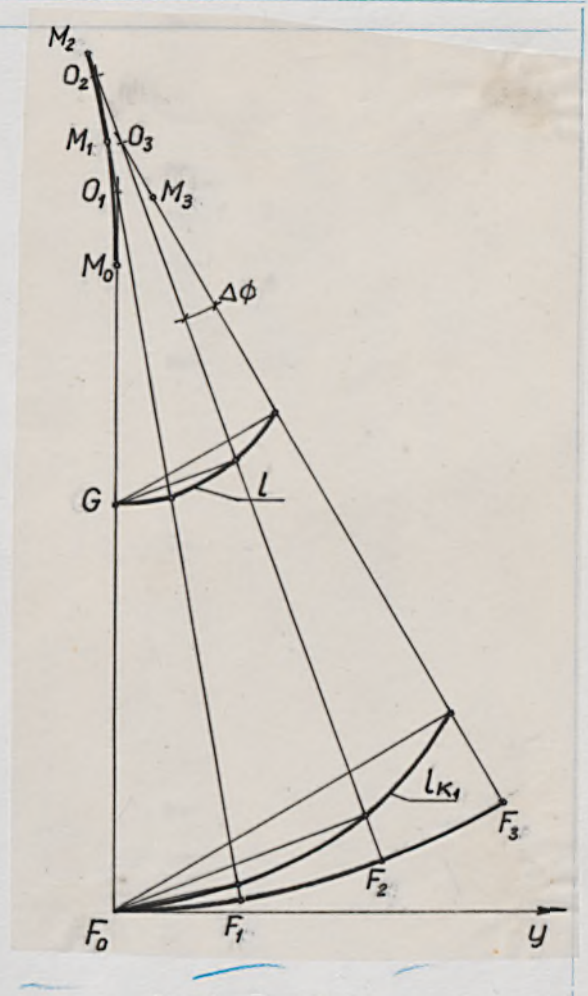


Rys. 8.14

W celu sprawdzenia poprawności obliczeń celowe jest wykreślenie promieni r_ϕ w funkcji kąta przechyłu. Typowe przebiegi promieni metacentrycznych przedstawia rys. 8.14, gdzie ϕ_p jest kątem wejścia pokładu do wody.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Mając promienie metacentryczne w zakresie przechyłu od 0 do 90^o można przystąpić do konstrukcji wykresu biegunowego. Zaczynamy od wykreślenia krzywej środków wyporu. Zakłada się, że na niewielkim odcinku krzywą tę można aproksymować łukiem koła o promieniu równym średniej arytmetycznej promieni metacentrycznych na końcach danego odcinka krzywej. Konstrukcję takiego wykresu pokazuje rys. 8.15. Pierwszy łuk $\overline{F_oF_1}$ wykreślony jest promieniem $\overline{F_oO}_1 = r_1 = \frac{1}{2}(r_o + r_{\phi_1})$, następny łuk $\overline{F_1F_2}$ promieniem $\overline{F_1O}_2 = r_2 = \frac{1}{2}(r_{\phi_1} + r_{\phi_2})$ itd. powtarzamy w odstępie $\Delta\phi$ aż do $\phi = 90^o$. Promienie ograniczające poszczególne odcinki krzywej środków wyporu są jednocześnie liniami działania siły wyporu, na których od punktów F zaznacza się metacentra M w odległościach równych promieniom metacentrycznym. Łącząc punkty M krzywą otrzymamy ewolutę metacentryczną. Rzut punktu F_o na kierunek działania siły wyporu przy poszczególnych kątach ϕ wyznacza odcinek l_{k_1} będący ramieniem stateczności kształtu, a rzut środka ciężkości okrętu G wyznacza ramię prostujące l. Łącząc te punkty otrzymamy krzywe ramion kształtu i ramion prostujących w układzie biegunowym. Na wykresie takim zaznacza się też krzywą ramion dodatkowej stateczności kształtu oraz krzywą ramion stateczności dynamicznej, o czym będzie mowa w punkcie 8.10.



Rys. 8.15

Niezależnie od wykreślnego wyznaczenia ramion kształtu i ramion prostujących można, mając wartości promieni metacentrycznych dla wybranych przechyłów, wyznaczyć w sposób analityczny wszystkie wielkości, które daje wykres biegunowy. Początek układu i tu obieramy w punkcie F_o statku wyprostowanego. Ramię kształtu jest równe

$$l_{k_1} = y \cos\phi + z \sin\phi .$$

Znając promienie metacentryczne można wyznaczyć współrzędne środka wyporu z zależności

$$y = \int_0^{\phi_i} r_\phi \cos\phi \, d\phi , \qquad (8.40)$$

$$z = \int_0^{\phi_i} r_\phi \sin\phi \, d\phi , \qquad (8.41)$$

które to wartości należy określić dla wszystkich kątów, dla których znane są promienie r_ϕ. Najwygodniejszy jest tu wzór trapezów i wówczas

$$y = \frac{\Delta\phi}{2} \sum r_\phi \cos\phi \ , \qquad (8.42)$$

$$z = \frac{\Delta\phi}{2} \sum r_\phi \sin\phi \ , \qquad (8.43)$$

co oblicza się zgodnie ze schematem podanym w tabeli 3.2. Znając odległość środka ciężkości okrętu od środka wyporu $a = \overline{GF}_o$ ramię stateczności statycznej jest równe

$$l = y \cos\phi + z \sin\phi - a \sin\phi \ .$$

Z kolei współrzędne metacentrum wyznaczają zależności

$$y_M = y - r_\phi \sin\phi \ , \qquad (8.44)$$

$$z_M = z + r_\phi \cos\phi \ , \qquad (8.45)$$

a dodatkowe ramię stateczności kształtu

$$\Delta l_k = l - h_o \sin\phi \ ,$$

gdzie $$h_o = r_o - a.$$

Obliczenia te mogą służyć do sprawdzenia poprawności wykonania biegunowego wykresu stateczności lub mogą ten wykres wyeliminować, bo w zagadnieniach praktycznych bardziej przydatny jest wykres ramienia prostującego w funkcji kąta przechyłu. Na wykresie biegunowym natomiast łatwiej można wykryć ewentualne błędy obliczeń.

Należy pamiętać, że wykres biegunowy dotyczy tylko jednej wyporności. Zmiana położenia środka ciężkości okrętu nie stanowi tu problemu, gdyż po naniesieniu na wykres nowego położenia punktu G łatwo można wyznaczyć nowe ramię prostujące. Natomiast zmiana zanurzenia okrętu i, co za tym idzie, zmiana wyporności powoduje, że wykres taki przestaje być aktualny i trzeba wykonać nowy wykres dla nowej wyporności. Aby uniknąć tej niedogodności podczas eksploatacji statku biuro projektowe wykonuje od razu takie obliczenia dla pięciu lub sześciu wyporności w pełnym możliwym zakresie od statku pustego do w pełni załadowanego. Na podstawie takich obliczeń można wykonać wykres ramion stateczności kształtu w funkcji wyporności, gdzie parametrem jest kąt przechyłu. Wykres taki, pokazany na rys. 8.16, nosi nazwę pantokaren. Z reguły ramiona kształtu odniesione są tu do górnej krawędzi stępki, do punktu K, czyli

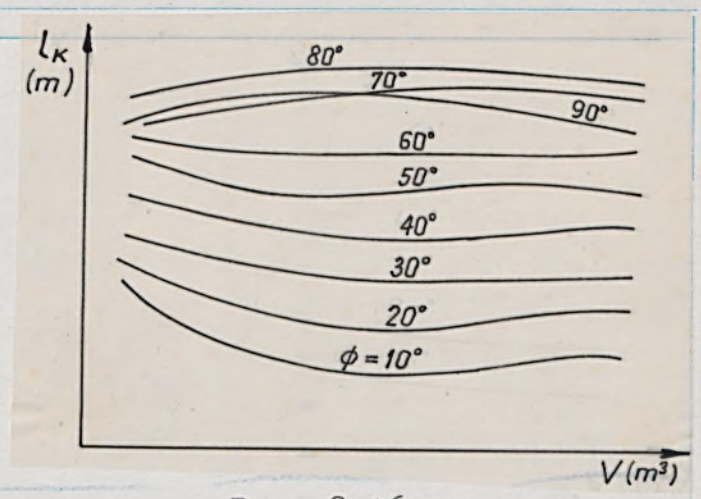
$$l_k = l_{k_1} + Z_F \sin\phi \ .$$

Pantokareny, obok krzywych hydrostatycznych i skali Bonjeana, są podstawowym wykresem w dokumentacji okrętowej. Wykres taki jest bardzo wygodny w zastosowaniu, gdyż na jego podstawie można bardzo szybko wyznaczyć dla danego statku wartości ramion prostujących w dowolnym stanie załadowania, tzn. dla dowolnej wyporności i dla dowolnego położenia środka ciężkości. Podstawą jest równanie

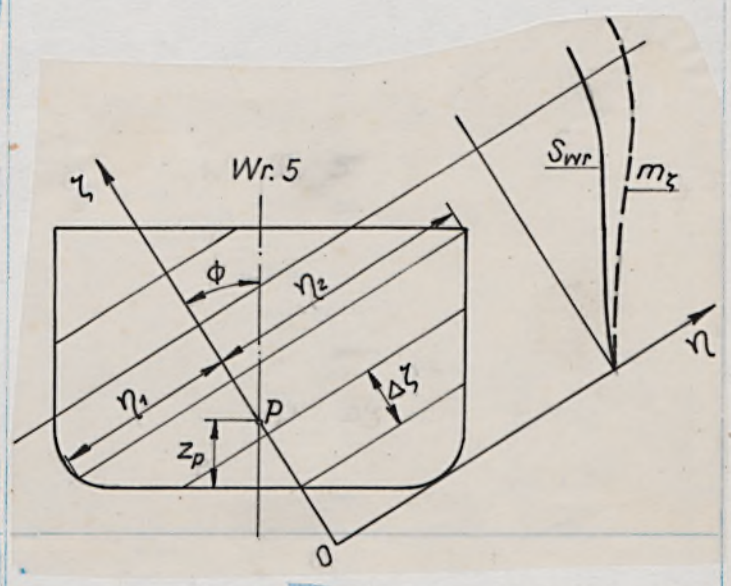
8. 11. 1984
B-5
33%

$$1 = 1_k - Z_G \sin\phi \ .$$

Jak już powiedziano, jest wiele metod obliczania pantokaren. Jedną z szybszych metod jest metoda podana poniżej [2]. Obliczenia upraszczają się jeszcze, gdy kształt kadłuba okrętu wyrażony jest owrężeniem Czebyszewa. Metoda ta nie wymaga określenia wodnic równoobjętościowych. Dla każdego przekroju wrężnicowego i różnych wartości kąta przechyłu, np. co 10^o obliczamy i wykreślamy w funkcji wysokości wręgu krzywe jego pola i momentu statycznego względem osi pionowej (rys. 8.17). W tym celu w płaszczyźnie symetrii okrętu wybieramy dowolny biegun P w odległości z_p od płaszczyzny podstawowej. Przez punkt P przechodzi oś ζ układu $O\eta\zeta$ a oś η jest styczna do konturu największego wręgu. Mierząc w tym układzie rzędne η w stałych odstępach $\Delta\zeta$ obliczamy pole przekroju



Rys. 8.16



Rys. 8.17

$$S_{wr} = \int_0^{\zeta_1} (\eta_2 - \eta_1) d\zeta \qquad (8.46)$$

i moment statyczny pola względem osi ζ

$$m_\zeta = \frac{1}{2} \int_0^{\zeta_1} (\eta_2^2 - \eta_1^2) d\zeta \ . \qquad (8.47)$$

Wartości S_{wr} i m_ζ w funkcji wysokości przekroju wręgowego wykreślamy dla każdego wręgu i dla każdego kąta przechyłu. Całkując dla wybranego zanurzenia T_ϕ wszystkie pola S_{wr} wzdłuż całej długości kadłuba otrzymamy wyporność statku

$$V_\phi = \int_0^L S_{wr\phi} \, d\xi \ , \qquad (8.48)$$

a całkując momenty statyczne pól wręgowych m_ζ otrzymamy moment statyczny objętości względem płaszczyzny wyznaczonej przez osie ζ

$$M_{v\phi} = \int_0^L m_\zeta \, d\xi \ . \qquad (8.49)$$

Iloraz momentu przez wyporność jest poszukiwanym ramieniem kształtu względem bieguna P

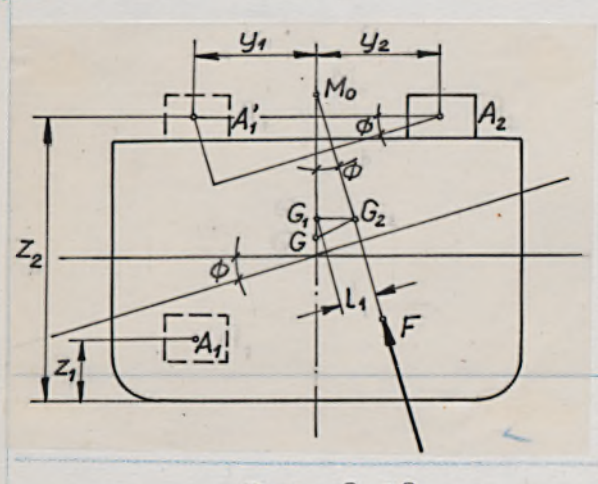
$$l_{p\phi} = \frac{M_{v\phi}}{V_{\phi}}, \qquad (8.50)$$

które należy sprowadzić do punktu K

$$l_k = l_{p\phi} + Z_p \sin \phi . \qquad (8.51)$$

Obliczenia takie należy wykonać dla każdego kąta przechyłu w zakresie od 0 do 90^o i dla kilku wyporności. Zbiór wszystkich obliczeń pozwala na wykonanie wykresu pantokaren. Dokładność tej metody jest mniejsza niż metody Kryłowa-Dargniesa.

8.4. Wpływ przemieszczenia ładunku na stateczność okrętu



Rys. 8.18

Rozpatrzymy tu przemieszczenia ciężaru w płaszczyźnie poprzecznej yz, które może być przyczyną przechylenia okrętu. Przyjmijmy, że masa m wchodząca w skład masy okrętu M, a która znajdowała się w punkcie $A_1(y_1,z_1)$, została przesunięta do punktu $A_2(y_2,z_2)$. Przemieszczenie tej masy można rozłożyć na dwie składowe: na przemieszczenie pionowe $\triangle z = z_2 - z_1$, i na przemieszczenie poprzeczne $\triangle y = y_2 - y_1$. Pionowe przemieszczenie masy do punktu A_1' (rys. 8.18) powoduje równoległe przemieszczenie środka ciężkości całego okrętu z punktu G do punktu G_1 czyli $\overline{GG_1} \parallel \overline{A_1 A_1'}$. Stosunek przemieszczeń jest odwrotnie proporcjonalny do ich mas

$$\frac{\overline{G\,G_1}}{\overline{A_1\,A_1'}} = \frac{m}{M},$$

czyli

$$\overline{GG_1} = \triangle Z_G = \frac{m}{M}(Z_2 - Z_1). \qquad (8.52)$$

Pozostałe charakterystyczne punkty, jak środek wyporu F i metacentrum M, nie zmieniają swojego położenia. Pod wpływem zmiany położenia środka ciężkości okrętu zmienia się wysokość metacentryczna, która będzie teraz równa

$$h_{o_1} = h_o - \triangle Z_G = h_o - \frac{m}{M}(Z_2 - Z_1). \qquad (8.53)$$

Jeśli końcowe położenie masy m leży teraz powyżej swego pierwotnego położenia, to wysokość metacentryczna zmniejszy się. Pionowa zmiana położenia środka ciężkości okrętu ma także wpływ na krzywą ramion prostują-

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°/₀

cych. Poprawka będzie dodatnia lub ujemna w zależności od kierunku przemieszczenia masy m. Nowe ramię prostujące będzie

$$l_1 = l - \Delta z_G \sin\phi \ . \qquad (8.54)$$

Jeśli okręt przed przesunięciem masy wewnątrz kadłuba pływał w położeniu wyprostowanym, to położenie statku nie ulegnie zmianie, o ile wysokość metacentryczna w dalszym ciągu będzie dodatnia. Natomiast gdy statek pływał już z przechyłem, wówczas kąt przechyłu zmienia się. Statek ma przechył dlatego, że działa na niego moment przechylający M_{px}, więc

$$tg\phi_o = \frac{M_{px}}{M \cdot h_o} \ .$$

Pod wpływem zmiany położenia środka ciężkości okrętu moment M_{px} nie uległ zmianie, zmieniła się tylko wysokość metacentryczna, więc nowy kąt przechyłu będzie zależny od nowej wysokości metacentrycznej

$$\phi_1 = \phi_o \cdot \frac{h_o}{h_{o_1}} \ . \qquad (8.55)$$

Poprzeczne przemieszczenie masy powoduje poprzeczne poziome przemieszczenie środka ciężkości okrętu o wielkości

$$\overline{G_1G_2} = \frac{m}{M}(y_2 - y_1),$$

co powoduje przechylenie okrętu. Należy tu pamiętać, że rzędne z jednej burty są ujemne, a z drugiej dodatnie. Przyjęliśmy, że kąt przechyłu na prawą burtę jest dodatni.

Zgodnie z warunkami równowagi siła ciężaru okrętu musi działać na jednej linii z siłą wyporu. Z trójkąta (rys. 8.18) $G_1G_2M_o$ kąt ϕ przechyłu jest równy

$$tg\phi_1 = \frac{\overline{G_1G_2}}{\overline{M_oG_1}} = \frac{m(y_2 - y_1)}{M \cdot h_{o_1}} \ . \qquad (8.56)$$

Ten sam wynik uzyskamy z warunku równowagi momentów

$$M_{px} + M_{w\phi} = 0.$$

Moment przechylający

$$M_{px} = m \cdot \overline{A_1'A_2} \cos\phi = m(y_2 - y_1)\cos\phi \ ,$$

a moment prostujący

$$M_{w\phi} = - M \cdot h_{o_1} \cdot \sin\phi \ ,$$

więc kąt przechyłu

$$tg\phi = \frac{m(y_2 - y_1)}{M \cdot h_{o_1}} \ . \qquad (8.57)$$

Przy większych kątach przechyłu zadanie to rozwiążemy wykreślnie przez wyznaczenie punktu przecięcia się krzywej ramienia przechylającego

$$l_{px} = \frac{m}{M}(y_2 - y_1)\cos\phi \qquad (8.58)$$

z krzywą ramion prostujących.

Przy przesuwaniu ciężaru w płaszczyźnie poprzecznej należy więc najpierw poprawić ramię stateczności okrętu przez obliczenie pionowej zmiany środka ciężkości okrętu, a dopiero potem wyznaczyć przechył okrętu pod wpływem poziomego przesunięcia ładunku.

Gdy masa m przesunięta została także w kierunku osi x, spowoduje to przegłębienie okrętu. Należy wówczas zastosować wzory podane w rozdziale 7.

8.5. Wpływ przyjęcia lub zdjęcia ładunku na stateczność

Wzór na poprzeczną wysokość metacentryczną po przyjęciu na statek dodatkowej masy m będzie odpowiadał wzorowi (7.51) na podłużną wysokość metacentryczną, wraz z przyjętym tam wyprowadzeniem. Zastosujemy tu teraz nieco inne podejście, prowadzące do tego samego wyniku. Załóżmy też, że przyjęty ładunek m jest mały (do 10% masy okrętu M). Pod wpływem przyjęcia ładunku w punkcie o współrzędnych y i z wszystkie interesujące nas charakterystyczne punkty zmieniają swoje położenia. Ponieważ zmienia się zanurzenie okrętu, zmienia się położenie środka wyporu F i punktu metacentrycznego M, zmienia się także środek ciężkości okrętu G. Zmiana więc wysokości metacentrycznej będzie równa

$$\Delta h_o = \Delta Z_F + \Delta r_o - \Delta Z_G, \qquad (8.59)$$

gdzie

$$\Delta Z_F = Z_{F_1} - Z_F; \quad \Delta r_o = r_1 - r_o; \quad \Delta Z_G = Z_{G_1} - Z_G.$$

Indeksem „1" oznaczono odpowiednio rzędną środka wyporu, promień metacentryczny i rzędną środka ciężkości okrętu po przyjęciu na okręt masy m.

Obliczmy zmiany poszczególnych składników wysokości metacentrycznych. Zmiana rzędnej środka wyporu odpowiada różnicy ilorazu momentu statycznego objętości przez wyporność

$$\Delta Z_F = \frac{1}{V_1}\int_{V_1} z\,dV - \frac{1}{V}\int_{V} z\,dV .$$

Masa m spowoduje przyrost objętości kadłuba $\Delta V = \frac{m}{\rho}$, co wiąże się ze zmianą zanurzenia

$$\Delta T = \frac{m}{\rho S_{wl}} .$$

Ponieważ masa m jest mała, można więc z kolei przyjąć, że w obrębie zmiany zanurzenia burty statku są pionowe i środek objętości dodatkowej

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

warstwy ΔV będzie znajdować się w połowie zmiany zanurzenia ΔT. Zmiana położenia środka wyporu jest więc równa

$$\Delta Z_F = \frac{1}{V+\Delta V}\left[\int_V z dV + \Delta V\left(T + \frac{\Delta T}{2}\right)\right] - \frac{1}{V}\int_V z dV .$$

Po przekształceniach otrzymamy

$$\Delta Z_F = \frac{\Delta V}{V+\Delta V}\left(T + \frac{\Delta T}{2} - Z_F\right) = \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} - Z_F\right). \qquad (8.60)$$

Zmiana promienia metacentrycznego jest równa

$$\Delta r_o = \frac{J_{x_1}}{V_1} - \frac{J_x}{V} = \frac{J_x + \Delta J_x}{V+\Delta V} - \frac{J_x}{V} = \frac{\Delta V}{V+\Delta V}\left(\frac{\Delta J_x}{\Delta V} - r_o\right)$$

lub

$$\Delta r_o = \frac{m}{M+m}\left(\rho_B - r_o\right). \qquad (8.61)$$

Zmiana położenia środka ciężkości okrętu

$$\Delta Z_G = \frac{1}{M+m}\sum_i (m_i z_i + mz) - \frac{1}{M}\sum_i m_i z_i ,$$

a po przekształceniach

$$\Delta Z_G = \frac{m}{M+m}(z - Z_G). \qquad (8.62)$$

Uwzględniając obliczone składniki zmiana wysokości metacentrycznej będzie równa

$$\Delta h_o = \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} - Z_F + \rho_B - r_o - z + Z_G\right) = \qquad (8.63)$$

$$= \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - z - h_o\right),$$

a nowa wysokość metacentryczna po przyjęciu ładunku o masie m

$$h_{o_1} = h_o + \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - z - h_o\right). \qquad (8.64)$$

Zanurzenie T i wysokość metacentryczna h_o dotyczą stanu przed przyjęciem ładunku; z jest rzędną środka ciężkości masy m, licząc od płaszczyzny podstawowej; ρ_B jest promieniem krzywej środków ciężkości wodnic. Przez analogię do wzoru (7.24) dla przegłębień promień ten jest równy

$$\rho_B = \frac{dJ_x}{dV} = \frac{\Delta J_x}{\Delta V} = \frac{\Delta J_x}{S_{wL}\cdot\Delta z} . \qquad (8.65)$$

Promień ρ_B można też obliczyć wzorem przybliżonym

$$\rho_B \approx r_o(1 - \varkappa)(1 - \frac{\varkappa m}{2M}). \qquad (8.66)$$

lub $\rho_B \approx 0{,}015 \frac{B^2}{T\delta}$. (8.66a)

Gdy statek w obrębie zmiany zanurzenia posiada burty pionowe, wówczas $\rho_B = 0$ i wzór na h_o przyjmuje postać

$$h_{o_1} = h_o + \frac{m}{M+m}(T + \frac{\Delta T}{2} - z - h_o). \qquad (8.67)$$

W przypadku zdjęcia ładunku masa m jest ujemna.

Wzór (8.64) służy do wyznaczania wysokości metacentrycznej okrętu po przyjęciu lub zdjęciu niewielkiego ładunku, co z kolei jest przydatne do obliczenia kąta przechyłu w zakresie do około 10^o, gdy zadziała moment przechylający M_{px}. Wzór ten ma także zastosowanie przy rozpatrywaniu problemu balastowania okrętu, tzn. wyznaczenia, ile ton balastu należy przyjąć w dolne części kadłuba, aby powiększyć wysokość metacentryczną do żądanej wartości lub wyrównać przechył. Wysokość metacentryczna pod wpływem przyjęcia masy m powiększy się, gdy spełniony będzie warunek

$$T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - z - h_o > 0,$$

czyli masa m winna być ulokowana na statku na wysokości

$$z < T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - h_o. \qquad (8.68)$$

Gdy ten warunek nie będzie spełniony, wysokość metacentryczna h_{o_1} zmniejszy się w stosunku do h_o. Przy zdjęciu ładunku znak nierówności będzie odwrotny.

Gdy przyjęty (lub zdjęty) ładunek jest duży, wówczas dokonujemy odczytów z krzywych hydrostatycznych dla zanurzenia odpowiadającego wyporności $V_1 = \frac{M+m}{\rho}$. Nowe położenie środka ciężkości okrętu będzie

$$Z_{G_1} = \frac{M \cdot z_G + mz}{M+m}, \qquad (8.69)$$

a nowa wysokość metacentryczna

$$h_{o_1} = Z_M(V_1) - Z_{G_1}.$$

Dla tej samej wyporności V_1 odczytujemy z pantokaren wartości ramion kształtu l_k. Ramiona prostujące w nowym stanie załadowania będą

$$l = l_k(V_1) - Z_{G_1} \sin \phi .$$

Można więc za pomocą krzywych hydrostatycznych i pantokaren rozwiązywać problemy statecznościowe bez żadnych ograniczeń co do ilości ładunku i kąta przechyłu.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

Przykład 8.1

Statek pływa z przechyłem $\phi = 4^o$ na lewą burtę. Dane są następujące wielkości: L = 150,0 m; B = 23,0 m; T = 7,2 m; $\delta = 0{,}525$; $\alpha = 0{,}630$; $\rho_B = 1{,}66$ m; $h_o = 0{,}25$ m, gęstość wody $\rho = 1{,}025$ t/m^3. Obliczyć, jaki należy przyjąć balast w dno podwójne w punkcie o współrzędnych y = 5,5 m i z = 0,6 m, aby zrównoważyć przechył okrętu.

Rozwiązanie

Przyjęty na prawą burtę balast ma wytworzyć moment, który przechyli statek o kąt 4^o od $\phi = -4^o$ do $\phi = 0^o$. Pod wpływem przyjęcia masy m zmieni się masa okrętu i wysokość metacentryczna. Podstawą rozwiązania zadania jest wzór (8.23) w połączeniu ze wzorem (8.64).

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{m \cdot y}{(M+m)h_{o_1}},$$

gdzie: $\operatorname{tg}\phi = \operatorname{tg} 4^o$,

$$M = \varepsilon \rho \delta LBT = 1{,}03 \cdot 0{,}525 \cdot 150 \cdot 23 \cdot 7{,}2 = 13432 \text{ t},$$

$$h_{o_1} = h_o + \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{m}{2\rho\alpha LB} - z - \rho_B - h_o\right) =$$

$$= 0{,}25 + \frac{m}{13432+m}\left(7{,}2 + \frac{m}{2 \cdot 1{,}025 \cdot 0{,}63 \cdot 150 \cdot 23} - 0{,}6 - 1{,}66 - 0{,}25\right).$$

Niewiadomą wielkością jest masa m. Z rozwiązania równania otrzymujemy ilość wymaganego balastu

$$m = 47{,}7 \text{ t}.$$

8.6. Ładunki ruchome

Zastosowanie wyprowadzonych wzorów lub obliczonej krzywej ramion prostujących do wyznaczenia kąta przechyłu pod wpływem momentu przechylającego ma miejsce tylko wówczas, gdy wszystkie ciężary wewnątrz okrętu są nieruchome. Na statku mogą jednak wystąpić ciężary ruchome. Ich wpływ należy wtedy uwzględnić odpowiednimi poprawkami. Podobnie jak i przy stateczności podłużnej rozpatrzymy tu ciężary podwieszone i płynne.

W ten sam sposób, co wzór (7.61), tylko rozpatrując przechył statku, można wyprowadzić wzór na poprzeczną wysokość metacentryczną przy wystąpieniu podwieszonej masy m na linie o długości l_m

$$h_{o_1} = h_o - \frac{m}{M} \cdot l_m. \qquad (8.70)$$

Poprawka jest więc taka sama, lecz skutek podwieszenia jest tu większy, gdyż poprzeczna wysokość metacentryczna h_o jest znacznie mniejsza od podłużnej wysokości H_o. W przypadku, gdy masa m została przyjęta na statek i znajduje się w stanie podwieszenia, nową wysokość metacentryczną obliczymy wzorem (8.64)

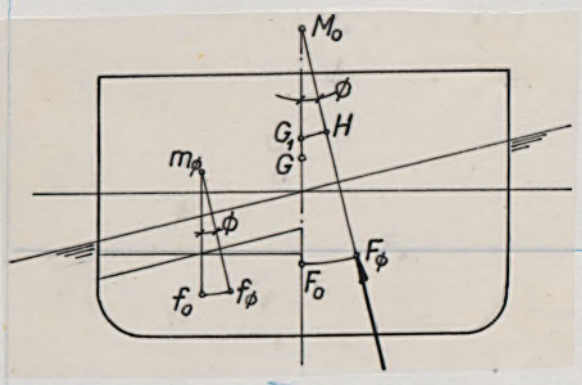
$$h_{o_1} = h_o + \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - z - h_o\right)$$

z tym, że za rzędną z należy przyjmować odległość pionową od płaszczyzny podstawowej do punktu zaczepienia liny lub punktu obrotu przyjętej masy. Przy stateczności poprzecznej mogą wystąpić większe wychylenia okrętu, stąd poprawkę należy wprowadzić i do krzywej ramion. Nowa krzywa ramion będzie

$$l = l_k - (Z_G + \frac{m l_m}{M})\sin\phi = l - \frac{m}{M} l_m \sin\phi \,, \qquad (8.71)$$

co jest równoznaczne z podwyższeniem środka ciężkości okrętu G, podobnie jak i przy obliczaniu h_o.

Niekorzystny wpływ na stateczność okrętu mają też swobodne powierzchnie, które występują przy niepełnych zbiornikach. I tu wpływ tych powierzchni jest wielokrotnie większy niż ma to miejsce przy stateczności podłużnej, i nie można go pomijać. Wraz z przechyłem okrętu - przy założeniu, że statek przechyla się bardzo wolno i $\ddot{\phi} = \dot{\phi} \approx 0$ - swobodna powierzchnia płynu jest zawsze równoległa do powierzchni wody zaburtowej. Wraz z przechyłem zmienia się kształt płynu w zbiorniku, a środek ciężkości płynu przemieszcza się z punktu f_o do punktu f_ϕ po krzywej f. Przez analogię do kształtu kadłuba okrętu (rys. 8.19) krzywa f ma promień $r_{p\phi}$ i środek krzywizny m_ϕ. Promień ten jest równy



Rys. 8.19

$$\overline{fm}_\phi = r_{p\phi} = \frac{i_{\xi\phi}}{\vartheta} \,, \qquad (8.72)$$

gdzie $i_{\xi\phi}$ jest momentem bezwładności swobodnej powierzchni płynu w zbiorniku względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości tej powierzchni. Dla małych kątów przechyłu

$$r_{p_o} = \frac{i_x}{\vartheta} \qquad (8.73)$$

ϑ jest objętością płynu w zbiorniku.

Pod wpływem przechyłu i przemieszczenia płynu wystąpi tu ramię siły ciężkości tego płynu $l_{p\phi}$ (rys. 8.20) w stosunku do położenia pierwotnego. Zależy ono przede wszystkim od kształtu zbiornika i jest równe

$$l_{p\phi} = y_p \cos\phi + z_p \sin\phi \,, \qquad (8.74)$$

gdzie y_p i z_p są współrzędnymi środka ciężkości płynu przy przechyle ϕ, gdy początek układu znajduje się w punkcie f_o. Współrzędne te wy-

8. 11. 1984
B-5
33%

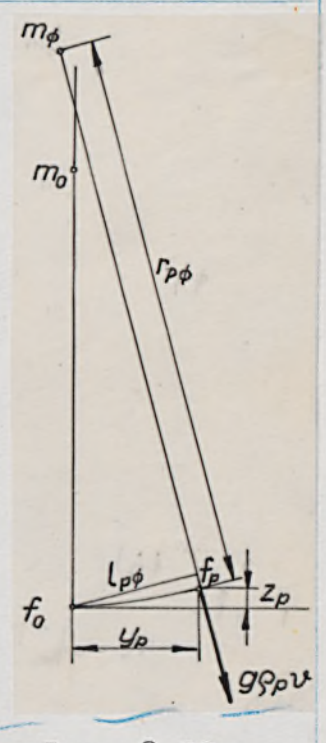
znaczyć można zgodnie z zasadami podanymi w rozdziale 4 lub wykorzystać można metodę Kryłowa-Dargniesa. Mając promienie $r_{p\phi}$ współrzędne środka ciężkości płynu obliczymy z zależności

$$y_p = \int_0^{\phi} r_{p\phi} \cos\phi \, d\phi, \qquad z_p = \int_0^{\phi} r_{p\phi} \sin\phi \, d\phi.$$

Gdy zadziała moment przechylający M_{px}, statek będzie w równowadze, gdy suma momentów jest równa zero, więc

$$M_{w\phi} + M_{pł} + M_{px} = 0. \qquad (8.75)$$

Moment prostujący jest równy - D1, a moment pochodzący od przemieszczenia płynu



Rys. 8.20

$$M_{pł} = pl_{p\phi} = g \rho_p \vartheta l_{p\phi}.$$

W przypadku gdy istnieje kilka zbiorników ze swobodnymi powierzchniami, wtedy

$$M_{pł} = g \sum_i \rho_{p_i} \vartheta_i \, l_{p_i\phi}, \qquad (8.76)$$

gdzie ρ_{p_i} jest gęstością płynu w i-tym zbiorniku.

Przy wprowadzeniu poszczególnych składników do równania (8.75) i podzieleniu przez wyporność równowaga okrętu wystąpi, gdy

$$1 - \frac{\sum \rho_{p_i} \vartheta_i \, l_{p_i\phi}}{\rho V} = l_p. \qquad (8.77)$$

Lewa strona równania przedstawia ramię stateczności statycznej z poprawką $\Delta 1$ na swobodną powierzchnię płynu w zbiorniku, a prawa strona ramię przechylające. Dla małych kątów przechyłu

$$l_{p\phi} = r_{p\phi} \sin\phi = \frac{i_x}{\vartheta} \sin\phi, \qquad (8.78)$$

więc moment prostujący z uwzględnieniem swobodnej powierzchni

$$M_{w_1\phi} = - Dh_o \sin\phi + g\left(\sum_i \rho_{p_i} \cdot i_{x_i}\right)\sin\phi =$$

$$= -D\left(h_o - \frac{1}{\rho V} \sum_i \rho_{p_i} \cdot i_{x_i}\right)\sin\phi,$$

tzn. poprawka na wysokość metacentryczną wynosi

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$$\Delta h_o = -\frac{1}{\rho V} \sum_i \rho_{p_i} \cdot i_{x_i} \qquad (8.79)$$

i zależy ona tylko od momentów bezwładności swobodnych powierzchni i od gęstości płynów w zbiornikach.

Ujemny wpływ swobodnych powierzchni na stateczność okrętu można zmniejszyć przez zmniejszenie momentu bezwładności i_x, a to zależy przede wszystkim od szerokości zbiornika. Po przedzieleniu zbiornika w środku grodzią wzdłużną wpływ swobodnych powierzchni maleje 4-krotnie; gdy zbiornik podzielimy grodziami wzdłużnymi na trzy równe części, wpływ ten zmniejszy się 9-krotnie. Dlatego zbiorniki okrętowe na ładunki płynne nie rozciągają się od burty do burty, lecz przedzielone są jedną lub dwiema grodziami wzdłużnymi.

Uwzględnienie wpływu swobodnych powierzchni na wysokość metacentryczną nie jest skomplikowane. Każdy zbiornik w położeniu wyprostowanym okrętu winien mieć tylko obliczony centralny moment bezwładności swojej powierzchni względem osi wzdłużnej. Zestawienie tych momentów na planie ładunkowym lub w informacji o stateczności ułatwi obliczenie poprawek w zależności od zbiorników, w których swobodna powierzchnia wystąpi. Gdy przyjmujemy na statek ładunek płynny i zbiornik nie jest całkowicie zapełniony, wysokość metacentryczną obliczyć należy wg wzoru (8.64) wraz z poprawką (8.79), czyli

$$h_{o_1} = h_o + \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \rho_B - z - h_o\right) - \frac{1}{M+m}\sum \rho_{p_i} \cdot i_{x_i} \qquad (8.80)$$

lub można zastosować tylko wzór (8.64), lecz za z należy przyjąć wartość

$$z = z_f + \frac{i_x}{\vartheta},$$

co odpowiada przyjęciu płynu na wysokości m_ϕ.

Bardziej skomplikowane są obliczenia wpływu swobodnych powierzchni na ramiona prostujące, gdyż przy dużych kątach przechyłu moment bezwładności pola $i_{\xi\phi}$ zależy również od stopnia zapełnienia zbiornika. Największy jest wpływ swobodnej powierzchni, gdy zbiornik jest zapełniony w 50%, a kąt przechyłu $\phi = 30^\circ$. Dlatego dla uproszczenia obliczeń IMO (International Maritime Organization) [13] zaleca stosowanie wzoru przybliżonego, który daje maksymalną poprawkę. Moment pochodzący od swobodnej powierzchni jest tu równy

$$M_{pł} = c\,\rho_p\, b\,\vartheta\sqrt{\delta}, \qquad (8.81)$$

gdzie: c – bezwymiarowy współczynnik podany w tabeli 8.1, zależny od stosunku b/h i kąta przechyłu ϕ;
ρ_p – gęstość płynu w zbiorniku, t/m^3;
b – maksymalna szerokość zbiornika, m;
ϑ – całkowita pojemność zbiornika, m^3;

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

$\delta = \frac{v}{l \cdot b \cdot h}$ - współczynnik pełnotliwości zbiornika;

l,h - maksymalna długość i wysokość zbiornika.

Dla małych zbiorników, które spełniają nierówność

$$c \rho_p b v \sqrt{\delta} < 0{,}01 \rho V_{min}, \qquad (8.82)$$

gdzie c przyjmuje się dla $\phi = 30^o$, a ρV_{min} jest minimalną wyporno-ścią masową statku, poprawki nie stosuje się.

Tabela 8.1

Bezwymiarowy współczynnik uwzględniający wpływ swobodnej powierzchni w zbiorniku

b/h \ ϕ^o	10	20	30	40	50	60	70	80	90
20	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01
10	0,11	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05	0,03	0,01
5	0,07	0,11	0,11	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03
3	0,04	0,09	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06	0,04
2	0,03	0,06	0,09	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06
1,5	0,02	0,05	0,07	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,08
1	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,13
0,75	0,01	0,02	0,04	0,05	0,08	0,12	0,15	0,16	0,17
0,5	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,09	0,16	0,21	0,25
0,3	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,11	0,27	0,42
0,2	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,07	0,27	0,63
0,1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,14	1,25

Przykład 8.2

Boja w postaci walca o średnicy d = 0,70 m ma masę M = 250 kg i rzędną środka ciężkości z_G = 1,0 m od dna. Ile należy wlać wody do wnętrza, aby boja pływała w pozycji pionowej? Założyć, że grubość ścia-nek w stosunku do wymiarów walca jest pomijalnie mała. Gęstość wody ρ = 1015 kg/m^3.

Rozwiązanie:

Walec będzie pływać w pozycji wyprostowanej, gdy wysokość metacentrycz-na wraz z uwzględnieniem swobodnej powierzchni będzie większa od zera, czyli

$$h_o = z_F + r_o - z_G - \frac{i_x}{V} \geqslant 0.$$

Jeśli pominąć grubość poszycia walca, moment bezwładności pola wodnicy jest równy momentowi bezwładności swobodnej powierzchni, więc powyższy warunek sprowadza się do warunku

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33°/₀

$$z_F - z_G \geqslant 0,$$

aby środek wyporu znajdował się nad środkiem ciężkości. Rzędna środka wyporu po przyjęciu masy $m = \varrho hS$, gdzie h jest wysokością wody w naczyniu, a $S = \frac{\pi d^2}{4}$, będzie

$$z_F = \frac{T}{2} \quad \text{gdzie} \quad T = \frac{M+m}{\varrho S} = \frac{M+\varrho hS}{\varrho S},$$

a rzędna środka ciężkości

$$z_{G_1} = \frac{M \cdot z_G + m\frac{h}{2}}{M+m}.$$

Więc nierówność ma postać

$$\frac{M+\varrho hS}{2\varrho S} - \frac{M z_G + \frac{1}{2}\varrho h^2 S}{M+\varrho hS} \geqslant 0,$$

z której obliczymy, do jakiej wysokości należy wlać do wnętrza wody

$$h = z_G - \frac{M}{2\varrho S} = z_G - \frac{2M}{\varrho \pi d^2} = 1 - \frac{2 \cdot 250}{1015 \cdot \pi \cdot 0{,}7^2} = 0{,}68 \text{ m}$$

lub

$$m = \varrho hS = 1015 \cdot 0{,}68 \; \frac{\pi \cdot 0{,}7^2}{4} = 266 \text{ kg wody zaburtowej.}$$

8.7. Okręt o burtach pionowych

Przyjmijmy, że mamy okręt lub ponton o burtach pionowych, tzn. że burty okrętu wzdłuż całej długości L są prostopadłe do wodnicy W_o. Dla tej wodnicy wyporność okrętu jest V, a moment bezwładności pola tej wodnicy względem osi wzdłużnej J_x. Znane jest też położenie środka ciężkości okrętu wzwyż $a = z_G - z_F$. Rozpatrzymy tu tylko zmianę momentu prostującego w granicach kąta przechyłu od 0 do ϕ_1, co odpowiada wejściu pokładu do wody albo wynurzeniu obła z wody w zależności od tego, co wystąpi wcześniej. W tym zakresie kątów przechyłu wszystkie wodnice równoobjętościowe przecinają się w płaszczyźnie symetrii okrętu i promień $\varrho_B = 0$. Wodnice przechylonego statku są więc w całym zakresie rozpatrywanych kątów przechyłu symetryczne, ich rzędne $\eta_1 = \eta_2 = \frac{y}{\cos\phi}$. Moment bezwładności pola wodnicy względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy jest równy

$$J_{\xi\phi} = J_{x\phi} = \frac{2}{3}\int_L \frac{y^3}{\cos^3\phi}\,dx = \frac{J_x}{\cos^3\phi},$$

stąd promień metacentryczny dla statku przechylonego

$$r_\phi = \frac{J_{\xi\phi}}{V} = \frac{J_x}{V \cdot \cos^3\phi} = \frac{r_o}{\cos^3\phi}$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS
B-5
33%

jest funkcją kąta przechyłu ϕ . Współrzędne środka wyporu w układzie o początku w F_o są równe

$$y = \int_0^{\phi_1} r_\phi \cos\phi \, d\phi = r_o \int_0^{\phi_1} \frac{d\phi}{\cos^2\phi} = r_o \operatorname{tg}\phi \ ,$$

$$z = \int_0^{\phi_1} r_\phi \sin\phi \, d\phi = r_o \int_0^{\phi_1} \frac{\sin\phi \, d\phi}{\cos^3\phi} = \frac{1}{2} r_o \operatorname{tg}^2\phi \ ,$$

więc ramię prostujące

$$l = y\cos\phi + z\sin\phi - a\sin\phi = r_o \operatorname{tg}\phi\cos\phi + \frac{1}{2} r_o \operatorname{tg}^2\phi \sin\phi - a\sin\phi,$$

$$l = (h_o + \frac{1}{2} r_o \cdot \operatorname{tg}^2\phi)\sin\phi \ , \qquad (8.83)$$

ponieważ $h_o = r_o - a$,

a równanie krzywej środków wyporu ma postać

$$z = \frac{y^2}{2 r_o} \ .$$

Ze wzoru 8.83 widać, kiedy wystarczającym przybliżeniem jest wzór metacentryczny (8.11), a kiedy należy przyjąć drugi człon wzoru. Dokładność stosowania wzoru metacentrycznego zależy nie tylko od kąta przechyłu, ale i od stosunku wysokości metacentrycznej do promienia metacentrycznego $\frac{h_o}{r_o}$. Np. gdy wysokość metacentryczna jest mała i stosunek ten wynosi $\frac{h_o}{r_o} = 0{,}1$, to już przy kącie przechyłu $\phi = 4{,}5^o$ różnica między ramieniem prostującym określonym wzorem (8.83) i wzorem metacentrycznym wynosi 3%, a przy $\phi = 20^o$ przekracza nawet 60%. Przy dużej wartości wysokości metacentrycznej, np. $\frac{h_o}{r_o} = 1$, różnica przy kącie $\phi = 20^o$ wynosi dopiero 3%. Dlatego przyjęcie małego kąta przechyłu czy dużego kąta przechyłu, dla którego możemy lub nie możemy stosować wzoru metacentrycznego, jest pojęciem względnym i zależy także od stosunku $\frac{h_o}{r_o}$. Przy większych wartościach tego stosunku powiększa się zakres stosowalności wzoru metacentrycznego.

Wzór (8.83) został wyprowadzony dla statku o burtach pionowych, może on mieć jednak również zastosowanie dla statków towarowych posiadających wstawkę cylindryczną. Dokładność tego wzoru będzie lepsza niż wzoru metacentrycznego, szczególnie gdy h_o jest małe.

Rozpatrując statek o burtach pionowych można podać analityczne wyrażenia na współrzędne punktu metacentrycznego. Rzędna metacentrum równa się

$$Z_M = z + r_\phi \cos\phi = \frac{1}{2} r_o \operatorname{tg}^2\phi + \frac{r_o \cos\phi}{\cos^3\phi} = \frac{r_o(\sin^2\phi + 2)}{2\cos^2\phi}$$

lub po przekształceniach $Z_M = r_o \left(1 + \frac{3}{2} \operatorname{tg}^2\phi\right)$, (8.84)

stąd widać, że $Z_M > r_o$ dla układu współrzędnych o początku w F_o.

Odcięta metacentrum

$$y_M = y - r_\phi \sin\phi = r_o \operatorname{tg}\phi - \frac{r_o \sin\phi}{\cos^3\phi} = - r_o \operatorname{tg}^3\phi < 0, \qquad (8.85)$$

czyli punkt M znajduje się, w stosunku do płaszczyzny symetrii, po wynurzającej się stronie okrętu. Współrzędne metacentrum świadczą, że okręt taki jest pod względem statecznościowym bardzo korzystny. Eliminując z wyrażeń na współrzędne punktu M kąt ϕ otrzymamy równanie ewoluty metacentrycznej

$$Z_M = r_o \left[1 + \frac{3}{2}\left(\frac{y_M}{r_o}\right)^{3/2}\right], \qquad (8.86)$$

które to równanie w starszej literaturze okrętowej występuje pod nazwą paraboli „semikubicznej".

Dodatkowa stateczność kształtu ma tu wartość

$$\Delta l_k = l - h_o \sin\phi = \frac{1}{2} r_o \operatorname{tg}^2\phi \sin\phi \qquad (8.87)$$

Wyrażeniem analitycznym można też tu wyrazić uogólnioną wysokość metacentryczną. Ponieważ ramię prostujące jest równe

$$l = y\cos\phi + z\sin\phi - a\sin\phi,$$

więc uogólniona wysokość metacentryczna

$$h_\phi = \frac{dl}{d\phi} = \frac{dy}{d\phi}\cos\phi - y\sin\phi + \frac{dz}{d\phi}\sin\phi + z\cos\phi - a\cos\phi .$$

Podstawiając za y i z obliczone wyrażenia, po przekształceniach otrzymamy

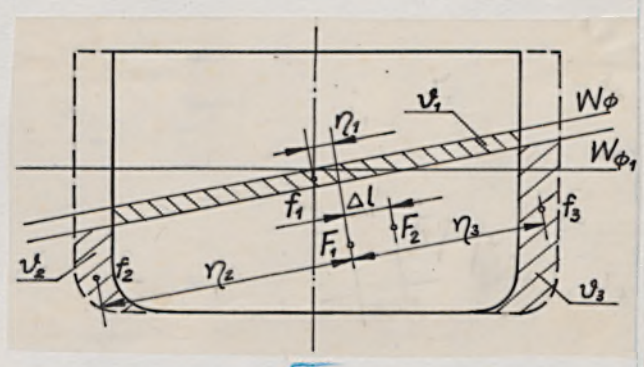
$$h_\phi = \frac{r_o}{\cos^3\phi} - \frac{1}{2} r_o \operatorname{tg}\phi \sin\phi - a\cos\phi . \qquad (8.88)$$

Wyprowadzone tu wzory są ważne do momentu wejścia pokładu do wody lub wyjścia obła z wody. Są ścisłe dla okrętu o burtach pionowych wzdłuż całej jego długości. Do orientacyjnych obliczeń wzory te mogą być też wykorzystane dla typowych morskich statków towarowych.

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/83
B-5
33%

8.8. Wpływ kształtu kadłuba na krzywą ramion prostujących

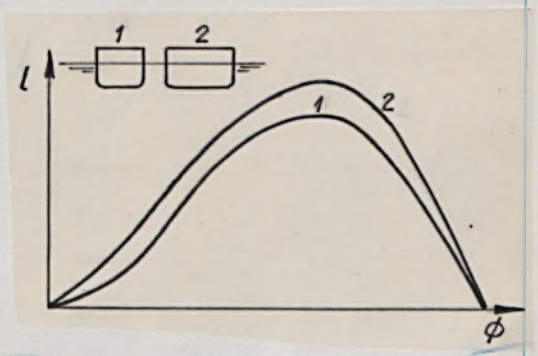
Na rys. 8.21 linią ciągłą przedstawiono kształt podstawowy, zaś linią przerywaną - kadłub okrętu z poszerzoną szerokością, tzn. wszystkie rzędne wodnic zostały powiększone w tym samym stosunku. Zachowując tę samą wyporność przyrost szerokości powoduje zmniejszenie zanurzenia. Należy jednak pamiętać, że poszerzenie kadłuba zwiększy ciężar ze względu na dodatkowy ciężar elementów konstrukcyjnych. Przyjmijmy, że v_1 jest ubytkiem wyporności między wodnicami W_ϕ i W_{ϕ_1}, v_2 jest dodatkową wypornością po stronie wynurzonej, v_3 - po stronie zanurzonej, a środki tych objętości są odpowiednio w punktach f_1, f_2 i f_3. Jak widać z rys. 8.21, większa część przyrostu objętości znajduje się po stronie zanurzonej, więc środek wyporu poszerzonego kadłuba będzie bardziej oddalony od płaszczyzny symetrii w kierunku strony zanurzonej niż ma to miejsce dla statku węższego [4]. Ten przyrost przesunięcia środka wyporu, odpowiadający przyrostowi ramienia kształtu, jest równy



Rys. 8.21

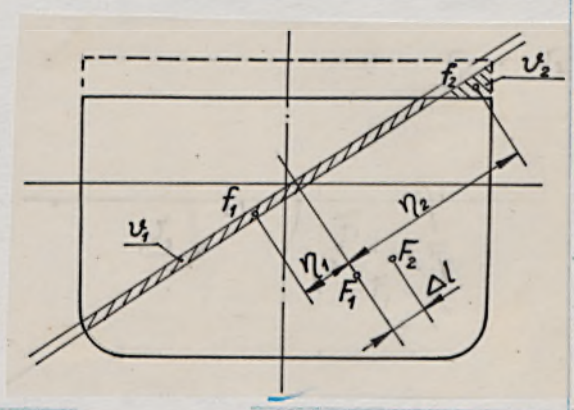
$$\Delta 1 = \frac{1}{V} (v_3 \cdot \eta_3 - v_2 \cdot \eta_2 + v_1 \cdot \eta_1). \qquad (8.89)$$

Poszerzenie wodnicy pływania wpływa też bardzo znacznie na początkową wysokość metacentryczną, powiększa maksymalną wartość ramienia prostującego, lecz ma bardzo niewielki wpływ na zakres krzywej ramion (rys. 8.22).



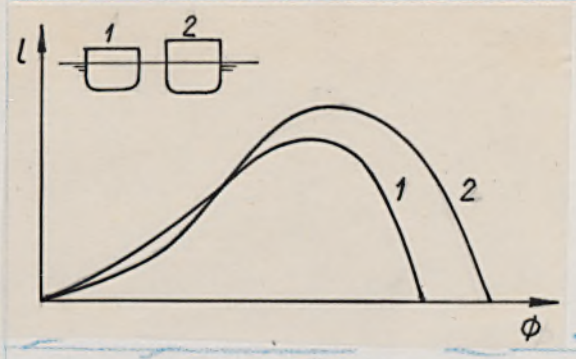
Rys. 8.22

Wpływ zwiększonej wysokości bocznej zaznacza się dopiero po wejściu pokładu do wody (rys. 8.23). Środek wyporu statku o wyższej wysokości bocznej jest także bardziej odsunięty od płaszczyzny symetrii okrętu niż ma to miejsce przy statkach o mniejszej wysokości. Przez zanurzenie się dodatkowej objętości uzyskanej przez podniesienie burty wyporność przy przechyle zmniejszy się o objętość v_1. Zwiększenie ramienia kształtu w stosunku do kształtu podstawowego jest równe

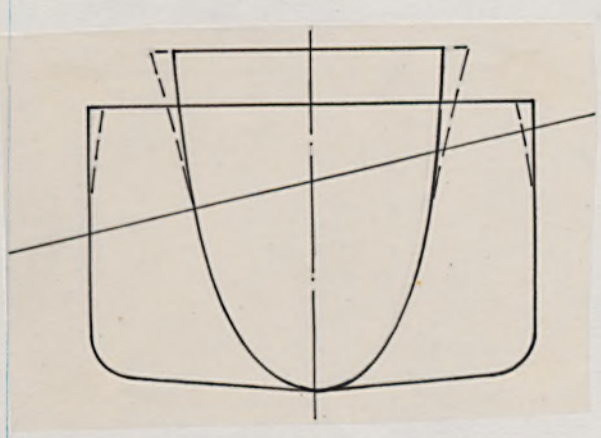


Rys. 8.23

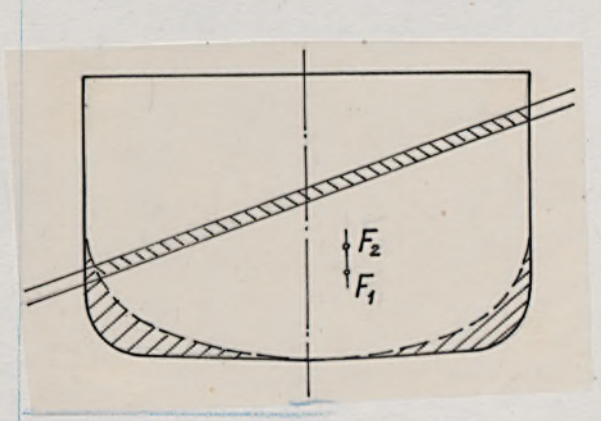
$$\Delta 1 = \frac{1}{V} (v_2 \cdot \eta_2 - v_1 \cdot \eta_1). \qquad (8.90)$$



Rys. 8.24



Rys. 8.25

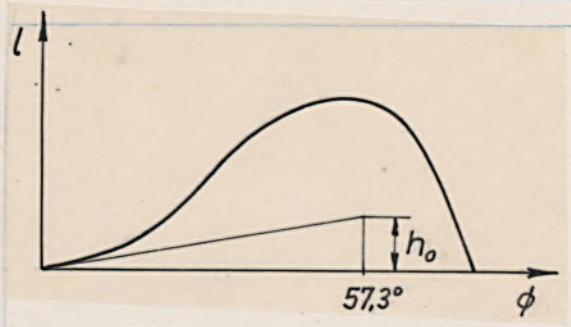


Rys. 8.26

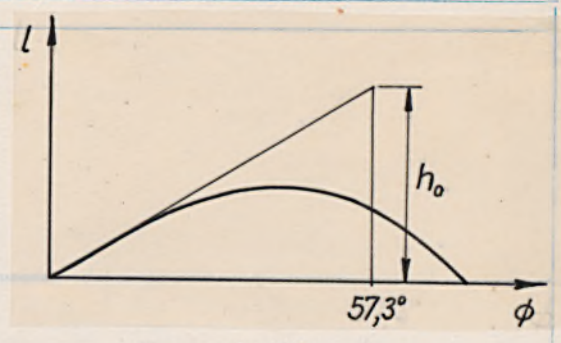
Powiększenie wysokości bocznej wpływa też na powiększenie ciężaru kadłuba i podniesienie położenia środka ciężkości okrętu. W sumie podniesienie wysokości bocznej w początkowym zakresie krzywej ramion obniża ją ze względu na podniesienie się środka ciężkości okrętu. Powiększenie krzywej ramion zaznacza się od momentu zanurzenia się pokładu do wody. Zwiększa się maksymalna rzędna krzywej ramion - maksimum to występuje teraz przy większym kącie przechyłu, powiększa się także zakres krzywej ramion (rys. 8.24).

Rozchylenie wręgów w skrajnych częściach kadłuba, jak również pochylenie burt do wewnątrz (rys. 8.25) ma ten sam wpływ na krzywą ramion co zwiększenie lub zmniejszenie szerokości kadłuba. Wpływ ten zaznacza się dopiero przy większych kątach przechyłu, gdy ta zmieniona część kadłuba zanurza się w wodzie. Rozchylenie wręgów ma wpływ korzystny, lecz ze względu na ograniczony zakres tych zmian efekt końcowy jest niewielki. Większy wpływ, lecz w sensie ujemnym, ma pochylenie burt do wewnątrz kadłuba. Te zmiany konstrukcyjne mają wpływ na położenie środka ciężkości okrętu. Zwiększenie kąta podoblenia okrętu, co wiąże się ze zmniejszeniem współczynnika pełnotliwości owręża β, pociąga za sobą, przy zachowaniu tej samej wyporności, zwiększenie zanurzenia i podniesienie położenia środka ciężkości okrętu, gdyż objętość z dolnej części kadłuba jest teraz zrównoważona objętością w obrębie wodnicy. Gdy utracona objętość z obu burt znajduje się przy przechyle pod powierzchnią wody, to środek wyporu nowego kształtu F_2 przesunie się nad punkt F_1 równolegle do płaszczyzny symetrii okrętu, powiększając ramię stateczności kształtu o wielkość $\overline{F_1F_2}\sin\phi$. Gdy utracona objętość przy oble zacznie się pod wpływem przechyłu wynurzać, stateczność okrętu pogarsza się. Pod wpływem podniesienia kąta podoblenia podnosi się także położenie środka ciężkości okrętu. W sumie statki o dużym kącie podoblenia mają krzywą ramion mniej korzystną niż statki o burtach pionowych. Możemy tu wyróżnić dwa podstawowe typy krzywej ramion prostujących przedstawionych na rys. 8.27 i 8.28. Pierwsza z tych krzywych dotyczy statku o stosunkowo

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88 PG
B-5
33%

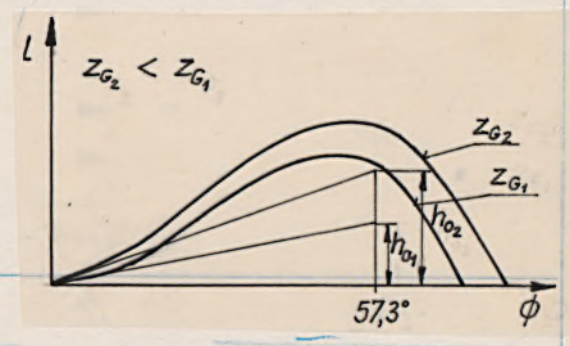


Rys. 8.27



Rys. 8.28

wysokiej wolnej burcie i mającego na znacznej części długości burty pionowe. Jest to bardzo korzystna charakterystyka stateczności owa. Statek ma dobrą stateczność przy dużych kątach przechyłu. Stosunkowo mała stateczność w zakresie początkowym zapewnia duży okres kołysań bocznych, przez co ruch statku na fali jest bardziej łagodny. Taką krzywą ramion mają typowe morskie statki towarowe. Krzywa ramion z rys. 8.28 dotyczy statku o niskiej wolnej burcie lub dużym kącie podoblenia. Taką stateczność mają statki śródlądowe, statki rybackie i holowniki. O stateczności decyduje tu przede wszystkim początkowa wysokość metacentryczna. Gdy statek ma ujemną wysokość metacentryczną, co może wystąpić na statku z ładunkiem drewna na pokładzie, krzywa ramion prostujących będzie jak na rys. 8.7. Uwzględnienie nadbudówek w obliczeniach daje krzywą ramion jak na rys. 8.10, charakteryzującą się dwoma maksimami.



Rys. 8.29

Duży wpływ na krzywą ramion ma obniżenie położenia środka ciężkości okrętu. Powoduje to nie tylko powiększenie ramion, lecz ma wpływ na zwiększenie zakresu krzywej i przesunięcie jej maksimum w kierunku większych kątów przechyłu. Zatem przez odpowiednie rozmieszczenie ładunku załoga może wpływać na polepszenie stateczności statku (rys. 8.29).

8.9. Krzywa ramion okrętu powinowatego

W projektowaniu okrętu występuje często problem, że po wykonaniu już projektu kadłuba konieczna jest zmiana jego wymiarów głównych. Jeśli wszystkie wymiary w kierunku trzech wzajemnie prostopadłych osi zmieniają się w tym samym stosunku, mówimy że nowy kadłub jest geometrycznie podobny w stosunku do kształtu wzorcowego. Natomiast, gdy zmiana wymiarów w każdym kierunku następuje w innym stosunku, otrzymujemy kształt powinowaty. Niech te stosunki będą równe:

$$l = \frac{L}{L_o} \; ; \quad b = \frac{B}{B_o} \; ; \quad t = \frac{T}{T_o} = \frac{H}{H_o}$$

gdzie: L_o, B_o, T_o - wymiary główne statku wzorcowego.

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP

S/242/85PG

W związku z tym każdy wymiar liniowy względem przyjętego układu będzie:

$$x = lx_o \; ; \quad y = by_o \; ; \quad z = tz_o$$

Z kolei niektóre wielkości okrętu powinowatego będą następujące:

wyporność

$$V = lb\ t\ V_o \tag{8.91}$$

poprzeczny moment bezwładności wodnicy

$$J_x = lb^3 J_{x_o} \tag{8.92}$$

mały promień metacentryczny

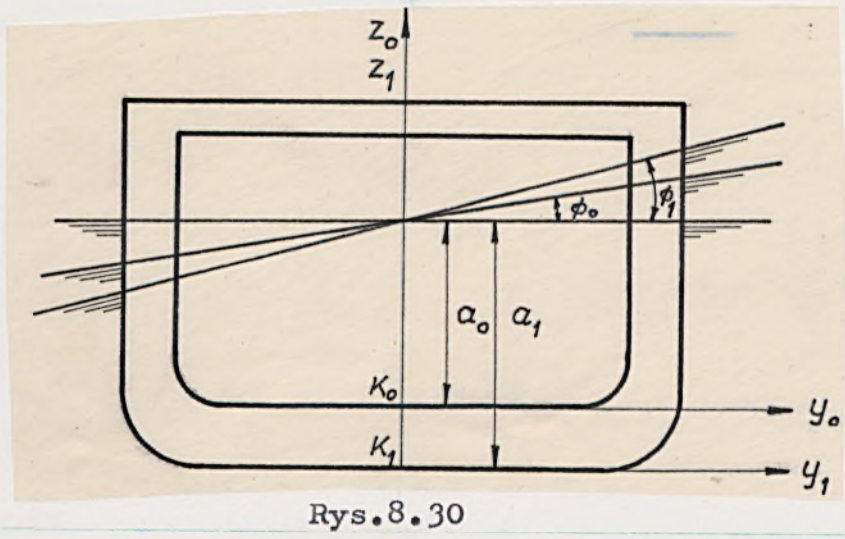
$$r = \frac{b^2}{t}\, r_o \tag{8.93}$$

wzdłużny moment bezwładności wodnicy

$$J_y = l^3 b J_{y_o} \tag{8.94}$$

duży promień metacentryczny

$$R = \frac{l^2}{t}\, R_o \tag{8.95}$$



Rys.8.30

Prócz wyżej wymienionych wielkości dla statku powinowatego inny jest także kąt przechyłu (rys. 8.30). O ile dla statku wzorcowego równanie płaszczyzny wodnicy pływania jest równe:

$$z_o = y_o \operatorname{tg} \phi_o + a_o$$

stąd kąt przechyłu

$$\operatorname{tg} \phi_o = \frac{z_o - a_o}{y_o}$$

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP
S/272/88PG

to dla kształtu geometrycznie powinowatego kąt przechyłu będzie:

$$tg\,\phi_1 = \frac{z_1 - a_1}{y_1}$$

ale ponieważ $z = t \cdot z_o$ i $a = t \cdot a_o$,

więc $$tg\,\phi_1 = \frac{t(z_o - a_o)}{b \cdot y_o} = \frac{t}{b} \cdot tg\,\phi_o \qquad (8.96)$$

Współrzędne środka wyporu statku powinowatego, ale nieprzechylonego i nieprzegłębionego, zmieniają się w sposób liniowy, zależnie od l, b i t. Inaczej to wygląda, gdy statek jest np. przechylony. Jeśli y_o i z_o są współrzędnymi środka wyporu statku przechylonego o kąt ϕ_o, to współrzędne te dla statku powinowatego, przechylonego o kąt ϕ_1 będą:

$$y_1(\phi_1) = b\, y_o(\phi_o)$$
$$z_1(\phi_1) = t\, z_o(\phi_o) \qquad (8.97)$$

stąd nowe wartości krzywej ramion prostujących wyznacza zależność:

$$l_1 = z_1 \sin\phi_1 + y_1 \cos\phi_1 - z_{G_1} \sin\phi_1 \qquad (8.98)$$

Za pomocą tego wzoru można więc także badać w sposób systematyczny wpływ zmian wymiarów głównych na stateczność okrętu.

Jeśli statek jest geometrycznie podobny w stosunku do wzorcowego w skali:

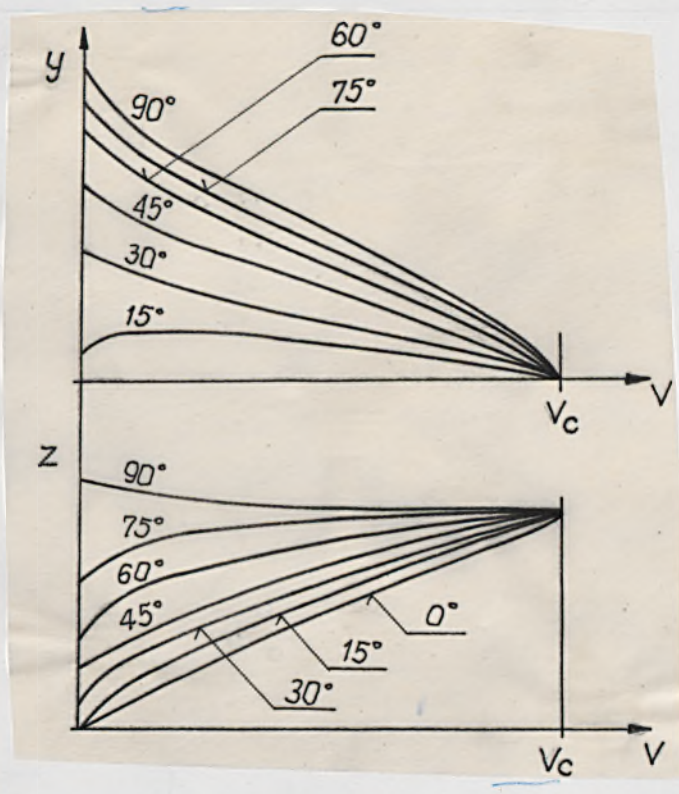
$$\lambda = \frac{L}{L_o} = \frac{B}{B_o} = \frac{T}{T_o}$$

to jego kąt przechyłu $tg\,\phi_1 = tg\,\phi_o$

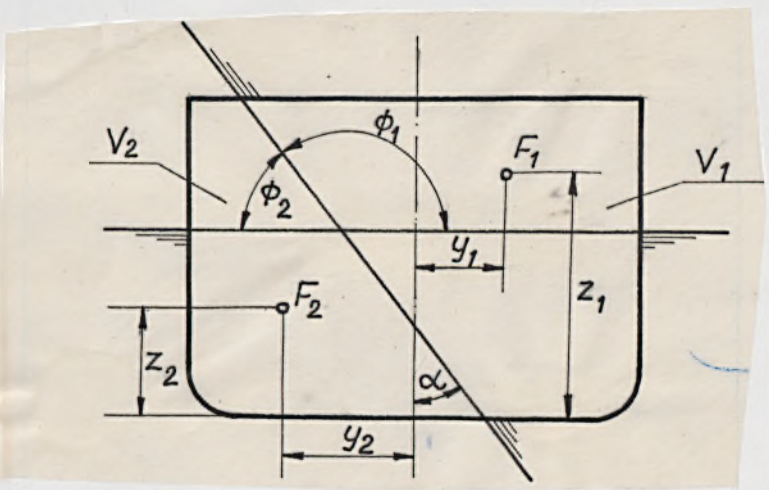
a ramię kształtu $l_{k1} = \lambda \cdot l_{ko}$.

8.10. Krzywa ramion dla kąta większego od 90°

Jeśli dane są wykresy (rys. 8.31) współrzędnych środka wyporu dla różnych kątów przechyłu w przedziale $(0,90^o)$ w funkcji wyporności okrętu do wyporności całkowitej włącznie, to w prosty już sposób można obliczyć krzywą ramion prostujących dla kątów przechyłu większych od 90°.



Rys.8.31



Rys.8.32

Przyjmijmy, że statek ma wyporność V_1, a jego wyporność całkowita:

$$V_c = V_1 + V_2$$

gdzie V_2 jest wypornością nadwodnej części kadłuba.

Jeśli statek zostanie przechylony o kąt:

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha \qquad (8.99)$$

to dopełnieniem jest

$$\phi_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha \qquad (8.100)$$

Na podstawie rys. 8.32 można napisać następujące równania momentów statycznych objętości:

$$V_1 y_1 = V_2 y_2$$

$$V_1 z_1 + V_2 z_2 = V_c \cdot z_c$$

a stąd współrzędne środka wyporu statku o przechyle większym od 90^o:

$$y_1(V_1, \phi_1) = \frac{V_2}{V_1} y_2 (V_2, \phi_2)$$

$$z_1(V_1, \phi_1) = \frac{V_c}{V_1} z_c - \frac{V_2}{V_1} z_2 (V_2, \phi_2) \qquad (8.101)$$

Odpowiadająca temu przechyłowi krzywa ramion prostujących jest równa:

$$l = y_1 \cos \phi_1 + z_1 \sin \phi_1 - z_G \sin \phi_2$$

25.02.1983
B-5
33%
+ S/272/83PG

Podstawiając do wyrażenia na l wartość na ϕ_1 wg wzoru (8.99) i wiedząc, że:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2}+\alpha\right) = \cos\alpha \quad \text{i} \quad \cos\left(\frac{\pi}{2}+\alpha\right) = -\sin\alpha$$

ramię prostujące dla kątów przechyłu powyżej 90^o jest równe:

$$l = z_1 \cos\alpha - y_1 \sin\alpha - z_G \cos\alpha \qquad (8.102)$$

gdzie współrzędne y_1 i z_1 obliczone są wzorami (8.101) za pomocą współrzędnych $y_2(V_2)$ i $z_2(V_2)$ z wykresów 8.31. Problem ten znajduje praktyczne zastosowanie przy badaniu stateczności jachtów żaglowych.

8.11. Próba przechyłu

Próbą przechyłu popularnie nazywamy doświadczenie, w którym wyznacza się położenie środka ciężkości okrętu. Znajomość położenia środka ciężkości okrętu odgrywa zasadniczą rolę we wszystkich obliczeniach stateczności owych. Już we wstępnym stadium projektowania okrętu ocenia się położenie środka ciężkości, a następnie przy bardziej zaawansowanym projekcie wykonuje się dokładniejsze obliczenia, uwzględniając położenia całych grup ciężarowych. Ze względu na dużą różnorodność ciężarów oraz nieproste ukształtowanie samego kadłuba wszystkie takie obliczenia nie są zbyt dokładne. Najdokładniej można wyznaczyć położenie środka ciężkości w sposób doświadczalny, gdy jednostka jest już zbudowana, całkowicie wyposażona i pływa na wodzie. Taki sposób wyznaczania rzędnej środka ciężkości okrętu wymagany jest przepisami instytucji klasyfikacyjnych. W przypadku budowy wielu jednostek tej samej serii próbę przechyłu należy przeprowadzić na pierwszej jednostce serii, a następnie wyrywkowo tylko na niektórych. Od zasady tej odstępuje się w przypadkach zmian konstrukcyjnych, wykonując tę próbę na każdej jednostce. Również każda przebudowa jednostki powoduje, że rzędna środka ciężkości okrętu i jego ciężar winny być określone na nowo. Doświadczenie to oparte jest na wzorze metacentrycznym

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{m \cdot y}{M \cdot h_o}.$$

Istotą więc doświadczenia jest przechylenie okrętu pod wpływem przesunięcia masy m na pomierzoną odległość y. Ponieważ kąt przechyłu można zmierzyć, a masę okrętu M można określić z pomiaru zanurzenia, jedyną niewiadomą wielkością jest wysokość metacentryczna. Z kolei dla znanego zanurzenia, z krzywych hydrostatycznych odczytać należy tylko wysokość metacentrum nad stępką i stąd dochodzimy do rzędnej środka ciężkości okrętu

$$Z_G = Z_M - h_o.$$

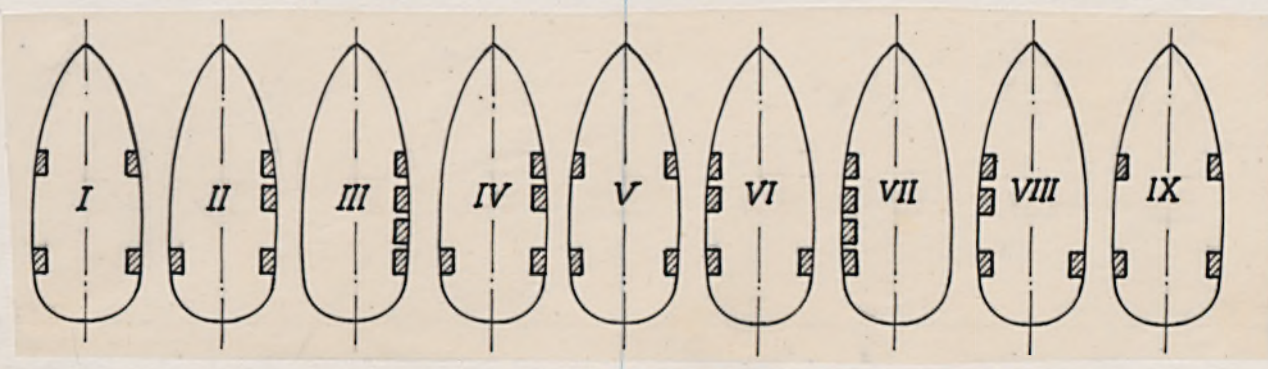
1986 06 17
B-5
33°/°
ZGPP

S/272/88 PG

Tak wygląda w skrócie idea próby przechyłu. W rzeczywistości, aby wynik był dokładny, próbę taką należy przeprowadzić bardzo starannie, powtarzając pomiar kilkakrotnie [8].

Przed próbą należy przeprowadzić szczegółową inspekcję całego okrętu, starannie notując wszelkie ładunki oraz ciężary, które nie wchodzą w skład wyposażenia statku, jak również wszystkie ciężary brakujące. Trzeba odnotować ich masę i współrzędne punktu położenia. Taki wykaz należy wykonać bardzo sumiennie, gdyż celem próby przechyłu jest określenie ciężaru i położenia środka ciężkości okrętu pustego, lecz całkowicie wyposażonego, wobec tego wszelkie odstępstwa od tego stanu uwzględnia się w sposób obliczeniowy.

Do przechylania statku zazwyczaj używa się czterech znanych mas. Suma tych mas wynosi około 0,5-1,0% masy okrętu. Moment pochodzący od przemieszczenia tych mas ma przechylić statek o kąt 2-4°, tzn. kąt musi być niewielki, aby można było uznać, że punkt metacentryczny nie zmienia swojego położenia.



Rys. 8.33

Przyjmując do próby cztery grupy ciężarowe wykonuje się 9 pomiarów, zgodnie ze schematem podanym na rys. 8.33. Widać z tego schematu, że właściwie jest 6 pomiarów przy przechylonym okręcie, natomiast pomiary nr I, V i IX wyznaczają położenie zerowe statku, będące średnim położeniem z tych trzech pomiarów. Miejsce przenoszenia ciężarów przechylających jest ściśle określone, a odległości y starannie pomierzone.

Kąt przechyłu mierzy się albo bardzo precyzyjnym urządzeniem do pomiaru kątów lub stosuje się proste, lecz niezawodne urządzenie w postaci pionów. Na małym statku dopuszcza się pomiar przy użyciu dwu pionów, na większym statku wymagana ilość to trzy piony. Ponieważ na statkach towarowych piony są długie - od pokładu do dna ładowni - rzędu l = 5-8 m, uzyskuje się dużą dokładność pomiaru. Mierząc za pomocą listwy pomiarowej odchylenia pionu „a" podczas przechyłu, kąt ten jest równy

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{a}{l}. \qquad (8.103)$$

ZGPP 06 17
B-5
33°/°
ZGPP

S/272/83 PG

Do obliczeń wysokości metacentrycznej z danego pomiaru przyjmuje się średnią wartość kąta uzyskaną ze wszystkich pionów. Wysokość metacentryczna podczas doświadczenia jest z kolei średnią arytmetyczną wartością otrzymaną z pomiarów nr II, III, IV, VI, VII, VIII.

Masę okrętu w chwili doświadczenia określa się z pomiarów zanurzenia, mierząc z łódki odległości od lustra wody do znaków zanurzenia. Pomiar taki winien być dokonany na dziobie, rufie i na śródokręciu na obu burtach z możliwie dużą dokładnością, np. $\pm$ 5 mm. Z takiego pomiaru z krzywych hydrostatycznych odczytać można wyporność objętościową V, a jeśli określimy gęstość wody, w jakiej pływa okręt, otrzymamy jego masę. Tak wyznaczona wysokość metacentryczna i odpowiadająca jej rzędna środka ciężkości dotyczy okrętu w chwili doświadczenia. Natomiast rzędna środka ciężkości okrętu w stanie pustym będzie równa

$$z_{G_o} = \frac{M z_G + \sum m_{b_i} \cdot z_{b_i} - \sum m_{z_i} \cdot z_{z_i}}{M + \sum m_{b_i} - \sum m_{z_i}}, \qquad (8.104)$$

gdzie: M, z_G - masa i rzędna środka ciężkości okrętu w chwili doświadczenia,
m_b, z_b - brakująca masa i jej rzędna środka ciężkości,
m_z, z_z - zbędna masa na statku nie wchodząca w skład statku pustego i jej rzędna środka ciężkości.

W protokóle z próby przechyłu zawsze określa się błąd określonej wysokości metacentrycznej. Jeśli pomiary posiadają znaczący rozrzut i błąd wyznaczonej wysokości metacentrycznej przekracza 5%, to doświadczenie takie winno być powtórzone.

Z tak starannie przeprowadzonego pomiaru zanurzenia oraz spisu przedmiotów brakujących i zbędnych wyznaczamy nie tylko masę statku pustego M_o, lecz także, po określeniu odciętej środka wyporu x_F, odciętą środka ciężkości okrętu x_G, gdyż $x_F \approx x_G$. Należy jeszcze dokonać i tu poprawki uwzględniającej ciężary brakujące i zbędne, więc

$$x_{G_o} = \frac{M x_g + \sum m_{b_i} \cdot x_{b_i} - \sum m_{z_i} \cdot z_{z_i}}{M + \sum m_{b_i} - \sum m_{z_i}}. \qquad (8.105)$$

Właściwy wynik próby zależy od dobrego przygotowania i przeprowadzenia doświadczenia. Zwłaszcza należy zwrócić uwagę na następujące czynniki:

1. Dzień na przeprowadzenie próby powinien być bezwietrzny, woda całkowicie spokojna.

1986 06 17
B-5
33°/
ZGPP

S/272/88PG

2. Statek powinien być całkowicie lub prawie całkowicie wyposażony, możliwie bez zbędnych ciężarów.
3. Statek pływa całkowicie swobodnie. Cumy są poluzowane, trap zdjęty, statek odsunięty od nabrzeża.
4. Wszystkie zbiorniki muszą być całkowicie opróżnione, lub całkowicie zapełnione, aby nie wystąpiły swobodne powierzchnie.
5. Wszystkie ruchome elementy jak wysięgniki dźwigów, łodzie ratunkowe na żurawikach czy elementy toczące się muszą być zabezpieczone przed przesuwaniem się w czasie pomiaru.
6. Na statku winny przebywać tylko osoby zatrudnione przy próbie. Podczas odczytu każda osoba zajmuje zawsze to samo położenie.

Spełnienie tych wymagań podwyższa zasadniczo dokładność wyniku próby przechyłu.

Często próbie przechyłu towarzyszy tzw. próba kołysania. Próba taka polega na rozkołysaniu statku w celu pomierzenia okresu kołysań własnych. Można ją przeprowadzić jedynie na niewielkich statkach. Rozkołysanie statku winno być takie, aby można było pomierzyć czas kilku kolejnych pełnych wahnięć, zwiększając tym dokładność wyznaczenia jego okresu. Rozkołysanie dużego okrętu na wodzie spokojnej jest niewykonalne.

Istnieje przybliżone wyrażenie na okres kołysań okrętu

$$T_\phi = \frac{c\,B}{\sqrt{h_o}}, \qquad (8.106)$$

gdzie: c – współczynnik bezwładności okrętu,
B(m) – szerokość okrętu,
h_o(m) – wysokość metacentryczna.

Ze wzoru tego można więc wyznaczyć, znając h_o i T_ϕ współczynnik bezwładności c. Znajomość tego współczynnika jest przydatna podczas eksploatacji okrętu. Kapitan chętnie używa wzoru na okres kołysań do kontroli stateczności swojego okrętu, gdyż znając współczynnik c i mierząc okres kołysań łatwo można wyznaczyć z kolei wysokość metacentryczną. Prostota tego wzoru sprawia, że często jest on używany przez załogi statków jako miernik stateczności.

8.12. Stateczność dynamiczna okrętu

W dotychczasowych rozważaniach zakładaliśmy, że wszelkie przemieszczenia okrętu odbywają się bardzo wolno z prędkościami zbliżonymi do zera. W rzeczywistości okręt może być też poddany wymuszeniom zależnym od czasu. Mimo że statek jest ciałem o sześciu stopniach swobody, ograniczamy się tu tylko do czystych przechyłów poprzecznych bez sprzężenia z innymi przemieszczeniami. Jest to uproszczenie, bo o ile np. na fali bocznej można pominąć kołysania wzdłużne, to prócz kołysania bocznego okręt będzie też poddany nurzaniu i dryfowi. Pełen ruch okrętu rozpatrywany jest

1986 06 17
B-5
33°
ZGPP
S/2A2/88PG

w ramach wykładu hydromechaniki okrętu. Tu ograniczamy się tylko do wody spokojnej, więc inne ruchy można pominąć. Związane z przechyłami kołysanie boczne jest tym ruchem oscylacyjnym, który ma decydujący wpływ na bezpieczeństwo okrętu i jest ściśle związane ze statecznością poprzeczną. Dlatego konieczne jest rozpatrzenie tu kołysania bocznego w najprostszej postaci. Gdy siły i momenty wymuszające działają w sposób dynamiczny, przechylany okręt nabiera prędkości i przyspieszenia. Ze względu na swą bezwładność okręt przekroczy statyczny kąt równowagi i będzie przechylać się tak długo, aż jego prędkość kątowa będzie zerem, po czym prędkość zmieni znak i statek zacznie przechylać się w przeciwnym kierunku. Zakładamy, że okręt kołysze się wokół głównej wzdłużnej osi bezwładności. Rozpatrzmy momenty działające wówczas na okręt. Gdy statek jest przechylony o kąt ϕ pojawia się znany moment prostujący, który usiłuje sprowadzić okręt do pierwotnego położenia

$$M_{w\phi} = - g \rho V \cdot l$$

lub gdy przechylenie jest niewielkie

$$M_{w\phi} = - g \rho V h_o \sin \phi \approx - g \rho V h_o \phi .$$

Moment ten działa przeciwnie do wychylenia ϕ . Ponieważ okręt kołysze się teraz z prędkością $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$, pojawia się moment hydrodynamiczny zależny od lepkości wody i wytwarzanych fal na powierzchni wody. Moment ten związany jest z oporem wody i nazywamy go momentem tłumiącym. Przy liniowej zależności od prędkości moment ten jest równy

$$M_t = - 2N_{\phi\phi} \dot{\phi} . \qquad (8.107)$$

Doświadczenia jednak wykazują bardziej skomplikowaną zależność. Przy większych kątach przechyłu lepszą aproksymacją jest

$$M_t = \pm B_{\phi\phi} \dot{\phi}^2 . \qquad (8.108)$$

Najlepszą zgodność z doświadczeniem wykazuje zależność

$$M_t = - 2 N_{\phi\phi} \dot{\phi} \pm B_{\phi\phi} \dot{\phi}^2 . \qquad (8.109)$$

Do naszych rozważań zastosujemy najprostszą postać (8.107), należy jednak zdawać sobie sprawę z przyjętych uproszczeń.

Ponieważ ruch okrętu jest niejednostajny, pojawia się dodatkowy moment bezwładności $m_{\phi\phi}$ proporcjonalny do przyspieszenia kątowego $\ddot{\phi} = \frac{d^2\phi}{dt^2}$.

Ten hydrodynamiczny moment jest równy

$$M_b = - m_{\phi\phi} \ddot{\phi} . \qquad (8.110)$$

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP

5/272/88 PG

Zgodnie z II prawem Newtona równanie ruchu będzie

$$J_{xx}\,\ddot{\phi} = \sum M_x = M_{px} + M_{w\phi} + M_t + M_b,$$

gdzie J_{xx} jest momentem bezwładności masy okrętu względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości okrętu. Równanie różniczkowe ruchu ma więc postać

$$(J_{xx} + m_{\phi\phi})\,\ddot{\phi} + 2\,N_{\phi\phi}\,\dot{\phi} + g\rho V l = M_{px}.$$

Równanie to możemy rozwiązać w przypadku, gdy albo ramię prostujące liniowo zależy od kąta przechyłu

$$1. \quad l = h_o \cdot \phi \ ,$$

albo tłumienie jest równe zeru

$$2. \quad N_{\phi\phi} = 0.$$

Rozpatrzmy oba te przypadki. Przypadek pierwszy dotyczy ograniczonego zakresu kąta przechyłu, w którym krzywa ramion pokrywa się z prostą $h_o \cdot \phi$. Przy liniowym tłumieniu równanie jest liniowe o stałych współczynnikach, znane z wielu zastosowań w mechanice. Dzieląc równanie przez czynnik występujący przy drugiej pochodnej, otrzymamy

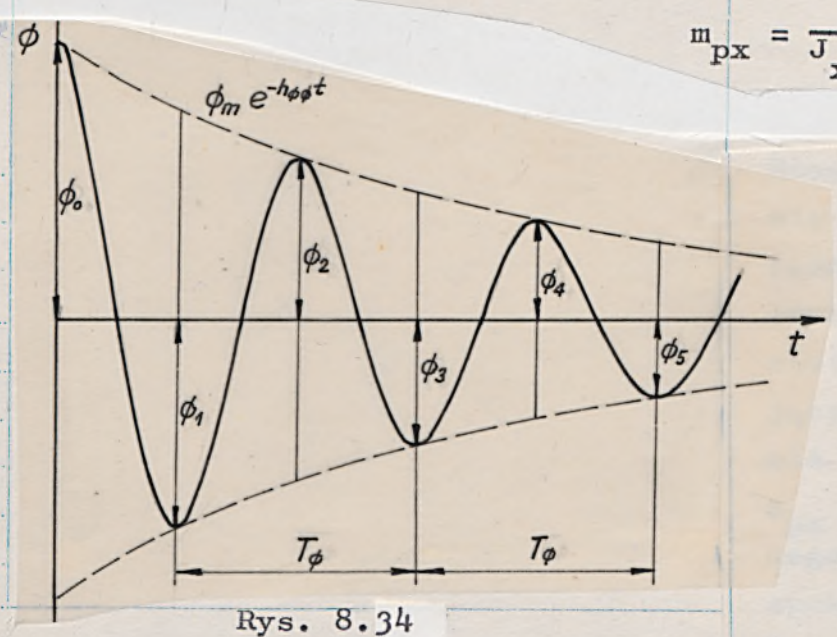
$$\ddot{\phi} + 2h_{\phi\phi}\,\dot{\phi} + \bar{\omega}_\phi^2\,\phi = m_{px}, \qquad (8.111)$$

gdzie współczynnik tłumienia $2h_{\phi\phi} = \dfrac{2N_{\phi\phi}}{J_{xx} + m_{\phi\phi}}$; (8.112)

- częstość własna nietłumiona $\bar{\omega}_\phi = \sqrt{\dfrac{g\rho V h_o}{J_{xx} + m_{\phi\phi}}}$; (8.113)

- współczynnik momentu przechylającego

$$m_{px} = \frac{M_{px}}{J_{xx} + m_{\phi\phi}} \ . \qquad (8.114)$$



Rys. 8.34

Rozwiązanie tego równania składa się z rozwiązania równania jednorodnego - gdy prawa strona jest równa zero, co ma miejsce gdy na statek nie działa moment przechylający - i ze szczególnego rozwiązania równania niejednorodnego. Gdy $m_{px} = 0$, jest to przypadek swobodnego ko-

8. 11. 1984
B-5
33°/₀
~~S/14/85~~ PG MS S/272/88

łysania okrętu na wodzie spokojnej wokół swego położenia zerowego, a ze względu na tłumienie z malejącą amplitudą kołysań (rys. 8.34). Zgodnie z fizycznym przebiegiem zjawiska rozwiązanie uwzględnia warunek

$$h_{\phi\phi}^2 < \bar{\omega}_\phi^2 .$$

Jeśli za warunki początkowe przyjmiemy

$$t = 0; \quad \phi = \phi_o \quad \text{i} \quad \dot{\phi} = 0,$$

to rozwiązanie równania jednorodnego można przedstawić w postaci

$$\phi = \phi_m e^{-h_{\phi\phi} t} \cos(\omega_\phi t - \beta), \tag{8.115}$$

gdzie:

$$\phi_m = \phi_o \sqrt{1 + \left(\frac{h_{\phi\phi}}{\omega_\phi}\right)^2}, \tag{8.116}$$

kąt fazowy

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h_{\phi\phi}}{\omega_\phi}, \tag{8.117}$$

a częstość własna tłumiona

$$\omega_\phi = \sqrt{\bar{\omega}_\phi^2 - h_{\phi\phi}^2} \tag{8.118}$$

Okres kołysań okrętu na wodzie spokojnej będzie

$$T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_\phi} = \frac{2\pi}{\bar{\omega}_\phi \sqrt{1 - \left(\frac{h_{\phi\phi}}{\bar{\omega}_\phi}\right)^2}} . \tag{8.119}$$

W obliczeniach kołysania chętnie używa się bezwymiarowego współczynnika tłumienia

$$\nu_\phi = \frac{h_{\phi\phi}}{\bar{\omega}_\phi}, \tag{8.120}$$

więc okres kołysań własnych z uwzględnieniem tłumienia

$$T_\phi = \bar{T}_\phi \frac{1}{\sqrt{1 - \nu_\phi^2}}, \tag{8.121}$$

gdzie $\bar{T}_\phi$ jest okresem kołysań własnych bez uwzględnienia tłumienia. Ponieważ bezwymiarowy współczynnik tłumienia dla kołysań poprzecznych, zależny od kształtu kadłuba i części wystających, głównie stępek przechyłowych, jest rzędu $\nu_\phi = 0{,}05\text{-}0{,}10$, wobec tego uwzględnienie tłumienia w obliczeniu okresu kołysań daje różnicę około 0,5% lub mniej w stosunku do okresu kołysań nietłumionych. Stąd

$$T_\phi \approx \bar{T}_\phi$$

i przy pominięciu tłumienia okres kołysań będzie równy

$$T_\phi \approx \frac{2\pi}{\omega_\phi} = 2\pi\sqrt{\frac{J_{xx} + m_{\phi\phi}}{g\,\rho V h_o}}. \qquad (8.122)$$

Zależy więc od momentu bezwładności masy okrętu i masy towarzyszącej, wyporności i wysokości metacentrycznej. Jeżeli moment bezwładności wyrazimy za pomocą promienia masy r_x, czyli

$$J_{xx} + m_{\phi\phi} = \rho V r_x^2,$$

a promień ten jako proporcjonalny do szerokości okrętu

$$r_x = c\,\frac{B}{2},$$

to okres kołysań będzie

$$T_\phi = \frac{c\,\pi B}{\sqrt{g h_o}},$$

a ponieważ liczbowo $\pi \approx \sqrt{g}$,
więc dochodzimy do wzoru (8.106)

$$T_\phi = \frac{c\,B}{\sqrt{h_o}},$$

gdzie B i h_o w metrach. Współczynnik bezwładności c zależy od stosunku H/B i rozkładu mas na statku. Wyznaczyć go można z szeregu wzorów przybliżonych podanych w literaturze. Zawiera się w granicach c = 0,76--0,80. Międzynarodowa Organizacja Morska IMO zaleca dla statków rybackich obliczać współczynnik C wzorem:

$$C = 0{,}746 + 0{,}046\,\frac{B}{T} - 0{,}086\,\frac{L_w}{100} \qquad (8.123)$$

gdzie: L_w - długość na wodnicy.

Wzór ten ma duże znaczenie praktyczne. Może być używany jako miernik wysokości metacentrycznej. Z pomiaru okresu kołysań kapitan też może się zorientować, czy początkowa stateczność statku nie jest za mała. Zdarzyć się może i przypadek odwrotny. Nadmiernie duża wysokość metacentryczna powoduje krótki okres kołysań, a więc duże przyspieszenia. Duże przyspieszenia kołysania wpływają bardzo niekorzystnie na konstrukcję statku, na mocowanie ładunku oraz na przebywających na statku ludzi, powodując chorobę morską. Dlatego statki winny być tak projektowane i ładowane przez załogę, aby stateczność była właściwa, tzn. aby nie były ani za „miękkie" ani za „sztywne". W niektórych typach statków stosuje się tzw. zbiorniki szczytowe umieszczone pod pokładem, których zadaniem jest zmniejszenie wysokości metacentrycznej w stanach, gdy wysokość metacentryczna jest za duża, a okres kołysań za krótki.

Zgodnie z równaniem (8.115) statek wychylony z położenia równowagi i pozostawiony samemu sobie kołysze się z burty na burtę z malejącą amplitudą $\phi_m e^{-h_{\phi\phi} t}$. Rozpatrzmy maksymalne przechylenia, występujące co pół okresu T_ϕ.

Gdy

$$t = 0, \qquad \phi_o = \phi_m \cos\beta \;,$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

$$t = \frac{T_\phi}{2}, \qquad \phi_1 = -\phi_m e^{-\frac{1}{2} h_{\phi\phi} T_\phi} \cos\beta = -\phi_o e^{-\frac{1}{2} h_{\phi\phi} T_\phi},$$

$$t = T_\phi, \qquad \phi_2 = \phi_m e^{-h_{\phi\phi} T_\phi} \cos\beta = \phi_o e^{-h_{\phi\phi} T_\phi}.$$

Pomijając znak minus stosunek dwu kolejnych amplitud przedzielonych połową okresu kołysań jest stały i równy

$$\frac{\phi_o}{\phi_1} = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\phi_i}{\phi_{i+1}} = e^{\frac{1}{2} h_{\phi\phi} T_\phi}$$

lub

$$\frac{\phi_i}{\phi_{i+1}} = e^{\nu_\phi \pi},$$

a stąd można obliczyć bezwymiarowy współczynnik tłumienia

$$\nu_\phi = \frac{1}{\pi} \ln \frac{\phi_i}{\phi_{i+1}}. \qquad (8.124)$$

Wyrażenie to jest podstawą doświadczalnego wyznaczenia współczynnika tłumienia, gdzie pomiary ograniczają się do rejestracji kolejno po sobie występujących amplitud ϕ_i na każdą z burt.

Jeśli przyjmiemy, że $\ln x = 2 \frac{x-1}{x+1}$, to współczynnik tłumienia można wyrazić wzorem

$$\nu_\phi = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\phi}{\phi_{śr}}, \qquad (8.125)$$

gdzie $\Delta\phi = \phi_i - \phi_{i+1}$ i $\phi_{śr} = \frac{1}{2}(\phi_i + \phi_{i+1})$.

Na podstawie badań doświadczalnych można się zorientować, czy przyjęta hipoteza liniowego momentu tłumiącego jest słuszna lub czy należy poszukiwać innej postaci współczynnika tłumienia.

Jeśli na statek działa moment przechylający M_{px}, równanie różniczkowe (8.111) jest równaniem niejednorodnym. Szczególnym rozwiązaniem tego równania, gdy M_{px} jest stały, będzie

$$\overline{\phi} = \frac{M_{px}}{g \rho \nabla h_o} = \phi_{st},$$

gdzie ϕ_{st} jest statycznym kątem przechyłu, jaki wystąpi pod wpływem momentu M_{px}. Przyjmując warunki początkowe

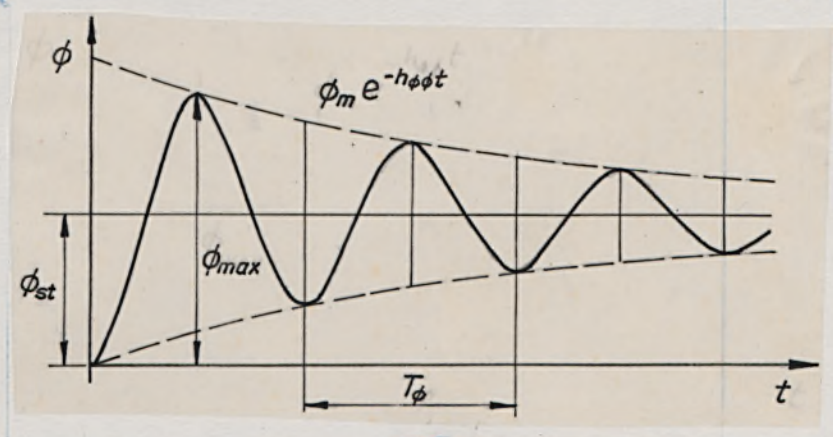
$$t = 0; \qquad \phi = 0 \quad \text{i} \quad \dot{\phi} = 0$$

rozwiązanie równania ruchu można przedstawić w postaci

$$\phi = \phi_{st}\left[1 - \sqrt{1+\nu_\phi^2}\, e^{-\nu_\phi \omega_\phi t} \cos(\omega_\phi t - \beta)\right], \qquad (8.126)$$

gdzie

$$\operatorname{tg}\beta \approx \beta = \frac{h_{\phi\phi}}{\omega_\phi} = \nu_\phi .$$



Rys. 8.35

Z równania tego widać, że okręt kołysze się wokół statycznego kąta przechyłu ϕ_{st} (rys. 8.35) z malejącą amplitudą. Interesuje nas maksymalny kąt przechyłu. Kąt ten wystąpi po czasie $t = \frac{T_\phi}{2}$. Podstawiając tę wartość do równania (8.126) otrzymujemy

$$\phi_{max} = \phi_{st}\left[1 - \sqrt{1+\nu_\phi^2}\cdot e^{-\nu_\phi \pi} \cos(\pi - \nu_\phi)\right];$$

kąt ten zdefiniowany jest na rys. 8.35.

Można więc z tego wzoru wyznaczyć, jaki wpływ ma tłumienie na dynamiczny kąt przechyłu. Niektóre wartości podaje tabela 8.2.

T a b e l a 8.2

Wpływ współczynnika tłumienia
na dynamiczny kąt przechyłu

ν_ϕ	$\frac{\phi_{max}}{\phi_{st}}$
0	2
0,05	1,854
0,10	1,730
0,15	1,620

Należy tu pamiętać, że uzyskane rozwiązanie dotyczy założenia, że ramię prostujące ma postać liniową $l = h_o \cdot \phi$.

Rozpatrzmy teraz drugi możliwy do rozwiązania przypadek, pomijając tłumienie, czyli gdy

$$N_{\phi\phi} = h_{\phi\phi} = \nu_\phi = 0.$$

Równanie ruchu ma teraz postać

$$(J_{xx} + m_{\phi\phi})\,\ddot{\phi} + g\varrho V l = M_{px}. \qquad (8.127)$$

Po scałkowaniu i przy przyjęciu za warunki początkowe

$$t = 0; \quad \phi = \phi_o ; \quad \dot{\phi} = \dot{\phi}_o$$

otrzymamy

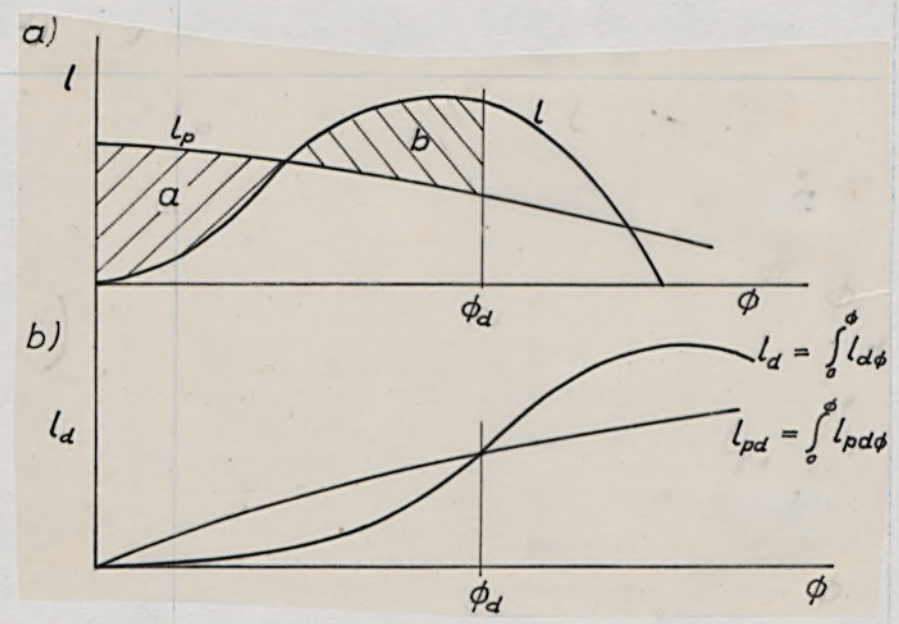
$$g \rho V \int_{\phi_o}^{\phi_d} l_d \, d\phi = g V \rho \int_{\phi_o}^{\phi_d} l_p \, d\phi + \frac{1}{2}(J_{xx} + m_{\phi\phi}) \dot{\phi}_o^2. \qquad (8.128)$$

Lewa strona równania przedstawia pracę momentu prostującego, zaś prawa strona pracę momentu przechylającego i energię kinetyczną okrętu. Maksymalny kąt wystąpi, gdy energia ta jest równa zero.

Gdy $t = 0$, $\phi_o = 0$ i $\dot{\phi}_o = 0$, to dynamiczny kąt przechyłu wyznaczymy z warunku

$$\int_0^{\phi_d} l_d \, d\phi = \int_0^{\phi_d} l_p \, d\phi . \qquad (8.129)$$

Częściej zamiast pracy używa się ramion. Wyrażenie $l_d = \int_0^{\phi_d} l_d \, d\phi$ nazywamy ramieniem stateczności dynamicznej, gdyż ma wymiar długości i przedstawia pole pod krzywą ramion prostujących wykreśloną w funkcji kąta ϕ. Kąt przechyłu, do jakiego przechyli się statek pod wpływem dynamicznie działającego ramienia przechylającego $l_p = \frac{M_{px}}{g \rho V}$, wyznaczymy wykreślnie z warunku (8.129) (rys. 8.36). Statek przechyli się do takiego kąta ϕ_d, dla którego pole pod krzywą ramion prostujących l będzie równe polu pod ramieniem przechylającym l_p. Warunek ten sprowadza się do równości pól a i b na rys. 8.36a. Wygodniej jest jednak wykreślić w funkcji kąta przechyłu ramię stateczności dynamicznej i krzywą całkową ramienia przechylającego. Odcięta, przy której przecinają się te dwie krzywe (rys. 8.36b), jest poszukiwanym kątem ϕ_d.



Rys. 8.36

Ramię stateczności dynamicznej l_d można też obliczyć w inny sposób. Siła wyporu i siła ciężkości okrętu są siłami potencjalnymi, więc ich praca nie zależy od drogi przemieszczenia, lecz od początkowego i końcowego ich położenia. Praca momentu prostującego jest równa

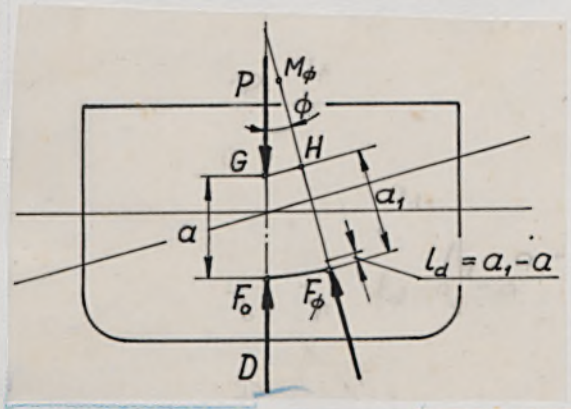
$$W = g \rho V(\overline{HF}_\phi - \overline{GF}_o) = g \rho V(a_1 - a), \qquad (8.130)$$

gdzie, zgodnie z rys. 8.2 i 8.37.

$$\overline{HF} = a_1 = y\sin\phi - z\cos\phi + a\cos\phi ,$$

więc ramię stateczności dynamicznej

$$l_d = a_1 - a = y\sin\phi - z\cos\phi - a(1 - \cos\phi) \qquad (8.131)$$



Rys. 8.37

jest przyrostem pod wpływem przechyłu pionowej odległości pomiędzy środkiem ciężkości okrętu i środkiem wyporu. Nietrudno wykazać poprawność tego wyrażenia. Obliczając pochodną ramienia dynamicznego dochodzimy do wzoru (8.6), który przedstawia ramię prostujące

$$\frac{dl_d}{d\phi} = l = y\cos\phi + z\sin\phi - a\sin\phi ,$$

a to jest zgodne ze wzorem (8.129). Należy tu pamiętać, że współrzędne środka wyporu są zależne od kąta przechyłu, a ich pochodne równe

$$\frac{dy}{d\phi} = r_\phi\cos\phi \qquad \text{i} \qquad \frac{dz}{d\phi} = r_\phi\sin\phi .$$

Ponieważ ramię dynamiczne

$$l_d = a_1 - a,$$

a uogólniona wysokość metacentryczna

$$h_\phi = r_\phi - a_1,$$

więc dodając te dwa równania stronami otrzymamy

$$l_d + h_\phi = r_\phi - a, \qquad (8.132)$$

gdzie l_d jest całką oznaczoną ramion prostujących l, a h_ϕ jest pochodną krzywej ramion prostujących l. Zależność ta ma liczne zastosowania, służy m.in. do sprawdzenia obliczeń stateczności okrętu. Jeśli uwzględnimy, że

$$h_\phi = \frac{dl}{d\phi} = \frac{d^2 l_d}{d\phi^2} ,$$

to otrzymujemy równanie różniczkowe stateczności

$$\frac{d^2 l_d}{d\phi^2} + l_d = r_\phi - a, \qquad (8.133)$$

mające znaczenie teoretyczne przy rozpatrywaniu stateczności w układzie biegunowym.

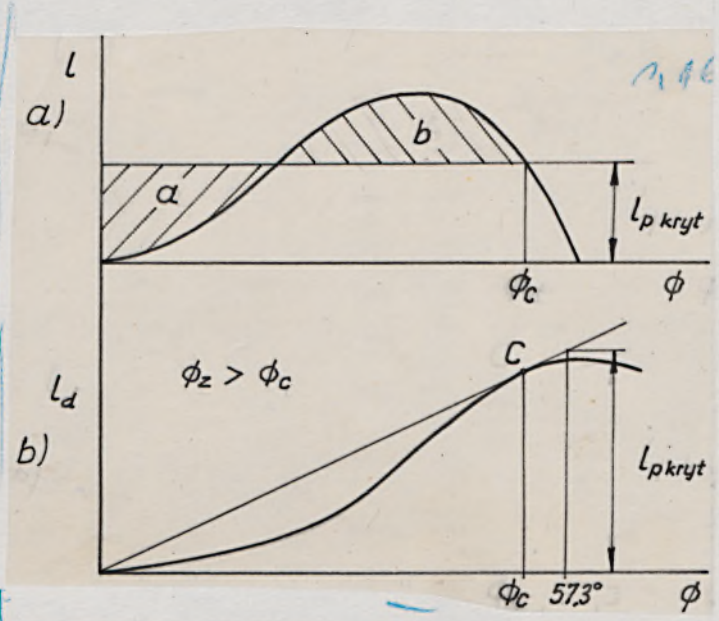
W praktycznych obliczeniach korzysta się głównie z układu: ramię w funkcji kąta przechyłu. Przyjmuje się też z reguły, że moment przechylają-

6. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/242/88
B-5
33

cy jest stały w funkcji kąta przechyłu. Wówczas pole pod ramieniem przechylającym

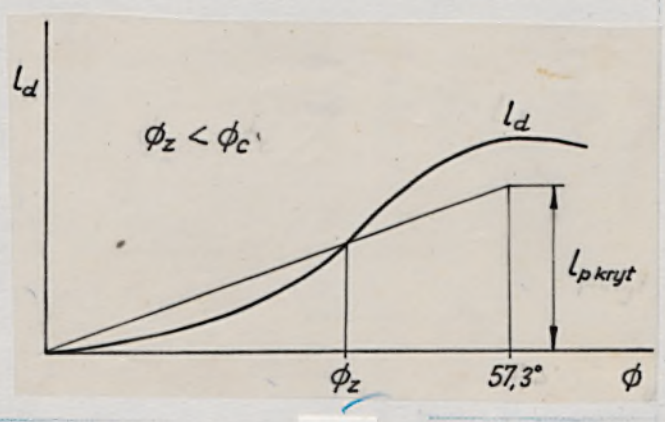
$$l_{pd} = \int_0^{\phi} l_p d\phi = l_p \cdot \phi$$

jest opisane linią prostą, którą szybko można wykreślić na dwu punktach, dla $\phi = 0$, gdzie $l_{pd} = 0$ i dla $\phi = 1$, gdzie $l_{pd} = l_p$ ($\phi = 1$ rad = $= 57{,}3^{o}$). Punkt przecięcia się tej prostej, która jest całką ramienia przechylającego, z krzywą ramion stateczności dynamicznej wyznacza dynamiczny kąt przechyłu: Interesuje nas, jakie jest maksymalne możliwe ramię przechylające, tzw. krytyczne $l_{p\ kryt}$, pod działaniem którego statek jeszcze nie przewróci się. Pokazuje to rys. 8.38. Kąt ten wyznaczamy albo z warunku równości pola a i pola b, albo prowadzimy prostą $l_{pd} = l_p \cdot \phi$ stycznie do krzywej ramion l_d, a ramię krytyczne $l_{p\ kryt}$ odczytujemy przy kącie $\phi = 57{,}3^{o}$. Odcięta punktu styczności C wyznacza dopuszczalny kąt przechyłu ϕ_c. Kąt ten zwany jest kątem przewracania, gdyż nieznaczne zwiększenie $l_{p\ kryt}$ powoduje przewrócenie okrętu. Zdarzyć się może, że okręt nie może przechylić się do tego kąta, gdyż już przy mniejszym przechyle zacznie się wlewać woda do wnętrza kadłuba. Taki kąt nazywamy kątem zalewania: ϕ_z i ten kąt decyduje wówczas o dopuszczalnym przechyle okrętu. Krytyczne ramię przechylające wyznaczymy wtedy jak na rys. 8.39.

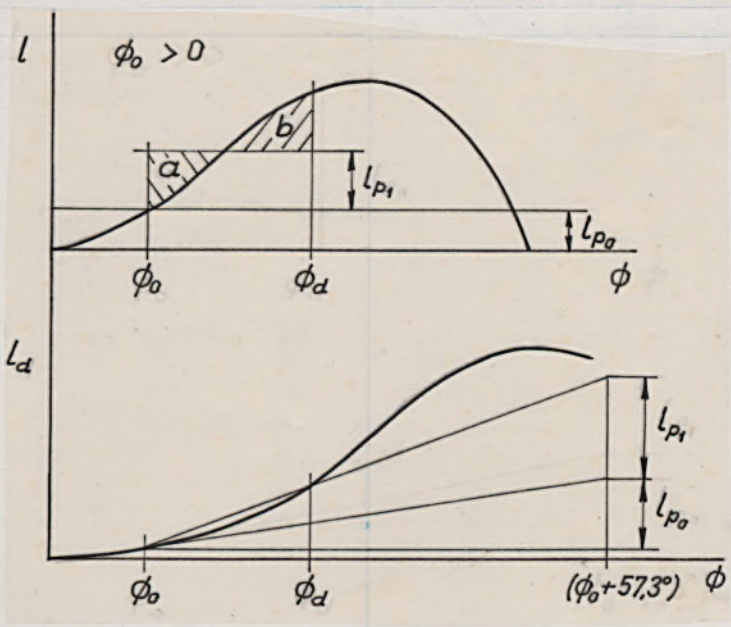


Rys. 8.38

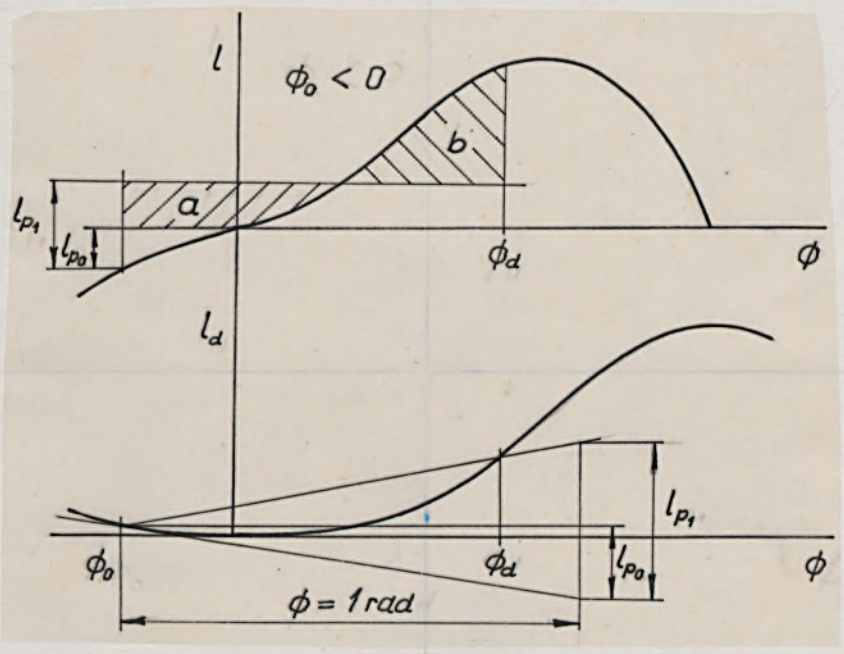
Te rozważania dotyczą przypadku, gdy w stanie początkowym, tzn. przed zadziałaniem momentu przechylającego, statek pływał w położeniu wyprostowanym, czyli $\phi_o = 0$. Może jednak mieć miejsce przypadek, gdy statek płynie z przechyłem i wtedy zostanie poddany dynamicznemu działaniu ramienia przechylającego. Rozpatrzymy tu dwa przypadki. Przypadek pierwszy wystąpi, gdy $\phi_o > 0$, tzn. gdy statek ma wstępny kąt przechyłu na burtę w kierunku działania momentu przechylającego, a drugi przypadek ma miejsce przy przechyle na burtę przeciwną, gdy $\phi_o < 0$. Konstrukcję wyznaczania dynamicznego kąta ϕ_d dla obu tych przypadków, zarówno przy wykorzystaniu ramion stateczności statycznej, jak i dynamicznej, przedstawiają rys. 8.40 i 8.41.



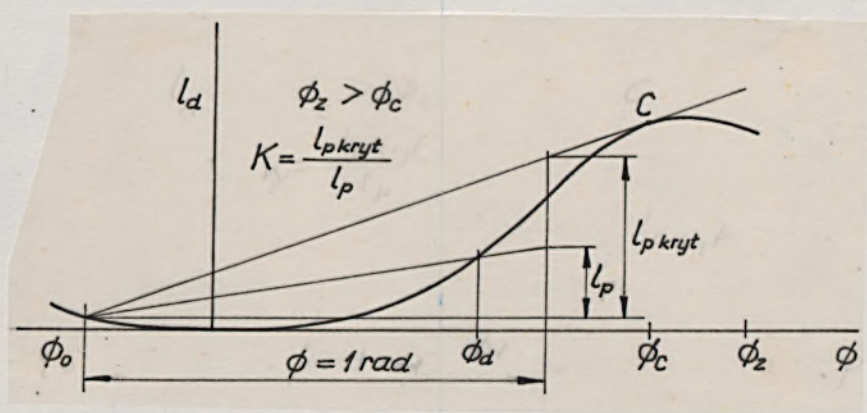
Rys. 8.39



Rys. 8.40



Rys. 8.41

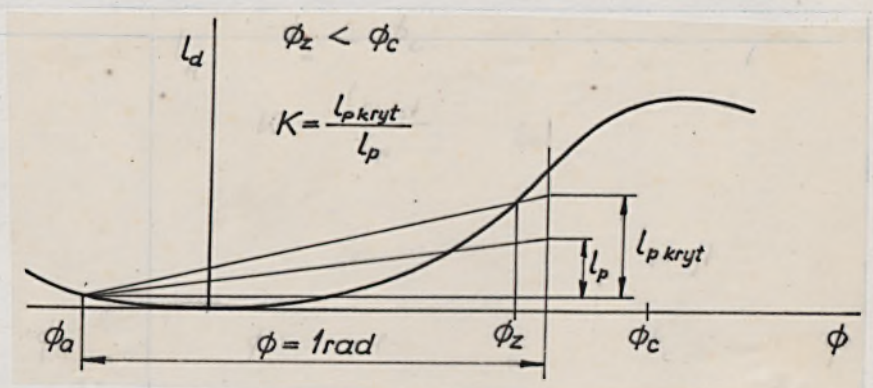


Rys. 8.42

W przepisach stateczności wyróżnia się jeszcze jeden przypadek, gdy na statek nie działa ramię przechylające, lecz statek kołysze się swobodnie z burty na burtę. Symuluje to ruch okrętu na fali przy zachowaniu spokojnej powierzchni wody. Przypadek ten pokazuje rys. 8.42 lub 8.43, przy

8.11.1984 ~~8/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°

czym zawsze uwzględnia się tu przechył $\phi_o < 0$, gdyż jest to przypadek bardziej niebezpieczny i kąt przechyłu jest większy. W ocenie stateczności okrętu stosuje się tzw. współczynnik bezpieczeństwa, będący stosunkiem krytycznego ramienia przechylającego do aktualnie działającego ramienia przechylającego. Współczynnik ten winien być w każdym stanie załadowania większy od jedności



Rys. 8.43

$$K = \frac{l_{p\ kryt}}{l_p} > 1.$$

Przykład 8.3

Krzywa ramion prostujących posiada maksimum przy kącie przechyłu $\phi = 30^o$. Promień metacentryczny dla tego kąta $r_\phi = 6{,}11$ m, rzędna środka ciężkości $z_G = 10{,}45$ m, rzędna środka wyporu okrętu w położeniu wyprostowanym $z_F = 4{,}46$ m. Obliczyć dla $\phi = 30^o$ ramię stateczności dynamicznej. Jakie musi być ramię przechylające, aby przechylić dynamicznie okręt do tego kąta?

Rozwiązanie:

Ponieważ dla $\phi = 30^o$ $\frac{dl}{d\phi} = h_\phi = 0$, więc punkt M_ϕ pokrywa się z punktem H (rys. 8.8) i odcinek $\overline{HF_\phi} = r_\phi$, wówczas ramię dynamiczne

$$l_d = \overline{HF_\phi} - (z_G - z_F) = 6{,}11 - (10{,}45 - 4{,}46) = 0{,}12 \text{ m}.$$

Wartość całki ramienia przechylającego $l_p = const$ jest linią prostą, dla $\phi = 30^o$ jest równa wartości ramienia l_d i jest zerem dla $\phi = 0$. Wartość ramienia przechylającego odczytujemy dla $\phi = 1$ rad, czyli

$$l_p = \frac{57{,}3}{30} l_d = \frac{57{,}3}{30} \cdot 0{,}12 = 0{,}23 \text{ m}.$$

8.13. Obliczenie współrzędnych środka wyporu z pantokaren dla statku przechylonego

Ramię kształtu określa zależność:

$$l_k = y \cos\phi + z \sin\phi$$

a zatem konieczna jest znajomość współrzędnych środka wyporu statku przechylonego o kąt ϕ. Pantokareny obliczone według przyjętego algorytmu, a które stanowią jeden z podstawowych dokumentów okrętowych, dają od razu ramię kształtu bez rozbicia na dwie składowe. Może jednak wystąpić ko-

1986 06 17
B-5
33°/
ZGPP
S/272/88 PG

nieczność posiadania wartości y i z, co przedstawiono w p. 8.9, gdy chcemy na podstawie statku wzorcowego zaprojektować nowy statek o zmienionych wymiarach głównych. Konieczne jest tu drugie równanie. Wykorzystamy więc wyrażenie na ramię stateczności dynamicznej - wzór (8.131).

Przy przyjęciu początku układu współrzędnych w środku wyporu F_o, równania na ramię prostujące i ramię dynamiczne mają postać:

$$l = y \cos\phi + z \sin\phi - a \sin\phi$$

$$l_d = y \sin\phi - z \cos\phi + a \cos\phi - a$$

gdzie: $a = z_G - z_F$.

Natomiast, gdy początek układu znajduje się w punkcie K, co przyjmuje się najczęściej, wówczas można zapisać:

$$l = y \cos\phi + z \sin\phi - z_G \sin\phi$$

$$l_d = y \sin\phi - z \cos\phi + z_G \cos\phi - a$$

Jeśli przyjąć, że $z_G = 0$, wówczas $a = -z_F$ i równania powyższe (względem punktu K) sprowadzają się do postaci:

$$y \cos\phi + z \sin\phi = l_k$$

$$y \sin\phi - z \cos\phi = l_{kd} - z_F$$

gdzie:

$$l_{kd} = \int_0^{\phi} l_k \, d\phi$$

Rozwiązanie tego układu równań pozwala na wyznaczenie obu współrzędnych środka wyporu statku przechylonego o kąt ϕ dla danej wyporności za pomocą pantokaren

$$y = l_k \cos\phi - (z_F - l_{kd}) \sin\phi$$

$$z = l_k \sin\phi + (z_F - l_{kd}) \cos\phi \qquad (8.134)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/88 s. 169
B-5
33°

9. OCENA STATECZNOŚCI OKRĘTU W CZASIE EKSPLOATACJI

„Okręt będzie żeglował, zatrzymywał się, pędził, póki mu starczy sił, lub jak morski ptak spoczywający na gniewnych falach przetrzyma najcięższą z burz, podczas których człowiek wątpił czy wyżyje i ujrzy jeszcze wschód słońca".

9.1. Uwagi ogólne

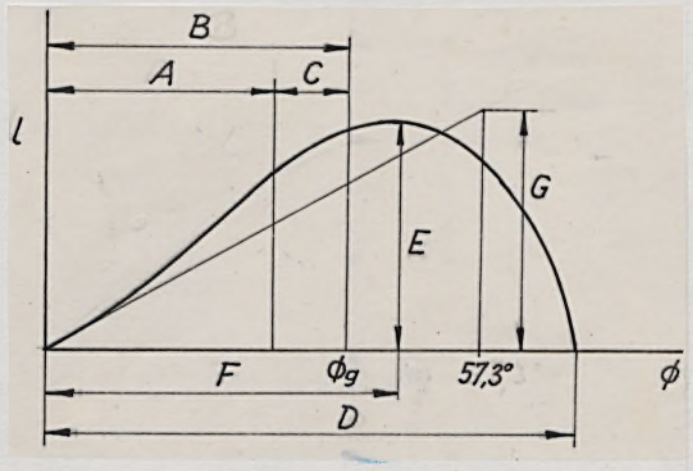
Okręt na morzu lub w porcie znajduje się w różnych warunkach eksploatacyjnych. Składa się na nie stan załadowania, rejon pływania i warunki pogodowe. Instytucje klasyfikacyjne, pod nadzorem których statki są budowane, poświęcają wiele uwagi opracowaniu także właściwych przepisów stateczności owych, aby statki mogły być i pod tym względem bezpieczne. Wszelkie wypadki stateczności owe są wnikliwie analizowane i wyciągane są wnioski mające na celu poprawę bezpieczeństwa statków i załóg. Bardzo zagrożone pod względem utraty stateczności są statki rybackie. Przyczyną są tu ich niewielkie rozmiary, długotrwałe przebywanie na morzu, nierzadko na burzliwych akwenach, zmienne stany załadowania na morzu, np. obecność połowu na pokładzie i otwarte luki ładowni oraz dodatkowe momenty przechylające od narzędzi łowczych. Na bezpieczeństwo statków rybackich szczególną uwagę zwróciło IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization) przekształcone ostatnio w IMO (International Maritime Organization), będące agendą Organizacji Narodów Zjednoczonych. W 1962 r. instytucja ta rozpoczęła prace [9] zmierzające do sformułowania międzynarodowych kryteriów stateczności owych dla statków towarowych i rybackich. Opracowane kryteria zostały wprowadzone jako zalecenia. IMO zajmuje się także bezpieczeństwem okrętu w sensie ogólnym, opracowując wytyczne dotyczące środków ratowniczych, środków łączności, wyposażenia okrętu, zabezpieczenia przeciwpożarowego, podnoszenia kwalifikacji załóg pływających. Jeśli chodzi o kryteria stateczności owe sformułowane przez

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°
170
17

IMO czy też kryteria w formie przepisów obowiązujące w wielu krajach, to w zdecydowanej większości opierają się one na metodach obliczeń związanych ze statyką okrętu. W szczególności wykorzystuje się krzywą ramion stateczności statycznej, zalecając odpowiedni jej przebieg i wartości rzędnych.

9.2. Kryteria statecznościowe IMO

Przytoczone tu kryteria IMO [5] wymagają odpowiednich wartości i zakresu krzywej ramion. Jednak wszystkie te zalecenia dadzą się sprowadzić do wspólnego mianownika [14], a mianowicie do określenia, dla danej wyporności, dopuszczalnej rzędnej środka ciężkości okrętu spełniającej dane kryterium. Zalecenia te są następujące (rys. 9.1):



Rys. 9.1

A - Powierzchnia pod krzywą ramion prostujących 1 do kąta przechyłu $\phi = 30^\circ$ nie powinna być mniejsza od 0,055 m. Wartość ta jest ramieniem stateczności dynamicznej, czyli $l_{d_{30^\circ}} \geqslant 0{,}055$ m.

Ramię prostujące jest równe

$$l = l_k - z_G \sin\phi ,$$

stąd

$$\int_0^{30^\circ} l\,d\phi = \int_0^{30^\circ} (l_k - z_G \sin\phi)\,d\phi \geqslant 0{,}055.$$

Lewa strona nierówności jest równa

$$\int_0^{30^\circ} l_k\,d\phi - z_G \int_0^{30^\circ} \sin\phi\,d\phi = \int_0^{30^\circ} l_k d\phi + z_G \cos\phi \Big|_0^{30^\circ} = \int_0^{30^\circ} l_k d\phi - 0{,}134\, z_G.$$

Rzędna środka ciężkości okrętu winna więc mieć wartość nie większą niż

$$z_G \leqslant 7{,}464 \left(\int_0^{30^\circ} l_k d\phi - 0{,}055 \right) \text{ (m)} \qquad (9.1)$$

Całka $\int_0^{30^\circ} l_k\,d\phi$ jest polem pod krzywą ramion kształtu, które odczytujemy z pantokaren. Granice całkowania wyrażamy w radianach.

B - Powierzchnia pod krzywą ramion do kąta przechyłu $\phi = 40^\circ$ lub kąta zalewania ϕ_z, w zależności od tego, który z nich jest mniejszy, winna być nie mniejsza niż 0,090 m. Kąt ϕ_z jest kątem przechyłu, przy którym zanurza się dolna krawędź otworu w kadłubie, nadbudówce czy pokładówce, przekroczenie którego spowoduje dostanie się wody do wnętrza kadłuba.

Z warunku tego, w podobny sposób jak wyżej, można wyznaczyć dopuszczalną rzędną środka ciężkości okrętu.

V. Granice całkowania wyrażamy w radianach.

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP

Jeśli $\phi_z > 40^o$, to wówczas

$$z_G \leqslant 4{,}274 \left(\int_0^{40^o} l_k \, d\phi - 0{,}090 \right) \text{(m)}, \qquad (9.2)$$

a jeśli $\phi_z < 40^o$

$$z_G \leqslant \frac{\int_0^{\phi_z} l_k d\phi - 0{,}090}{1 - \cos\phi_z} \text{ (m)}. \qquad (9.3)$$

C - Powierzchnia pod krzywą ramion pomiędzy kątem przechyłu $\phi = 30^o$ i kątem $\phi = 40^o$ lub $\phi = \phi_z$, w zależności od tego, który z tych kątów jest mniejszy, powinna być nie mniejsza od 0,030 m.
Warunek ten będzie spełniony, gdy rzędna środka ciężkości okrętu będzie spełniała poniższą nierówność

$$z_G \leqslant \frac{\int_{30}^{\phi_g} l_k d\phi - 0{,}030}{\cos 30^o - \cos\phi_g}, \qquad (9.4)$$

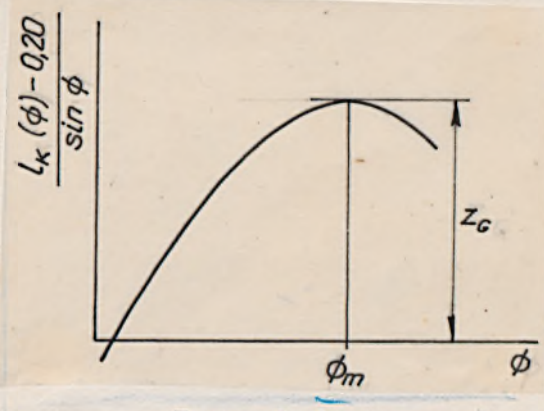
gdzie kąt graniczny $\phi_g = 40^o$, gdy $\phi_z > 40^o$, lub $\phi_g = \phi_z$, gdy $\phi_z < 40^o$.

D - Maksymalna wartość krzywej ramion prostujących w przedziale od 30^o przechyłu wzwyż nie może być mniejsza od 0,20 m.

Warunek ten będzie spełniony, jeśli rzędna z_G nie będzie przekraczać maksymalnej wartości $\frac{l_k(\phi) - 0{,}20}{\sin\phi}$ wykreślonej w funkcji kąta (rys. 9.2), czyli

$$z_G \leqslant \max \frac{l_k(\phi) - 0{,}20}{\sin\phi} \text{ (m)}, \qquad (9.5)$$

przy czym $\phi_m \geqslant 30^o$.



Rys. 9.2

E - Maksimum krzywej ramion prostujących nie może występować przy kącie przechyłu mniejszym od 30^o.
Maksimum krzywej ma miejsce, gdy jej pochodna w tym punkcie jest równa zero, czyli

$$\frac{dl}{d\phi} = \frac{dl_k}{d\phi} - z_G \cos\phi = 0, \qquad (9.6)$$

a stąd

$$z_G \leqslant \frac{\frac{dl_k}{d\phi}\Big|_{\phi=30^o}}{\cos 30^o} = 1{,}1547\left(\frac{dl_k}{d\phi}\Big|_{\phi=30^o}\right) (m) . \qquad (9.7)$$

Wartość pochodnej można w przybliżeniu obliczyć

$$\frac{dl_k}{d\phi}\Big|_{\phi=30^o} = \frac{9}{\pi}\ (l_{k40^o} - l_{k20^o}),$$

więc

$$z_G \leqslant 3{,}308\ (l_{k40^o} - l_{k20^o})\ (m). \qquad (9.8)$$

F - Początkowa wysokość metacentryczna nie powinna być mniejsza: dla statków towarowych od 0,15 m;
dla statków rybackich od 0,35 m,
czyli rzędne środka ciężkości okrętu winny odpowiednio spełniać warunek:

$$z_G \leqslant z_M - 0{,}15\ (m) \qquad (9.9)$$

$$z_G \leqslant z_M - 0{,}35\ (m). \qquad (9.10)$$

IMO zaleca również, aby dla trawlerów rybackich łowiących z burty wymagania A, B, C i F były zwiększone o 20%, co ma zabezpieczyć przed niekorzystnym wpływem narzędzi łowczych.

Dla starszych jednostek rybackich o długości $L \leqslant 24{,}4$ m, nie posiadających dokumentacji statecznościowej, dopuszcza się zastosowanie uproszczonego kryterium na minimalną wysokość metacentryczną dla najniekorzystniejszego stanu eksploatacyjnego

$$h_o \geqslant 0{,}60 + 0{,}05\ B - 0{,}25\ F_b\ (m), \qquad (9.11)$$

gdzie: B - szerokość statku (m),
F_b - minimalna wolna burta (m),
H - wysokość boczna (m),

przy czym h_o nie może być mniejsze od 0,40 m.

Wzór ten obejmuje statki znajdujące się w następujących przedziałach:

$$0{,}20 \geqslant F_b/B \geqslant 0{,}04,$$

$$2{,}15 \geqslant B/H \geqslant 1{,}75.$$

Wysokość metacentryczna może być wyznaczona doświadczalnie, albo z próby przechyłu, albo z próby kołysania. Kryterium to nie może być jednak zastosowane do statków łowiących z burty.

8. 11. 1984 S/14/~~85~~ PG MS S/272/83
B-5
33
173

9.3. Wolna burta

Jednym z czynników mających duży wpływ na stateczność okrętu jest wolna burta. Odpowiednio wysoka wolna burta ma na celu:
- zachowanie minimalnych wymagań statecznościowych przy uwzględnieniu także oblodzenia statku;
- zapewnienie bezpieczeństwa pracujących ludzi na pokładzie, co ma szczególne znaczenie dla statków rybackich;
- zabezpieczenie przed wdarciem się wody do zamkniętych pomieszczeń kadłuba i nadbudówek statku.

Stwierdzono, dla statków rybackich, że jeśli F_b/B jest większe od 0,11, ryzyko przewrócenia się statku jest bardzo małe, natomiast gdy F_b/B jest w obszarze 0,07, ryzyko jest znaczne.

Dla statków rybackich w oparciu o analizę regresyjną obliczono minimalną pionową odległość od powierzchni wody w stanie największego zanurzenia do górnej krawędzi nadburcia w jego najniższym punkcie. Dynamiczny model obliczeniowy zakłada ustawienie statku bokiem do fali oraz że prawdopodobieństwo przewyższenia poziomu wody ponad nadburcie nie przekracza 5%. Przy w pełni rozwiniętym falowaniu i wysokości fali $h_f = 4{,}0$ m odległość ta wynosi

$$h_b = 0{,}53 + 0{,}11\ B + 0{,}32(2{,}60 - \frac{B}{T}) + 0{,}85(\delta - 0{,}60) + 0{,}61(h_o - 0{,}70)\ (m) \qquad (9.12)$$

a dla wysokości fali $h_f = 5{,}4$ m

$$h_b = 0{,}80 + 0{,}23(2{,}60 - \frac{B}{T}) + 0{,}52(\delta - 0{,}60) + 0{,}62(h_o - 0{,}70)\ (m) \qquad (9.13)$$

gdzie: T - maksymalne dopuszczalne zanurzenie (m),
δ - współczynnik pełnotliwości kadłuba.

9.4. Oblodzenie statku

Oblodzenie statku wpływa bardzo niekorzystnie na jego stateczność, gdyż podnosi się wówczas znacznie środek ciężkości okrętu. Wpływ oblodzenia należy uwzględnić jedynie na statkach, które są eksploatowane w strefach, gdzie zjawisko to ma miejsce. Przyjmuje się wówczas, że poziome płaszczyzny, jak pokłady, górne powierzchnie nadbudówek, narażone są na dodatkowe obciążenie w ilości 30 kg/m^2, natomiast powierzchnie rzutu bocznego statku przyjmują obciążenie lodu w ilości 15 kg/m^2. Położenie środka ciężkości lodu należy przyjąć zgodnie z wysokością odpowiednich powierzchni. Oblodzenie relingów, wysięgników, takielunku, które nie wchodzą w powierzchnię boczną statku, uwzględnia się w ten sposób, że powiększa się obciążenie od lodu przypadające na powierzchnię boczną o 5%, a moment statyczny od tego obciążenia o 10%.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33

9.5. Wpływ wody na pokładzie

Bardzo niebezpiecznym zjawiskiem, które było już bezpośrednią przyczyną niejednego wypadku, jest obecność wody na pokładzie. Woda może dostać się na pokład w wyniku sztormowej pogody, intensywnego kołysania i stosunkowo niskiej wolnej burty. Jest to szczególnie niebezpieczne, gdy woda ta przez pewien czas pozostaje na pokładzie, gdy nie ma możliwości szybkiego odpływu. Woda taka nie tylko stwarza dodatkowy moment przechylający, ale bardzo znacznie, szczególnie gdy jednostka jest niewielka, podnosi położenie środka ciężkości okrętu.

Uwzględnienie wpływu wody na pokładzie znalazło swój wyraz w przepisach stateczności ZSRR. Kryterium to wymaga zapewnienia odpowiedniej stateczności w stanie załadowania, w którym wysokość metacentryczna jest najmniejsza. Stateczność statku jest wystarczająca, jeśli dynamiczny kąt przechyłu wywołany wodą na pokładzie jest mniejszy od granicznego kąta przechyłu, czyli

$$\phi_d \leqslant \phi_g,$$

gdzie ϕ_g jest równy kątowi zalewania ϕ_z lub kątowi przewracania ϕ_c w zależności od tego, który z tych kątów jest mniejszy. Przyjmuje się, że w chwili, gdy zadziałał moment przechylający wywołany wodą na pokładzie, statek znajduje się w położeniu wyprostowanym. Podczas przechylenia okrętu przegłębienie i wyporność są stałe i równe stanowi pływania bez wody na pokładzie. Pomija się wpływ furt wodnych.

Ramię tego momentu przechylającego określa wzór

$$l_{pw} = 0{,}25\ \overline{M}_{pw}\ \frac{W \cdot B}{V}, \qquad (9.14)$$

gdzie: $\overline{M}_{pw} = f(\phi, \frac{2F_b}{B}, \frac{h_b}{B})$ jest bezwymiarowym współczynnikiem momentu przechylającego. Podany jest on w przepisach Morskiego Rejestru w sposób tabelaryczny i za pomocą wykresu. Zależy od kąta przechyłu ϕ, od stosunku $\frac{2F_b}{B}$, gdzie F_b jest wysokością wolnej burty i stosunku $\frac{h_b}{B}$ gdzie h_b jest wysokością nadburcia. Ten bezwymiarowy moment przechylający ma stromy przebieg i mały zasięg. Oznaczenia podanych wielkości są następujące:

V (m^3) - wyporność statku;

B (m) - szerokość statku;

W (m^3) - objętość wody na pokładzie, która zależy od długości i szerokości pokładówek, nadburcia i wzniosu pokładu i można ją obliczyć z wzoru

$$W = 0{,}8\ K_d \cdot l \cdot b \cdot h,$$

gdzie: l,b,h (m) - długość, szerokość i wysokość pokładu studniowego, które to wymiary są zdefiniowane w przepisach;

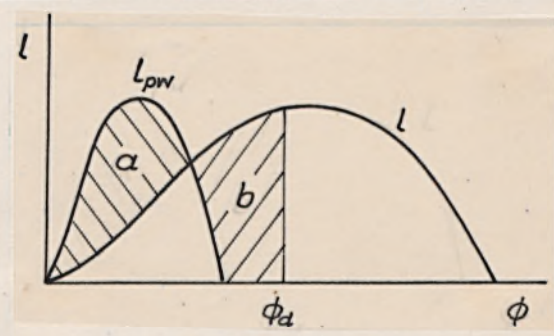
$$K_d = (1 - \frac{l_p \cdot b_p}{l \cdot b})(1 + c \cdot \frac{l_p}{l}) \qquad (9.15)$$

S/242/83PG
1983 01 28
B-5
33
ZGPP

jest współczynnikiem uwzględniającym pokładówki w obrębie pokładu studniowego,

l_p, b_p (m) - długość i szerokość pokładówki na pokładzie studniowym,

c - współczynnik zależny od stosunku szerokości przejścia pomiędzy pokładówką i nadburciem do szerokości pokładu studniowego.



Rys. 9.3

Statek jest uważany za stateczny, jeśli (rys. 9.3)

pole a = polu b.

Dopuszczalną rzędną środka ciężkości okrętu wyznacza się z warunku

$$\int_0^{\phi_d} (l_k - z_G \sin\phi)\,d\phi = 0{,}25\,\frac{W \cdot B}{V} \int_0^{\phi_1} \overline{M}_{pw}(\phi)\,d\phi . \qquad (9.16)$$

Dla danego statku prawa strona równania jest stała, czyli

$$0{,}25\,\frac{W \cdot B}{V} \int_0^{\phi_1} \overline{M}_{pw}(\phi)\,d\phi = a,$$

więc

$$z_G \leqslant \max \frac{\int_0^{\phi_d} l_k\,d\phi - a}{1 - \cos\phi_d}, \qquad (9.17)$$

gdzie: $\phi_d < \phi_g$.

W przygotowaniu jest kryterium IMO uwzględniające wpływ wody na pokładzie. Wykorzystana w nim będzie ta sama zasada, co w kryterium ZSRR.

Furty wodne w nadburciu, utrudniające dostanie się wody na pokład i zabezpieczające pracujących na pokładzie ludzi, a z drugiej strony umożliwiające odprowadzenie wody, są bardzo ważnym elementem bezpieczeństwa statku. Dlatego zabezpieczenia otworów w nadburciu powinny działać sprawnie. Im powierzchnia otworów w nadburciu jest większa, tym szybciej następuje odpływ wody z pokładu. Dla statku rybackiego zaleca się, aby powierzchnia furt wodnych z każdej burty była nie mniejsza od powierzchni określonej poniższym wzorem

$$A = \frac{(1 + 3{,}5\,h_b)\,l_b \cdot h_b}{100}\ , \ (m^2) \qquad (9.18)$$

gdzie: l_b (m) długość nadburcia,

h_b (m) - średnia wysokość nadburcia.

9.6. Stateczność na grzbiecie fali

Jednym z wielu zagrożeń statecznościowych jest pływanie statku na fali nadążającej, szczególnie gdy prędkość statku jest bliska prędkości fali. Zwłaszcza niebezpieczny jest moment, gdy długość fali jest w przybliżeniu równa długości statku, a grzbiet fali znajduje się przy owrężu. Sytuacja

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°

taka dotyczy przede wszystkim statków małych i one są pod tym względem najbardziej zagrożone. Gdy statek jest posadowiony na grzbiecie fali, a w obrębie dziobu i rufy występuje znaczne obniżenie poziomu wody, wówczas następuje zmniejszenie krzywej ramion prostujących. Już wstępne rozpatrzenie momentu bezwładności pola takiej pofałdowanej wodnicy pływania w stanie przechylonym wskazuje na znaczne zmniejszenie momentu, a co za tym idzie, obniżenie punktu metacentrycznego. Krzywą ramion w takim położeniu statku na fali można obliczyć w sposób statyczny. Będzie to oczywiście uproszczenie, gdyż pomija się tu efekty dynamiczne z oscylacyjnymi ruchami okrętu włącznie, da to jednak pewien pogląd na zmianę stateczności na fali i na wpływ wysokości fali. Zmniejszenie krzywej ramion na grzbiecie fali wykazują także wyniki badań modelowych. Krzywą ramion prostujących na grzbiecie fali można oszacować na podstawie podanej poniżej metody [13], która oparta została o wyniki badań doświadczalnych i - jak podają autorzy metody - wyniki obliczeń dają dokładność do 10%. Rzędną krzywej ramion prostujących statku na grzbiecie fali określa wzór:

$$l_f = l + \Delta l_f, \qquad (9.19)$$

gdzie: l - ramię prostujące na wodzie spokojnej,

Δl_f - poprawka na ramię prostujące spowodowana zmianą powierzchni wody wokół kadłuba okrętu.

Poprawka jest równa

$$\Delta l_f = - B \sum_{i=1}^{i=7} A_i f_i(\phi), \qquad (9.20)$$

gdzie: B (m) - szerokość statku,

$f_i(\phi)$ - współczynniki określone doświadczalnie i opisujące wpływ kształtu kadłuba statku, wpływ stromości fali i prędkości statku w postaci liczby Froude'a przy różnych kątach przechyłu. Współczynniki te podane są w tabeli 9.1.

T a b e l a 9.1

Współczynniki zmniejszające krzywą ramion na fali

ϕ	$f_1(\phi)$	$f_2(\phi)$	$f_3(\phi)$	$f_4(\phi)$	$f_5(\phi)$	$f_6(\phi)$	$f_7(\phi)$	
							$F_n > 0{,}28$	$F_n < 0{,}28$
10°	0,084	0,025	0,013	0,015	0,020	0,027	0,006	-0,026
20°	0,176	0,070	0,024	0,023	0,030	0,045	0,015	-0,069
30°	0,310	0,125	0,035	0,037	0,040	0,050	0,026	-0,053
40°	0,410	0,150	0,042	0,045	0,048	0,055	0,033	-0,023
50°	0,465	0,160	0,043	0,050	0,053	0,058	0,038	-0,017

Współczynniki A_i określone są następującymi wzorami:

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/88
B-5
33%

$$A_1 = \frac{h_f}{\lambda}, \qquad A_2 = 0{,}208 - \frac{B}{L_w},$$

$$A_3 = 0{,}375 - \frac{T}{B}, \qquad A_4 = \frac{T}{H} - 0{,}770, \qquad (9.21)$$

$$A_5 = 0{,}700 - \frac{\delta}{\alpha}, \qquad A_6 = 0{,}692 - \frac{\delta}{\beta},$$

$$A_7 = Fn - 0{,}28;$$

gdzie: h_f - wysokość fali,
λ - długość fali,
L_w - długość statku na wodnicy,
T - zanurzenie przy owrężu,
H - wysokość boczna,

δ, α, β - współczynniki pełnotliwości,

$F_n = \frac{\vartheta}{\sqrt{gL_w}}$ - liczba Froude'a.

Jeśli $\frac{L_w}{B} \geqslant 7{,}5$, można przyjąć, że $f_7(\phi) = 0$, gdyż wówczas prędkość statku nie ma dużego wpływu na stateczność. Metodę tę można stosować w zakresie parametrów

$$\frac{L_w}{B} > 3{,}1, \qquad 1{,}6 < \frac{B}{H} < 3{,}75,$$

$$\frac{H}{T} > 1{,}05, \qquad 0{,}55 < \alpha < 0{,}85,$$

$$0{,}55 < \varphi < 0{,}85, \qquad 0{,}22 < Fn < 0{,}36,$$

przy przegłębieniu nie większym od 0,2 T na dziób lub 0,4 T na rufę.

9.7. Kryterium pogody Polskiego Rejestru Statków

Kryterium pogody PRS wynika z uproszczonego modelu kołysania okrętu na fali bocznej przy równoczesnym działaniu wiatru. Przyjmuje się tutaj, że woda jest spokojna, lecz statek kołysze się z pewną amplitudą ϕ_a. W najmniej korzystnym momencie, tzn. gdy statek jest wychylony na burtę przeciwną do kierunku wiatru, następuje uderzenie szkwału, który działa na powierzchnię nawiewu statku z umownym ciśnieniem p. Ciśnienie to jest zróżnicowane w zależności od rejonu żeglugi. Stateczność statku uznaje się za wystarczającą, jeśli w każdym możliwym stanie załadowania dynamicznie działający moment przechylający, wywołany naporem wiatru M_p, jest nie większy od momentu krytycznego M_{kr}, czyli

$$M_p \leqslant M_{kr} \qquad (9.22)$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33

lub

$$K = \frac{l_{pkr}}{l_p} \geqslant 1, \qquad (9.23)$$

tzn., że współczynnik bezpieczeństwa stateczności owego, będący ilorazem krytycznego i aktualnego ramienia przechylającego musi być większy lub równy 1.

Moment przechylający określa wzór

$$M_p = pAz \ (Nm), \qquad (9.24)$$

$p\ (N/m^2)$ - umowne ciśnienie wiatru podane w tabeli 9.2, w zależności od rejonu żeglugi i ramienia naporu wiatru z,

$A\ (m^2)$ - powierzchnia bocznego nawiewu,

$z\ (m)$ - ramię naporu wiatru równe odległości środka ciężkości powierzchni nawiewu A od wodnicy pływania.

Tabela 9.2

Umowne ciśnienie wiatru wg przepisów PRS-u

		Ciśnienie wiatru p (N/m^2)						
Rejon żeglugi	z (m)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
	Nieograniczony	-	706	785	863	922	971	1010
	Ograniczony I	-	402	451	490	520	549	569
	Ograniczony II	197	196	216	235	255	265	275
Rejon żeglugi	z (m)	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7 i więcej
	Nieograniczony	1050	1079	1109	1138	1167	1197	1216
	Ograniczony I	589	608	628	647	667	687	697
	Ograniczony II	284	294	304	314	324	334	343

Nieograniczony rejon żeglugi obejmuje żeglugę wielką, rejon ograniczony I dotyczy żeglugi małej, tj. żeglugi po morzu Północnym i innych morzach otwartych do 200 mil morskich od miejsca schronienia, zaś rejon ograniczony II obejmuje żeglugę przybrzeżną, czyli do 50 mil morskich od miejsca schronienia.

Moment przechylający przyjmuje się jako stały w całym zakresie kątów przechyłu. Przyjmuje się, że moment ten pochodzący od naporu wiatru tworzy parę sił z siłą bezwładności, która działa, zgodnie z założeniem, na wysokości wodnicy pływania. Zamiast momentu chętniej stosuje się ramię przechylające równe

$$l_p = \frac{M_p}{D} \ (m)$$

Amplitudę kołysania oblicza się wg wzoru

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°/₀

$$\phi_a = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot Y \quad \text{(stopnie)}, \qquad (9.25)$$

gdzie: Y - amplituda kołysań statku w zależności od rejonu żeglugi i stosunku $\frac{\sqrt{h_o}}{B}$, gdzie B jest szerokością statku na wodnicy konstrukcyjnej, dla statków o stosunku $B/T \leqslant 2,4$ i współczynniku pełnotliwości kadłuba $\delta \geqslant 0,70$, bez stępek przechyłowych lub belkowych. Wartości tej amplitudy Y podane są w tabeli 9.3.

T a b e l a 9.3

Amplitudy kołysań statku Y (stopnie)

$\sqrt{h_o}/B(m^{-1/2})$	$\leqslant$0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	$\geqslant$0,13
nieograniczony rejon żeglugi	24,0	25,0	27,0	29,0	30,7	32,0	33,4	34,4	35,3	36,0
ograniczony rejon I i II	16,0	17,0	19,7	22,8	25,4	27,6	29,2	30,5	31,4	32,0

X_1 - współczynnik poprawkowy, uwzględniający wpływ stosunku B/T na amplitudę kołysań. Podany jest w tabeli 9.4.

T a b e l a 9.4

Współczynnik poprawkowy X_1

B/T	$\leqslant$2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	$\geqslant$3,5
X_1	1	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80

X_2 - współczynnik poprawkowy, uwzględniający wpływ współczynnika pełnotliwości kadłuba δ na amplitudę kołysań. Podany jest w tabeli 9.5.

T a b e l a 9.5

Współczynnik poprawkowy X_2

δ	$\leqslant$0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	$\geqslant$0,70
X_2	0,75	0,82	0,89	0,95	0,97	1

X_3 - współczynnik poprawkowy, uwzględniający wpływ stępek przechyłowych lub belkowych na amplitudę kołysań. Współczynnik ten zależy od stosunku $S_{sp}/L \cdot B$, gdzie S_{sp} jest sumaryczną powierzchnią stępek przechyłowych i stępki belkowej. Podany jest w tabeli 9.6.

Tabela 9.6

Współczynnik poprawkowy X_3

$100\,\frac{S_{sp}}{LB}$	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	$\geqslant 4$
X_3	1	0,98	0,95	0,88	0,79	0,74	0,72	0,70

Kryterium PRS wymagające, aby współczynnik bezpieczeństwa K był większy od 1 jest równoważne zależności

$$\phi_d \leqslant \min(\phi_z, \phi_c), \qquad (9.26)$$

tzn. aby kąt równowagi dynamicznej okrętu pod wpływem obliczonego momentu przechylającego był nie większy od kąta zalewania ϕ_z lub od kąta przewracania okrętu ϕ_c w zależności od tego, który z tych kątów jest mniejszy.

Dynamiczny kąt przechyłu wyznacza się zgodnie z rys. 8.42 lub 8.43.

Celowym jest rozwikłanie tego kryterium, podobnie jak to zrobiliśmy w poprzednich przypadkach przez określenie dopuszczalnej rzędnej środka ciężkości okrętu spełniającej to wymaganie. Rzędną tę można wyznaczyć w podany poniżej sposób. Zakładamy, że okręt kołysze się swobodnie wokół położenia wyprostowanego $\phi = 0$ z amplitudą ϕ_a. Na statek zadziałał szkwał, gdy był on wychylony na burtę przeciwną, czyli $\phi = -\phi_a$, a prędkość kątowa kołysania jest równa zero $\dot{\phi}_a = 0$. Kąt równowagi dynamicznej wyznaczymy z warunku (8.128), który przyjmuje postać

$$\int_{-\phi_a}^{\phi_d} l_d \, d\phi = \int_{-\phi_a}^{\phi_d} l_p \, d\phi \, . \qquad (9.27)$$

Ponieważ $l_p = \text{const}$, równanie można przedstawić w postaci

$$\int_{-\phi_a}^{\phi_d} (l_k - z_G \sin\phi) \, d\phi = l_p(\phi - \phi_a). \qquad (9.28)$$

Ponieważ ϕ_a jest kątem ujemnym, musimy znać wartości l_k i l_{kd} dla kątów ujemnych. Ramiona kształtu w funkcji kąta przechyłu są funkcją nieparzystą.

Obliczmy teraz wartość pola pod krzywą $l_k(\phi)$ po stronie ujemnych kątów ϕ.

Zastosujmy podstawienie

$$\phi = -\phi' \; ; \quad d\phi = -d\phi' \; ; \quad l_k(-\phi) = -l_k(\phi'),$$

stąd

$$-\int_0^{\phi_a} l_k(\phi')(-d\phi') = \int_0^{\phi_a} l_k(\phi') \, d\phi' \, .$$

S/14/85 PG MS S/272/88
B-5
33

Wynika z tego, że tylko $1_k(\phi)$ jest funkcją nieparzystą, zaś $1_{kd}(\phi)$ jest funkcją parzystą, a więc

$$1_k(\phi) = -1_k(-\phi), \tag{9.29}$$

$$1_{kd}(\phi) = 1_{kd}(-\phi). \tag{9.30}$$

Wzór (9.29) można więc przekształcić dalej

$$1_{kd}(\phi_d) - 1_{kd}(\phi_a) - z_G(\cos\phi_a - \cos\phi_d) = 1_p(\phi_d - \phi_a),$$

a stąd rzędna środka ciężkości okrętu jest równa

$$z_G = \frac{1_{kd}(\phi_d) - 1_{kd}(\phi_a) - 1_p(\phi_d - \phi_a)}{\cos\phi_a - \cos\phi_d} \tag{9.31}$$

lub

$$z_G = \frac{\left[1_{kd}(\phi_d) - 1_p\cdot\phi_d\right] - \left[1_{kd}(\phi_a) - 1_p\cdot\phi_a\right]}{(1-\cos\phi_d) - (1-\cos\phi_a)}, \tag{9.32}$$

gdzie

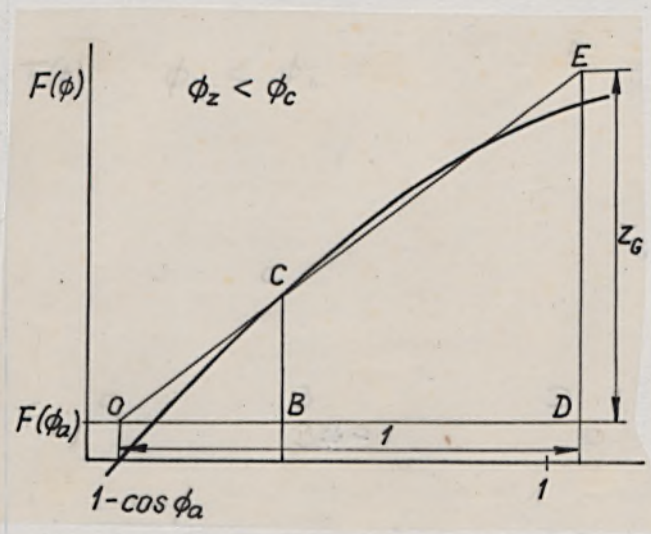
$$1_{k_d}(\phi_d) = \int_0^{\phi_d} 1_k(\phi)\,d\phi \ . \tag{9.33}$$

Wygodnie jest wprowadzić następującą funkcję

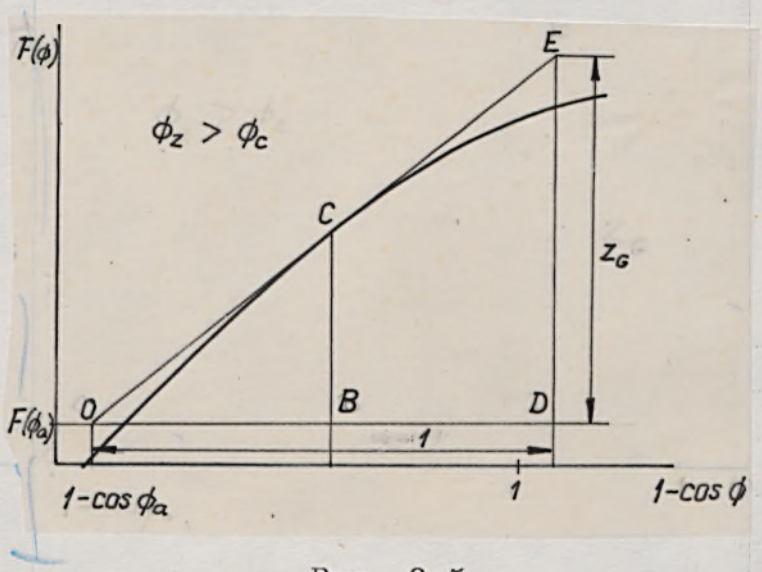
$$F(\phi) = 1_{kd}(\phi) - 1_p\phi \ , \tag{9.34}$$

a wówczas wzór (9.33) przyjmuje postać

$$z_G = \frac{F(\phi_d) - F(\phi_a)}{(1-\cos\phi_d)-(1-\cos\phi_a)} \ , \tag{9.35}$$



Rys. 9.4



Rys. 9.5

W rozwiązaniu tym $\phi_a < 0$, a stała $F(\phi_a) > 0$. Równanie (9.36) najłatwiej jest rozwiązać, jak pokazano na rys. 9.4, gdy $\phi_z < \phi_c$ i na rys. 9.5, gdy $\phi_z > \phi_c$. W tym celu wykonać należy wykres $F(\phi)$, z tym, że na osi odciętych odkładamy wartość $1-\cos\phi$.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/242/88
B-5
33%

Z podobieństwa trójkątów OBC i ODE stosunki boków są równe

$$\frac{DE}{OD} = \frac{BC}{OB}$$

Odcinek DE = z_G, gdyż zgodnie ze wzorem (9.36) odcinek

$$OB = (1 - \cos \phi_d) - (1 - \cos \phi_a),$$

$$BC = F(\phi_d) - F(\phi_a),$$

$$OD = 1.$$

Punkt przecięcia C prostej OE, gdy $\phi_z < \phi_c$, lub punkt styczności C, gdy $\phi_z > \phi_c$, wyznaczają graniczny punkt równowagi dynamicznej ϕ_d.

Należy tu jednak zwrócić uwagę, że konstrukcja ta mająca na celu wyznaczenie z_G jest możliwa, gdy znamy na wykresie położenie punktu O, czyli gdy znamy amplitudę ϕ_a. Kąt ten zależy od wysokości metacentrycznej h_o, czyli od z_G. Z tego też względu zadanie to należałoby rozwiązać metodą kolejnych przybliżeń, tzn. przyjąć pewne h_o, stąd określić z_G i kąt ϕ_a, a znając dopuszczalne ϕ_d wyznaczyć $z_{G\ kryt}$. Gdy to z_G różni się od przyjętego z_G, do następnego przybliżenia należy użyć $z_{G\ kryt}$. Praktycznie punkt O bardzo mało przemieszcza się przy zmianie kąta ϕ_a i już zerowe przybliżenie daje wystarczająco dokładny wynik.

Przepisy PRS-u wymagają także, aby zakres krzywej ramion stateczności statycznej był dodatni w zakresie do przechyłu 60°. Prócz więc dodatniej początkowej wysokości metacentrycznej musi być spełniony warunek:

$$l = l_{k60^o} - z_G \sin 60^o \geqslant 0$$

czyli

$$z_G \leqslant \frac{l_{k60^o}}{\sin 60^o} = 1{,}1547\ l_{k60^o} \quad (m) \qquad (9.36)$$

gdzie:

l_{k60^o} - jest wartością ramienia kształtu dla $\phi = 60^o$.

9.8. Informacja o stateczności dla kapitana statku

Informacja o stateczności, dająca pełną charakterystykę stateczności-ową danego statku i która winna znajdować się w posiadaniu kapitana, z reguły zawiera niektóre lub wszystkie następujące elementy:

- Zestawienie podstawowych charakterystyk statku jak jego przeznaczenie, rejon pływania, wymiary główne, moc napędu, prędkość, nośność, pojemność itp.
- Tabela z danymi stateczności owymi i krzywe ramion dla typowych stanów załadowania.
- Plan ładunkowy, podający objętość wszystkich ładowni, włączając zbiorniki, ich środki objętości oraz wpływ swobodnych powierzchni przy niepełnych zbiornikach.
- Krzywe lub tabele dla określenia środków objętości przy częściowo zapełnionych ładowniach i zbiornikach.

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP

S/272/83 PG

- Skalę załadowania i konieczne dane hydrostatyczne.
- Wskazówki dla określenia wystarczającej stateczności w każdym stanie zanurzenia i rozmieszczenia ładunku.
- Instrukcję dla uproszczonego określenia początkowej wysokości metacentrycznej za pomocą próby kołysania.
- Gotowe formularze umożliwiające samodzielne wykonanie koniecznych obliczeń statecznościowych.
- Wskazówki dotyczące poprawy stateczności, np. poprzez balastowanie.

Lista ta w zależności od typu i wielkości statku może być jeszcze uzupełniona o dodatkowe informacje.

Jeśli chodzi o typowe stany załadowania [9], to przepisy stateczności na ogół wymagają obliczeń dla następujących standardowych stanów:

A. Statki pasażerskie i towarowe.

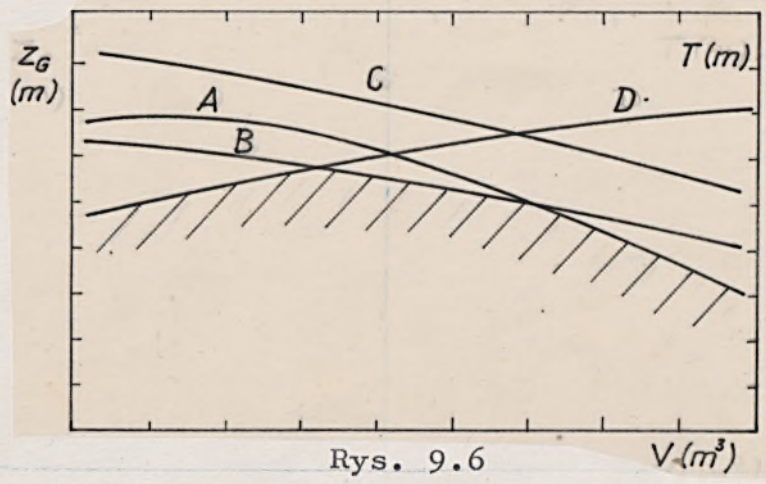
1. Statek całkowicie załadowany na wyjściu z portu, z pełnymi zapasami, paliwem itp.
2. Statek całkowicie załadowany na wejściu do portu z 10% zapasów, paliwa itp.
3. Statek bez ładunku, lecz z pełnymi zapasami, paliwem, itp. oraz z pełną liczbą pasażerów (statki pasażerskie).
4. Statek na wyjściu z portu jak w stanie 1, lecz z ładunkiem pokładowym (statki towarowe).
5. Statek jak w stanie 3, lecz z 10% zapasów, paliwa itp. (statki towarowe).

B. Statki rybackie

1. Statek na wyjściu z portu, z pełnymi zapasami, paliwem, lodem, narzędziami połowowymi itp.
2. Statek opuszczający łowisko z pełnym połowem.
3. Statek na dojściu do portu z pełnym połowem i z 10% zapasów, paliwa itp.

Podane tu stany nie wykluczają innych, gdyż w zależności od specyficznych cech danego statku może wystąpić inny, bardziej statecznościowo niekorzystny stan załadowania. Kapitan winien mieć pełne rozeznanie co do stateczności swojego okrętu. Jak widać z rozpatrywanych kryteriów stateczności, każdemu z nich można przyporządkować, przy zadanej wyporności statku, jedną maksymalną wartość rzędnej środka ciężkości okrętu z_G. Dla danego kryterium można więc obliczyć tę maksymalną rzędną i dla innych możliwych w eksploatacji wyporności. Jeżeli przepisy wymagają, aby jednocześnie okręt spełniał wymagania i innych kryteriów, to wówczas można dla tych wszystkich kryteriów policzyć $z_{G\ kryt}$ i wykreślić je w funkcji wyporności statku. Wówczas dopuszczalne położenie środka ciężkości, spełniające wymagania wszystkich uwzględnionych kryteriów, np. A,B, C będzie się znajdowało poniżej obwiedni wykreślonej dla tych obliczonych krzywych (rys. 9.6). Taki dokument przygotowany przez biuro obliczeniowe pozwoli kapitanowi na takie ładowanie statku, aby zawsze spełniać wymagania przepisów, a obliczenia na statku sprowadzają się wówczas do kontroli położenia środka ciężkości okrętu wzwyż.

S/2724/85PG



Rys. 9.6

9.9. Uwagi końcowe

Podane powyżej informacje mają na celu przedstawienie niektórych tylko problemów związanych ze statecznością okrętu w warunkach rzeczywistych. Z przytoczonych kryteriów widać dążenia do ustalenia prawidłowych norm stateczności. Z jednej strony zaniżone kryteria stateczności powodują zmniejszenie bezpieczeństwa statku, zaś z drugiej strony zawyżenie wymagań prowadzi do obniżenia efektywności ekonomicznej eksploatowanych statków i nie zawsze oznacza zwiększenie bezpieczeństwa, gdyż często prowadzi to do pogorszenia właściwości morskich okrętu w postaci np. zmniejszenia okresu kołysań, wzrostu obciążeń konstrukcji okrętu itp. Spełnienie wymagań stateczności owych wcale też nie gwarantuje 100% bezpieczeństwa statku. Wypadki stateczności owe wydarzyły się już kilkakrotnie i dotyczyły one statków, które całkowicie spełniały kryteria IMO. Dochodzą tu więc jeszcze czynniki ludzkie, kwalifikacje załogi i kapitana, czyli to, co potocznie określa się terminem „dobrej praktyki morskiej". Prócz odpowiedniego rozmieszczenia ładunku podstawowe znaczenie ma także zamocowanie ładunku uniemożliwiające jego przesunięcie się na morzu podczas kołysań statku.

Kryteria IMO ustalone zostały na drodze statystycznej poprzez porównanie parametrów stateczności statków, które przez lata całe były eksploatowane bezpiecznie, z parametrami stateczności statków, które zatonęły na skutek niewystarczającej stateczności. Kryterium PRS oparte jest na bardziej racjonalnych przesłankach, gdyż uwzględnia ono, choć w sposób bardzo uproszczony, wpływ wiatru i falowania morza. Widać stąd, że szeroko wykorzystuje się tu statyczne metody obliczeń, gdyż wprowadzenie nawet pewnych elementów dynamicznych nie wyklucza tu krzywej ramion stateczności statycznej wyznaczonej dla wody spokojnej.

Obecnie istnieją tendencje [10], aby normy stateczności oprzeć na analizie ruchów okrętu pod wpływem sił działających na statek, które to siły pochodzą od wiatru i fali na wzburzonym morzu i mają charakter losowy. Działanie fali na statek jest zjawiskiem złożonym, polegającym na:

- wytworzeniu momentów wymuszających kołysanie statku,
- wytworzenie momentów przechylających przez wodę wpadającą na pokład,
- wytworzeniu momentów przechylających przez dodatkowe parcie na burty okrętu.

1986 06 17
B-5
33°/°
ZGPP

S/272/88 PG

Statystyki wypadków stateczności owych wykazują, że większość wypadków zdarza się przy ciężkiej pogodzie, pod działaniem wiatru i fali, a w szczególności dotyczy to trzech kursów względem fali:
- na fali bocznej,
- na fali nadążającej,
- na fali skośnej od rufy (baksztagowej),

na co nakłada się jeszcze działanie wiatru. Nagłe przewrócenie się statku przy porywie wiatru może się zdarzyć na stosunkowo spokojnej wodzie, jeśli boczna powierzchnia nawiewu jest dostatecznie duża, zaś stateczność stosunkowo mała. W rzeczywistości szereg wypadków przewrócenia się statku zdarzyło się i na wodzie spokojnej, gdzie przyczyną przewrócenia było działanie obciążeń zewnętrznych, łatwych do przewidzenia. Takie wypadki spowodowane są najczęściej niedbalstwem załogi lub brakiem podstawowych wiadomości o stateczności statku. Dlatego też umiejętność obliczenia stateczności statku, choć w sposób jeszcze tak niedoskonały, statyczny, daje podstawy bezpieczeństwa statku w czasie jego eksploatacji w porcie i na morzu.

Przykład 9.1

Statek towarowy o długości $L = 150$ m, dla którego dana jest pełna dokumentacja, pływa bez przegłębienia w wodzie o $\rho = 1025$ kg/m^3 przy zanurzeniu $T = 6{,}0$ m z przechyłem na prawą burtę $\phi = 2{,}40^\circ$. Rzędna środka ciężkości okrętu $z_G = 8{,}40$ m. Na statek przyjęto następujące masy wyrażone w tonach w punktach o współrzędnych (x,y,z): $m_1 = 1950$ (-15,5; -0,45; 7,7), $m_2 = 1460$ (19,8; +0,40; 8,8), $m_3 = 1120$ (-19,0; -0,27; 9,4).

a) Obliczyć kąt przechyłu i zanurzenie dziobu i rufy po załadunku.
b) Co trzeba zrobić, aby wyrównać przechył?
c) Ocenić stateczność statku w nowym stanie załadowania.

Rozwiązanie:

Z krzywych hydrostatycznych dla $T = 6{,}0$ odczytujemy:
wyporność $V = 10540$ m^3, stąd $M = \varepsilon \cdot \rho \cdot V = 10856$ t,
odcięta środka wyporu $x_F = x_G = -1{,}12$ m,
rzędna metacentrum $z_M = 9{,}16$ mm,
a stąd wysokość metacentryczna w początkowym stanie $h_o = 9{,}16 - 8{,}40 = 0{,}76$ m.
Statek ma przechył, ponieważ środek ciężkości okrętu nie leży w płaszczyźnie symetrii. Współrzędna y_G jest równa

$$y_G = h_o \cdot \operatorname{tg} \phi = 0{,}76 . \operatorname{tg} 2{,}4^\circ = 0{,}03 \text{ m}.$$

Współrzędne środka ciężkości okrętu po załadowaniu obliczymy w tabeli 9.7

1986 06 17
B-5
33°/°
ZGPP

Tabela 9.7

m_i (t)	x_i (m)	$m_i x_i$ (tm)	y_i (m)	$m_i y_i$ (tm)	z_i (m)	$m_i z_i$ (tm)
10856	-1,12	-12159	+0,03	+326	8,40	91190
1950	-15,50	-30225	-0,45	-877	7,70	15015
1460	+19,80	+28908	+0,40	+584	8,80	12848
1120	-19,00	-21280	-0,27	-302	9,40	10528
15386	$\sum m_i x_i =$	-34756	$\sum m_i y_i =$	-269	$\sum m_i z_i =$	129581

$$x_G = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{-34756}{15386} = -2{,}26 \text{ m}$$

$$y_G = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} = \frac{-269}{15386} = -0{,}02 \text{ m}$$

$$z_G = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = \frac{129581}{15386} = 8{,}42 \text{ m}$$

Nowa wyporność $V = \frac{\sum m_i}{\varepsilon \varrho} = \frac{15386}{1{,}03} = 14938 \text{ m}^3$, dla której z krzywych hydrostatycznych odczytać można nowe zanurzenie średnie T = 8,26 m i rzędną metacentrum $z_M = 9{,}06$ m. Nowa wysokość metacentryczna h_{o_1} = = 9,06 - 8,42 = 0,64 m, a kąt przechyłu

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{M_{px}}{M \cdot h_o} = \frac{-269}{15386 \cdot 0{,}64} = 0{,}0273,$$

$$\phi = -1{,}56^\circ \text{ na lewą burtę.}$$

Aby wyrównać przechył, należy wytworzyć moment na prawą burtę $M_{px} = 269$ tm, tzn. np. przesunąć 100 t na odległość y = 2,69 m. Z krzywych hydrostatycznych dla T = 8,26 m należy jeszcze odczytać następujące wielkości:

odciętą środka wyporu	$x_F = -1{,}96$ m,
odciętą środka ciężkości wodnicy	$x_C = -5{,}06$ m,
rzędną środka wyporu	$z_F = 4{,}46$ m,
duży promień metacentryczny	$R_o = 147{,}5$ m.

1986 06 17
B-5
33°/₀
ZGPP

S/272/88 PG

Stąd podłużna wysokość metacentryczna

$$H_o = z_F + R_o - z_G = 4,46 + 147,5 - 8,42 = 143,54 \text{ m.}$$

Kąt przegłębienia $tg\,\Theta = \frac{x_G - x_F}{H_o} = \frac{-2,26 + 1,96}{143,54} = -0,002090.$

Zanurzenie dziobu

$$T_D = T + (\frac{L}{2} - x_c)tg\,\Theta = 8,26 - (75 + 5,06)0,00209 = 8,09 \text{ m.}$$

Zanurzenie rufy

$$T_R = T - (\frac{L}{2} + x_c)tg\,\Theta = 8,26 + (75 - 5,06)0,00209 = 8,41 \text{ m.}$$

Sprawdzenie stateczności polegać będzie na obliczeniu w tabeli 9.8 dla tego stanu załadowania krzywej ramion stateczności statycznej i krzywej ramion stateczności dynamicznej. Podane w tej tabeli wartości ramion kształtu l_k zostały odczytane z pantokaren dla V = 14938 m^3, a $\sum$ obliczone wg schematu podanego w tabeli 3.2.

Tabela 9.8

ϕ^o	10	20	30	40	50	60	70	80	90
l_k(m)	1,57	3,17	4,80	6,33	7,55	8,37	8,82	8,92	8,71
8,42 sinϕ	1,46	2,88	4,21	5,41	6,45	7,29	7,91	8,29	8,42
l(m)	0,11	0,29	0,59	0,92	1,10	1,08	0,91	0,63	0,29
$\sum$	0,11	0,51	1,39	2,90	4,92	7,10	9,09	10,63	11,55
l_d(m)	0,01	0,04	0,12	0,25	0,43	0,62	0,79	0,93	1,01

Z obliczonych wartości widać, że wszystkie wymagania statecznościowe są spełnione i statek odznacza się bardzo dobrą statecznością.

B-5
33°

10. NIEZATAPIALNOŚĆ OKRĘTU

„... Można sobie czasem wyobrazić, czym jest ostatnia scena z życia statku i jego załogi, podobna do dramatu przez swą walkę z wielką potęgą, bezkształtną, nieuchwytną, chaotyczną i tajemniczą - jak los".

10.1. Wiadomości ogólne

Niezatapialnością nazywamy zdolność okrętu do zachowania pływalności, stateczności i niezbędnych właściwości morskich w wypadku wdarcia się wody do wnętrza kadłuba. Zdolność tę uzyskuje się przez właściwe rozmieszczenie grodzi i pokładu grodziowego ograniczających przedziały zalane wodą. Niezatapialność okrętu obejmuje dwa zasadnicze zagadnienia:

1. Określenie położenia równowagi i stateczności okrętu przy danym rozmieszczeniu grodzi i pokładów wodoszczelnych po zalaniu poszczególnych przedziałów lub grup przedziałów, czyli tzw. stateczność awaryjną, i
2. ustalenie ilości grodzi i pokładów wodoszczelnych i właściwe ich rozmieszczenie na projektowanym okręcie, czyli tzw. pływalność awaryjną.

Stateczność awaryjna wiąże się więc z obliczeniami kąta przechyłu i zanurzenia dziobu i rufy oraz określeniem zapasu stateczności po ewentualnej awarii, natomiast pływalność awaryjna ma na celu ustalenie długości zatapialnej, tzn. takich odległości między grodziami wodoszczelnymi, aby po zalaniu określonej przepisami ilości przedziałów okręt mógł utrzymać się na powierzchni wody.

Ten dział statyki okrętu sięga drugiej połowy XIX wieku. Początkowe prace nad niezatapialnością dotyczyły okrętów wojennych. Brak w tamtych czasach właściwego podziału wnętrza kadłuba na szereg niezależnych przedziałów wodoszczelnych powodował, że okręty w warunkach bojowych po odniesieniu uszkodzeń były nieprzystosowane do utrzymania się na wodzie i masowo tonęły, np. w bitwie pod Cuszimą. Prace nad niezatapialnością statków pasażerskich przyspieszyła słynna katastrofa transatlantyka „Titanic", który w 1912 r. zatonął przy spokojnym stanie morza po kolizji

8. 11. 1984
B-5
33

z górą lodową. Przypadków zatonięć pociągających za sobą wiele ofiar kroniki wypadków notują wiele, większości z nich udałoby się uniknąć przy odpowiedniej konstrukcji i podziale przestrzennym kadłuba okrętu.

Dążność do podniesienia bezpieczeństwa w międzynarodowych podróżach morskich na statkach pasażerskich znalazła swój wyraz w konwencji z 1929r. Konwencja ta objęła jedynie pływalność awaryjną, przyjmując jako miarę bezpieczeństwa okrętu mnożnik podziałowy i uzależniając go od tzw. wskaźnika rodzaju służby. Wskaźnik ten w sposób liczbowy wyraża zasadnicze przeznaczenie danego statku, a tym samym ocenia jego względną ważność. Następna konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (SOLAS) z 1948 r., poza zwiększeniem wymagań dla statków przewożących w żegludze międzynarodowej na krótkich trasach dużą liczbę pasażerów, nie wprowadziła wiele nowego, jednak istotnym postępem było wprowadzenie, choć bardzo łagodnych, wymagań dotyczących stateczności awaryjnej.

W 1956 roku doszło do zderzenia przy spokojnym stanie morza dwu statków pasażerskich - włoskiego liniowca „Andrea Doria" ze szwedzkim „Stockholm", w wyniku którego włoski statek przewrócił się i zatonął, mimo że spełniał wymagania konwencji z 1948 r. Świadczyło to o niedoskonałości dotychczasowych wymagań. W roku 1960 doszło do uchwalenia w Londynie nowej konwencji, która jednak nie wprowadziła zasadniczych zmian w dotychczasowych wymaganiach. Konwencja ta, podobnie jak i poprzednie, bardzo drobiazgowo normuje pływalność awaryjną, a niezmiernie mało uwagi poświęca stateczności awaryjnej.

Od dawna podnosiły się głosy, że wymagania winny być odwrócone, że to stateczność awaryjna winna decydować o niezatapialności, a nie pływalność okrętu. Lepiej już, jeśli okręt utonie, ale nie utraci stateczności. Z obserwacji bowiem wynika, że gdy statek tonie w pozycji wyprostowanej lub bliskiej wyprostowanej, to odbywa się to zazwyczaj powoli, trwa to przez pewien czas, od kilku czy kilkunastu minut do kilkunastu godzin. Jest wówczas dosyć czasu na ratowanie ludzi. Natomiast utrata stateczności uszkodzonego okrętu, przewrócenie się okrętu, trwa bardzo krótko, nawet kilka sekund, co uniemożliwia użycie jakichkolwiek środków ratunkowych, brak często czasu na opuszczenie okrętu przez ludzi. Stąd zagadnienia statecznościowe muszą być pierwszoplanowe.

Na bezpieczeństwo statku mają wpływ różne elementy, jak np. wejście w kolizję z drugim statkiem czy z przeszkodą na torze wodnym, długość i położenie uszkodzenia, stopień zatopienia przedziału i stan załadowania statku, stan morza itp. - wszystkie te wielkości mają charakter losowy. Można więc jedynie mówić o prawdopodobieństwie niezatapialności, które jest równoznaczne z prawdopodobieństwem przetrwania kolizji przez statek. Obecnie istnieje zdecydowany pogląd, że przepisy niezatapialności należy opierać na koncepcji probabilistycznej, przyjmując za miarę bezpieczeństwa prawdopodobieństwo przetrwania kolizji.

Prace nad niezatapialnością dotyczą obecnie wszystkich typów statków. O ile początkowo w dobie wielkich i licznych statków pasażerskich usiłowano podnieść bezpieczeństwo podróży morskich, to obecnie na plan pierw-

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/83
B-5
33%

szy wysuwa się zabezpieczenie naturalnego środowiska, poprzez zapewnienie odpowiedniej niezatapialności statkom towarowym. Wielkim zagrożeniem środowiska naturalnego jest dziś katastrofa zbiornikowca przewożącego tysiące ton ropy lub jej produktów pochodnych, czy też chemikaliów, jak również katastrofa okrętu z napędem jądrowym. Widać z tego, jak ważną rolę w dziedzinie projektowania okrętu odgrywa i ten dział statyki okrętu.

Podział statku, szczególnie towarowego, grodziami wodoszczelnymi na dużą ilość przedziałów, jest niechętnie widziany przez armatorów. Psuje to ciągi komunikacyjne wewnątrz statku, a ładownie stają się mało operatywne. Stąd tendencje ograniczenia do minimum przedziałów wodoszczelnych. Od wielu lat instytucje klasyfikacyjne, doceniając znaczenie podziału wewnątrz kadłuba, wymagały dla każdego statku dwu grodzi tzw. zderzeniowych, na dziobie i rufie oraz oddzielenia grodziami przedziału maszynowego. Większa wymagana ilość grodzi dla statków towarowych miała związek z wytrzymałością kadłuba i bezpieczeństwem przeciwpożarowym, a nie z niezatapialnością. Obecnie wymagania zmieniają się i dla tej grupy statków.

Po uszkodzeniu statku i wdarciu się wody do wnętrza kadłuba objętość wody wypełniającej zalany przedział jest mniejsza od teoretycznej objętości danego przedziału obliczonej na podstawie skali Bonjeana lub linii teoretycznych. W każdym pomieszczeniu znajdują się różne elementy konstrukcyjne jak usztywnienia, węzłówki itp., czy mechanizmy i wyposażenie, a w ładowniach ładunek. Stosunek objętości wody w danym przedziale do jego objętości teoretycznej nazywamy stopniem zatopienia

$$\mu = \frac{v}{v_t} . \qquad (10.1)$$

Orientacyjne wartości tego współczynnika zestawione są w tabeli 10.1.

T a b e l a 10.1

Stopnie zatopienia przedziałów

Pomieszczenie	Stopień zatopienia μ
Puste zbiorniki dna podwójnego, zbiorniki głębokie	0,98
Siłownie	0,85
Ładownie zwykłe i chłodzone	0,60
Pomieszczenia ładunkowe poziomego ładowania	0,89
Ładownie puste niechłodzone	0,95
Ładownie puste chłodzone	0,93
Ładownie zapełnione drewnem	0,35
Ładunek w kontenerach, naczepach, ciężarówkach	0,71
Pomieszczenia mieszkalne	0,95

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS s/272/89
B-5
33%

Przy obliczaniu utraconej powierzchni wodnicy pływania i jej momentu bezwładności także należy zmniejszać ich wartości obliczone z linii teoretycznych o wartość stopnia zatopienia, czyli

$$s = \mu \cdot s_t \quad \text{i} \quad i_x = \mu \cdot i_{x_t}. \tag{10.2}$$

W zależności od rodzaju uszkodzenia i położenia przedziału dzielimy zatopione przedziały na trzy kategorie [12]. Przedział kategorii pierwszej to przedział znajdujący się poniżej linii wodnej, zakryty z góry i całkowicie zapełniony przez wodę. Jest to np. zbiornik dna podwójnego. Ilość wody w takim przedziale jest wielkością stałą. Przedział drugiej kategorii jest otwarty z góry, nie posiada kontaktu z wodą zaburtową, a wewnątrz przedziału występuje swobodna powierzchnia wody. Zakłada się tu, że ilość wody wewnątrz przedziału nie zmienia się. Przypadek taki może mieć miejsce, gdy przebicie poszycia jest niewielkie lub zostało ono uszczelnione przez załogę lub przedział został zatopiony świadomie w celu wyrównania przechyłu. Przedział kategorii trzeciej jest przypadkiem najbardziej ogólnym. Przedział jest z góry otwarty i ma kontakt z wodą zaburtową. Przy zmianie przechyłu lub przegłębienia poziom wody w przedziale zawsze pokrywa się z poziomem wody zaburtowej.

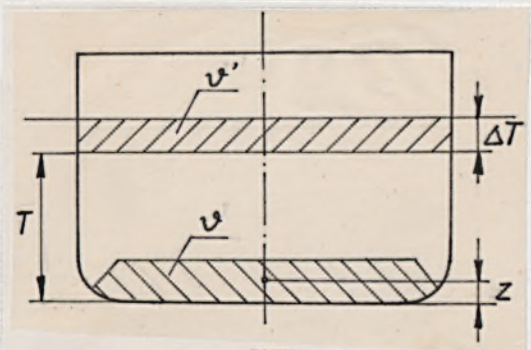
10.2. Metoda przyjętego ciężaru i stałej wyporności

W obliczeniach położenia okrętu względem wody po awarii stosować można, w zależności od kategorii uszkodzonego przedziału, albo metodę przyjętego ciężaru, albo metodę stałej wyporności. I tak np. dla przedziału kategorii pierwszej można przyjąć, że zatopienie zbiornika jest równoznaczne z przyjęciem ładunku o odpowiednim ciężarze w postaci ciała stałego. Przy przedziale kategorii drugiej także można stosować metodę przyjętego ciężaru, lecz ładunek jest tu płynny, konieczne jest więc uwzględnienie wpływu swobodnej powierzchni. Dla przedziału trzeciej kategorii, gdzie ilość wody wewnątrz kadłuba jest zmienna, można stosować jedynie metodę stałej wyporności. W metodzie tej przyjmuje się, że uszkodzenie okrętu i zalanie przedziału nie powoduje zmiany ciężaru okrętu i położenia jego środka ciężkości, czyli wyporność jego jest stała, zmienia się jednak kształt podwodnej części kadłuba, gdyż zatopiony przedział nie bierze już udziału w pływalności okrętu. Metoda stałej wyporności może być także zastosowana dla przedziału pierwszej kategorii, przy wyłączeniu objętości takiego zbiornika z pierwotnego kształtu okrętu, lecz wówczas nowa wodnica pływania jest nieuszkodzona i wartość jej pola i momentów bezwładności odczytujemy z krzywych hydrostatycznych bez poprawek na uszkodzenie. W zasadzie jednak metodę przyjętego ciężaru stosuje się przy przedziałach pierwszej i drugiej kategorii, natomiast metodę stałej wyporności dla przedziału kategorii trzeciej.

Przy zatopieniu zbiornika dna podwójnego przy zastosowaniu metody przyjętego ciężaru zmiana zanurzenia wynosi (rys. 10.1)

S/272/88PG

B-5
33
ZGPP



Rys. 10.1

$$\Delta T = \frac{\vartheta}{S_{wl}}, \qquad (10.3)$$

gdzie $\vartheta = \mu \vartheta_t$ jest objętością wody w zatopionym przedziale. Nowa wysokość metacentryczna jest równa

$$h_{o_1} = h_o + \frac{\vartheta}{V_o + \vartheta}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \varrho_B - z - h_o\right), \qquad (10.4)$$

lecz gdy burty są pionowe, $\varrho_B = 0$.

Gdy zatopiony zbiornik jest asymetryczny względem płaszczyzny symetrii okrętu, wystąpi przechył

$$\operatorname{tg}\phi = -\frac{\vartheta \cdot y}{(V_o + \vartheta) h_{o_1}}, \qquad (10.5)$$

gdzie y jest odległością środka ciężkości zatopionego zbiornika od płaszczyzny symetrii okrętu. Nowe zanurzenie dziobu i rufy okrętu będzie równe

$$T_D = T + \Delta T + \left(\frac{L}{2} - x_c - \frac{1}{2} \cdot \varrho_L \operatorname{tg}\theta\right)\operatorname{tg}\theta,$$
$$T_R = T + \Delta T - \left(\frac{L}{2} + x_c + \frac{1}{2}\varrho_L \operatorname{tg}\theta\right)\operatorname{tg}\theta, \qquad (10.6)$$

gdzie tangens kąta przegłębienia

$$\operatorname{tg}\theta = -\frac{\vartheta (x - x_c)}{(V_o + \vartheta) H_{o_1}}; \qquad (10.7)$$

x - jest odległością środka ciężkości zatopionego zbiornika od płaszczyzny owręża,

H_{o_1} - duża wysokość metacentryczna po zatopieniu zbiornika

$$H_{o_1} = H_o + \frac{\vartheta}{V_o + \vartheta}\left(T + \frac{\Delta T}{2} + \varrho_L - z - H_o\right) \qquad (10.8)$$

lub w przybliżeniu

$$H_{o_1} \approx \frac{V_o H_o}{V_o + \vartheta}. \qquad (10.9)$$

Można także obliczyć kąt przegłębienia, wykorzystując jednostkowy moment przegłębiający M_j odczytany z krzywych hydrostatycznych dla wyporności $V_o + \vartheta$.

Dla zbiorników kategorii drugiej, gdy momenty bezwładności swobodnej powierzchni wody wynoszą

$$i_x = \mu i_{x_t} \quad \text{i} \quad i_y = \mu i_{y_t}$$

wysokości metacentryczne winny zawierać poprawkę na swobodną powierzchnię wody, które są odpowiednio równe

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS 5/272/83
B-5
33°/.0

$$\Delta h_o = \frac{i_x}{V_o + \vartheta} ; \quad \Delta H_o = \frac{i_y}{V_o + \vartheta} , \tag{10.10}$$

gdzie ϑ jest objętością wody w zatopionym zbiorniku. Pozostały tok obliczeń nie ulega zmianie.

Jeśli dla przedziału pierwszej kategorii zastosujemy metodę stałej wyporności, to zmiana zanurzenia i wg tej metody będzie taka sama

$$\Delta T = \frac{\vartheta'}{S_{wL}} ,$$

gdyż możemy napisać

$$V' = V_o - \vartheta + \vartheta' , \tag{10.11}$$

gdzie: V' - wyporność okrętu po awarii,
V_o - wyporność przed awarią, lecz $V' = V_o$,
ϑ - objętość zatopionego przedziału,
ϑ' - objętość dodatkowa związana ze zwiększonym zanurzeniem, lecz $\vartheta = \vartheta'$.

Ponieważ wysokość metacentryczna jest równa

$$h_o = z_F + r_o - z_G ,$$

więc zmiana wysokości metacentrycznej także ma trzy składniki

$$\Delta h_o = \Delta z_F + \Delta r_o - \Delta z_G .$$

W metodzie stałej wyporności zakładamy, że $\Delta z_G = 0$, a jeśli jeszcze założyć, że w obrębie zmiany zanurzenia burty statku są pionowe i moment bezwładności J_x nie zmienił się, wówczas $\Delta r_o = 0$. Zmiana wysokości metacentrycznej jest związana jedynie ze zmianą rzędnej środka wyporu, czyli

$$\Delta h_o = \Delta z_F .$$

Z równania momentów statycznych obliczyć można zmianę położenia środka wyporu, równoważną zmianie wysokości metacentrycznej

$$V'(z_F + \Delta z_F) = V_o z_F - \vartheta . z + \vartheta' (T + \frac{\Delta T}{2}) ,$$

a stąd

$$\Delta z_F = \Delta h_o = \frac{\vartheta}{V_o} (T + \frac{\Delta T}{2} - z) , \tag{10.12}$$

więc nowa wysokość metacentryczna po awarii

$$h'_{o_1} = h_o + \frac{\vartheta}{V_o} (T + \frac{\Delta T}{2} - z) . \tag{10.13}$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/89
B-5
33%

Widać, że obliczone wysokości metacentryczne dla tego samego zatopionego zbiornika pierwszej kategorii dają w zależności od metody różne wyniki. O stateczności okrętu lub kącie przechyłu decyduje jednak współczynnik stateczności, czyli iloczyn wyporności i wysokości metacentrycznej. Sprawdźmy jakie wartości tych współczynników dają te dwie metody.

Metoda przyjętego ciężaru

$$\varrho(V_o + \vartheta)h_{o_1} = (M+m)\left[h_o + \frac{m}{M+m}\left(T + \frac{\Delta T}{2} - z - h_o\right)\right] =$$

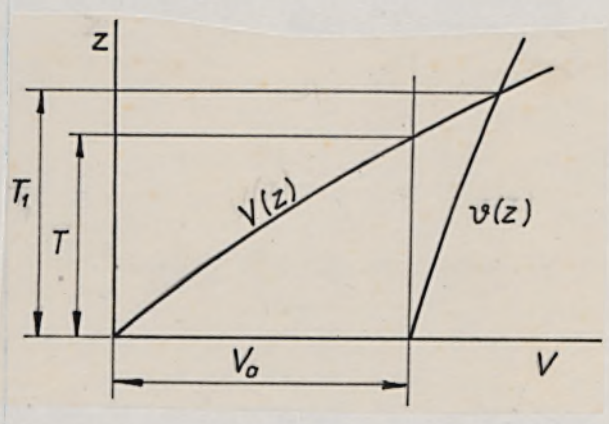
$$= Mh_o + m\left(T + \frac{\Delta T}{2} - z\right).$$

Metoda stałej wyporności

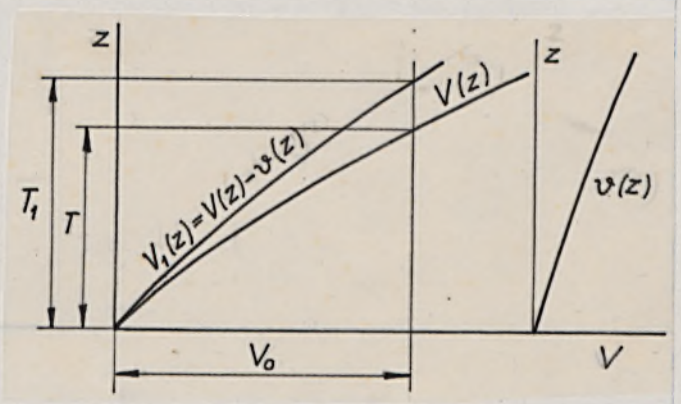
$$\varrho V_o\, h'_{o_1} = M\left[h_o + \frac{m}{M}\left(T + \frac{\Delta T}{2} - z\right)\right] = Mh_o + m\left(T + \frac{\Delta T}{2} - z\right),$$

czyli obie metody dają ten sam wynik. Obojętne jest więc, jaką metodą będziemy obliczać przypadek zalania przedziału pierwszej kategorii, kąt przechyłu czy kąt przegłębienia, a stąd i zanurzenie dziobu i rufy, będą takie same.

Przy zatopieniu przedziału drugiej kategorii poleca się stosować jedynie metodę przyjętego ciężaru, przyjmując aktualną masę wody w zalanym zbiorniku. Ze względu na możliwość częściowego odpompowania wody poziom zalania może być niższy od poziomu wody zaburtowej i metoda stałej wyporności nie daje wówczas poprawnych wyników.



Rys. 10.2



Rys. 10.3

Gdy zatopiony przedział jest duży, wówczas założenie, że pola wodnicy pierwotnej i końcowej są równe, jest obarczone błędem. Zmianę zanurzenia okrętu wyznacza się wówczas w sposób wykreślny. Wyznaczenie nowego zanurzenia metodą przyjętego ciężaru pokazano na rys. 10.2. Od prostej V_o = = const odkładamy objętość wody w zatopionym przedziale w funkcji jego wysokości. Punkt przecięcia krzywej $\vartheta(z)$ i $V(z)$ daje poszukiwane zanurzenie.

Stosując metodę stałej wyporności (rys. 10.3) odejmuje się od krzywej $V(z)$ dla danego z odpowiednie wartości $\vartheta(z)$, w wyniku czego uzyskuje się nową krzywą wyporności okrętu uszkodzonego z potrąceniem zatopionego

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/85
B-5
33%

przedziału. Nowe zanurzenie odczytuje się dla niezmienionej wyporności V_o, lecz z nowej krzywej $V_1(z)$.

10.3. Zatopienie przedziału trzeciej kategorii

Jest to przypadek najbardziej złożony, gdyż ilość wody wewnątrz przedziału zmienia się wraz z położeniem okrętu. Ma to miejsce po zderzeniu się dwu statków lub po uderzeniu w przeszkodę, gdy uszkodzona jest burta okrętu poniżej linii wodnej i powyżej dna podwójnego. Położenie okrętu po takim uszkodzeniu można jedynie obliczyć korzystając z metody stałej wyporności. Do wyprowadzenia koniecznych do tego celu wzorów przyjmujemy następujące założenia, które dotyczą także i poprzednich rozważań:

1. w obrębie zanurzenia burty są pionowe;
2. przechyły są niewielkie, w zakresie ważności wzoru metacentrycznego;
3. okręt przed awarią pływa bez przechyłu i przegłębienia;
4. zatopiony przedział jest mały w porównaniu z wypornością okrętu.

Przyjmijmy następujące oznaczenia, zgodnie z rys. 10.4:

x_F, y_F, z_F - współrzędne środka wyporu okrętu przed wypadkiem,

x'_F, y'_F, z'_F - współrzędne środka wyporu okrętu po wypadku,

$\vartheta = \mu\vartheta_t$ - objętość zatopionego przedziału do pierwotnej wodnicy pływania S_{wL},

x, y, z - współrzędne środka ciężkości g zatopionego przedziału ϑ,

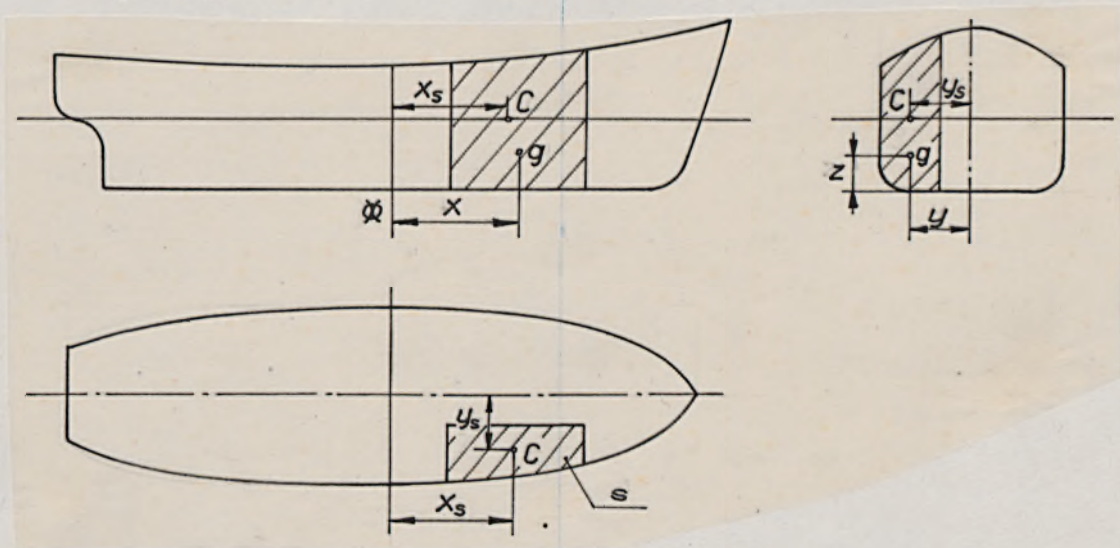
S_{wL} - pole wodnicy przed wypadkiem,

x_c, 0 - współrzędne środka ciężkości pola wodnicy S_{wL} przed wypadkiem,

$s = \mu \cdot s_t$ - pole wodnicy uszkodzonego przedziału,

x_s, y_s - współrzędne środka ciężkości utraconej powierzchni wodnicy,

$\bar{x}_c$, $\bar{y}_c$ - współrzędne środka ciężkości pola wodnicy $S_{wL} - s$ po wypadku.



Rys. 10.4

Po uszkodzeniu okrętu średnia zmiana zanurzenia okrętu wynosi

$$\triangle T = \frac{\vartheta}{S_{wL} - s}. \qquad (10.14)$$

Jeśli zatopiony zbiornik ma niesymetryczne położenie, wystąpią przechył i przegłębienie. Te odchylenia od położenia równowagi, zgodnie z założeniem, są małe i dokonują się wokół osi przechodzącej przez środek ciężkości nowej wodnicy pływania $\overline{x}_c$ i $\overline{y}_c$. Z równania momentów statycznych współrzędne środka ciężkości pola aktualnej wodnicy będą równe

$$(S_{wL} - s)\overline{x}_c = S_{wL} \cdot x_c - s \cdot x_s,$$

$$(S_{wL} - s)\overline{y}_c = - s y_s,$$

więc

$$\overline{x}_c = \frac{S_{wL} \cdot x_c - s \cdot x_s}{S_{wL} - s} = x_c - \frac{s}{S_{wL} - s}(x_s - x_c), \qquad (10.15)$$

$$\overline{y}_c = - \frac{s y_s}{S_{wL} - s}. \qquad (10.16)$$

Określmy wyrażenia na momenty bezwładności pola aktualnej wodnicy względem jej centralnych osi. Moment bezwładności względem osi wzdłużnej jest równy

$$J_{\overline{x}} = J_x - (i_x + s y_s^2) - (S_{wL} - s)\overline{y}_c^2, \qquad (10.17)$$

a względem osi poprzecznej

$$J_{\overline{y}} = J_y - \left[i_y + s (x_s - x_c)^2 \right] - (S_{wL} - s)(\overline{x}_c - x_c)^2, \qquad (10.18)$$

gdzie i_x i i_y są to momenty bezwładności własne utraconej powierzchni s po uwzględnieniu współczynnika zatopienia μ. Podstawiając do wyrażenia na moment $J_{\overline{x}}$ wartość $\overline{y}_c$, otrzymamy

$$J_{\overline{x}} = J_x - \left(i_x + \frac{S_{wL} \cdot s \cdot y_s^2}{S_{wL} - s} \right) \qquad (10.19)$$

i analogicznie, moment bezwładności nowej wodnicy względem osi poprzecznej przechodzącej przez jej środek ciężkości pola jest równy

$$J_{\overline{y}} = J_y - \left[i_y + \frac{S_{wL} \cdot s (x_s - x_c)^2}{S_{wL} - s} \right]. \qquad (10.20)$$

Dzieląc momenty bezwładności pola wodnicy przez wyporność, otrzymamy promienie metacentryczne

$$\overline{r}_o = \frac{J_{\overline{x}}}{V_o} = r_o - \frac{1}{V_o} \left(i_x + \frac{S_{wL} \cdot s \cdot y_s^2}{S_{wL} - s} \right) \qquad (10.21)$$

$$\overline{R}_o = \frac{J_{\overline{y}}}{V_o} = R_o - \frac{1}{V_o} \left[i_y + \frac{S_{wL} \cdot s (x_s - x_c)^2}{S_{wL} - s} \right], \qquad (10.22)$$

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/85
B-5
33°

czyli zmiana promienia metycentrycznego pod wpływem zatopienia przedziału wynosi odpowiednio

$$\Delta r_o = \bar{r}_o - r_o = -\frac{1}{V_o}\left(i_x + \frac{S_{wL}\cdot s\cdot y_s^2}{S_{wL} - s}\right), \qquad (10.23)$$

$$\Delta R_o = \bar{R}_o - R_o = -\frac{1}{V_o}\left[i_y + \frac{S_{wL}\cdot s(x_s - x_c)^2}{S_{wL} - s}\right]. \qquad (10.24)$$

Konieczne jest także obliczenie zmiany położenia środka wyporu po awarii. Przyjmując podział objętości wg równania (10.11) możemy napisać równania momentów statycznych tych objętości

$$\begin{aligned} V'\cdot x'_F &= V_o\cdot x_F - \vartheta\cdot x + \vartheta'\cdot \bar{x}_c, \\ V'y'_F &= V_o\cdot y_F - \vartheta\cdot y + \vartheta'\,\bar{y}_c, \\ V'z'_F &= V_o\cdot z_F - \vartheta\cdot z + \vartheta'\left(T + \frac{\Delta T}{2}\right), \end{aligned} \qquad (10.25)$$

gdzie przyjęliśmy, że burty okrętu w obrębie zmiany zanurzenia są pionowe i wówczas środek objętości ϑ' pokrywa się ze środkiem ciężkości pola wodnicy uszkodzonej $\bar{x}_c$ i $\bar{y}_c$. Z równań tych otrzymamy współrzędne środ- wyporu okrętu po awarii

$$\begin{aligned} x'_F &= x_F + \frac{\vartheta}{V_o}(\bar{x}_c - x), \\ y'_F &= \frac{\vartheta}{V_o}(\bar{y}_c - y), \\ z'_F &= z_F - \frac{\vartheta}{V_o}\left(z - T - \frac{\Delta T}{2}\right). \end{aligned} \qquad (10.26)$$

Wartości $\bar{x}_c$ i $\bar{y}_c$ są już nam znane, więc współrzędne te można wyrazić za pomocą wielkości zadanych, zatem

$$x'_F = x_F - \frac{\vartheta}{V_o}\left(x - \frac{S_{wL}\cdot x_c - s\cdot x_s}{S_{wL} - s}\right),$$

$$y'_F = -\frac{\vartheta}{V_o}\left(y + \frac{s\cdot y_s}{S_{wL} - s}\right), \qquad (10.27)$$

$$z'_F = z_F - \frac{\vartheta}{V_o}\left(z - T - \frac{\Delta T}{2}\right).$$

Na zmianę wysokości metacentrycznych ma wpływ zmiana promieni metacentrycznych i zmiana rzędnej środka wyporu. Uwzględniając obliczone już te składniki otrzymamy zmiany wysokości metacentrycznych

$$\Delta h_o = -\frac{1}{V_o}\left[i_x + \frac{S_{wL}\cdot s\cdot y_s^2}{S_{wL} - s} + \vartheta\left(z - T - \frac{\Delta T}{2}\right)\right], \qquad (10.28)$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/89
B-5
33

$$\Delta H_o = - \frac{1}{V_o}\left[i_y + \frac{S_{wL} \cdot s(x_s - x_c)^2}{S_{wL} - s} + \vartheta(z - T - \frac{\Delta T}{2}) \right]. \quad (10.29)$$

Ponieważ przy przyjęciu metody stałej wyporności kształt kadłuba okrętu pod wpływem jego uszkodzenia ulega zmianie, zmienia swoje położenie i środek wyporu okrętu, m.in. w poprzek i wzdłuż okrętu, a to powoduje przechył i przegłębienie okrętu. Moment przechylający będzie wynosić

$$M_{px} = - \rho V_o \cdot y'_F,$$

a przegłębiający

$$M_{py} = - \rho V_o (x'_F - x_F),$$

więc kąty przechyłu i przegłębienia będą równe

$$tg\phi = - \frac{y'_F}{h_o + \Delta h_o}, \quad (10.30)$$

$$tg\,\theta = - \frac{x'_F - x_F}{H_o + \Delta H_o}. \quad (10.31)$$

Po uwzględnieniu obliczonych wartości na y'_F i x'_F otrzymamy

$$tg\,\phi = \frac{\vartheta}{V_o(h_o + \Delta h_o)} \left(y + \frac{s \cdot y_s}{S_{wL} - s} \right), \quad (10.32)$$

$$tg\,\theta = \frac{\vartheta}{V_o(H_o + \Delta H_o)} \left(x - \frac{S_{wL} \cdot x_c - s \cdot x_s}{S_{wL} - s} \right). \quad (10.33)$$

Wzory te można trochę uprościć przyjmując, że w przybliżeniu środek ciężkości x_s pola utraconej wodnicy s pokrywa się ze środkiem x utraconej objętości ϑ, czyli

$$x_s \approx x \quad i \quad y_s \approx y,$$

a gdy jeszcze przyjmiemy, że utracona powierzchnia wodnicy jest niewielka w porównaniu z polem wodnicy nieuszkodzonej, wówczas wzory te sprowadzają się do postaci

$$tg\,\phi \approx \frac{\vartheta \cdot y}{V_o(h_o + \Delta h_o)} \cdot \frac{S_{wL}}{(S_{wL} - s)} \approx \frac{\vartheta\, y}{V_o(h_o + \Delta h_o)}, \quad (10.34)$$

$$tg\,\theta \approx \frac{\vartheta(x - x_c)}{V_o(H_o + \Delta H_o)} \cdot \frac{S_{wL}}{(S_{wL} - s)} \approx \frac{\vartheta\,(x - x_c)}{V_o(H_o + \Delta H_o)}, \quad (10.35)$$

gdzie cały wysiłek obliczeniowy sprowadza się do wyznaczenia nowych wysokości metacentrycznych. Jeśli kąt przegłębienia jest niewielki, wówczas zanurzenie dziobu i rufy okrętu będzie

$$T_D = T + \frac{\vartheta}{S_{wL}-s} + \left(\frac{L}{2} - \bar{x}_c\right) \operatorname{tg} \Theta ,$$

$$T_R = T + \frac{\vartheta}{S_{wL}-s} - \left(\frac{L}{2} + \bar{x}_c\right) \operatorname{tg} \Theta . \qquad (10.36)$$

Gdy w wyniku zderzenia zostało zatopionych kilka przedziałów trzeciej kategorii, wówczas w sposób obliczeniowy zastępuje się je jednym, tzw. zastępczym przedziałem ϑ_z, którego objętość

$$\vartheta_z = \sum_i \vartheta_{t_i} \cdot \mu_i , \qquad (10.37)$$

a środek jego objętości określony jest współrzędnymi

$$x_z = \frac{1}{\vartheta_z} \sum_i \vartheta_{t_i} \cdot \mu_i \cdot x_i ; \quad y_z = \frac{1}{\vartheta_z} \sum_i \vartheta_{t_i} \mu_i \cdot y_i ; \quad z_z = \frac{1}{\vartheta_z} \sum_i \vartheta_{t_i} \cdot \mu_i \cdot z_i \cdot \qquad (10.38)$$

Utracone pole wodnicy pływania okrętu oraz współrzędne środka ciężkości tego pola są równe

$$s = \sum_i s_{t_i} \cdot \mu_{t_i} ; \quad x_s = \frac{1}{s} \sum_i s_{t_i} \cdot \mu_i \cdot x_{s_i} ; \quad y_s = \frac{1}{s} \sum_i s_{t_i} \cdot \mu_i \cdot y_{si} , \qquad (10.39)$$

a momenty bezwładności tego pola

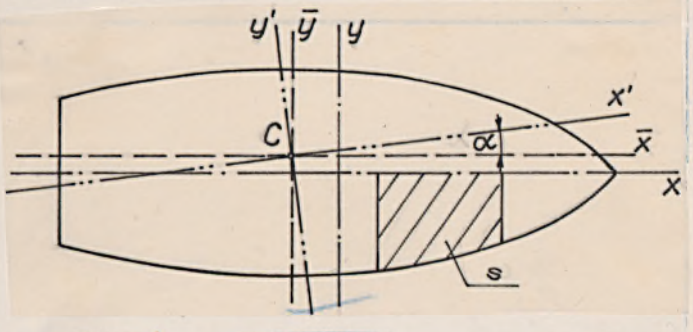
$$i_x = \sum_i i_{t_{x_i}} \cdot \mu_i ; \quad i_y = \sum_i i_{t_{y_i}} \cdot \mu_i . \qquad (10.40)$$

Tak obliczone wartości dla przedziału zastępczego wstawiamy do podanych wyżej wzorów, z których wyznaczyć można nowe zanurzenie dziobu i rufy okrętu oraz kąt przechyłu.

Zgodnie z przyjętym założeniem wyprowadzone wzory na obliczenie położenia okrętu po awarii dotyczą stosunkowo niedużego zatopionego przedziału lub przedziałów, gdyż tylko wówczas dla przeciętnego statku morskiego można przyjąć, że w obrębie zmiany zanurzenia burty okrętu są pionowe. Gdy zatopiony przedział jest duży, co spowodować też może duże przegłębienie okrętu, wyniki otrzymane tymi wzorami nie będą zbyt dokładne. Wówczas należy wykonać obliczenia w oparciu o linie teoretyczne, potrącając z kadłuba zatopiony przedział.

Wyprowadzone powyżej wzory na kąt przechyłu i przegłębienia okrętu są przybliżone także i z tego względu, że zakładamy tu obroty statku wokół osi równoległej $\bar{x}$ i prostopadłej $\bar{y}$ do pierwotnej płaszczyzny symetrii okrętu. W rzeczywistości obrotów tych dokonuje się względem osi centralnych. Układ ten jest obrócony w stosunku do układu $C\,\bar{x}\,\bar{y}$ o kąt α (rys. 10.5). Zależności między współrzędnymi obu układów są następujące

S/272/88PG



Rys. 10.5

$$x' = \bar{x}\cos\alpha + \bar{y}\sin\alpha \,, \qquad (10.41)$$

$$y' = -\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha,$$

a momenty bezwładności pola wodnicy S_{wL}-s względem tych osi

$$J_{x'} = J_{\bar{x}}\cos^2\alpha + J_{\bar{y}}\sin^2\alpha - J_{\bar{x}\,\bar{y}}\sin 2\alpha \,,$$

$$J_{y'} = J_{\bar{x}}\sin^2\alpha + J_{\bar{y}}\cos^2\alpha + J_{\bar{x}\,\bar{y}}\sin 2\alpha \,, \qquad (10.42)$$

$$J_{x'y'} = \frac{1}{2}(J_{\bar{x}} - J_{\bar{y}})\sin 2\alpha + J_{\bar{x}\,\bar{y}}\cos 2\alpha \,,$$

gdzie $J_{\bar{x}\,\bar{y}} = (S_{wL} - s)\,\bar{x}_c\,\bar{y}_c$.

Ponieważ osie x' i y' są osiami centralnymi, więc moment dewiacyjny $J_{x'y'}$ względem tych osi jest równy zero i stąd kąt obrotu układu α jest równy

$$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{2\,J_{\bar{x}\,\bar{y}}}{J_x - J_y} \,. \qquad (10.43)$$

Poprawny więc tok obliczeń kątów przechyłu i przegłębienia przy niesymetrycznym uszkodzeniu okrętu do wyznaczenia wysokości metacentrycznych $h_o + \Delta h_o$ i $H_o + \Delta H_o$ winien uwzględniać momenty bezwładności $J_{x'}$ i $J_{y'}$ wg wzorów (10.42) i (10.43). Dla statków morskich o konwencjonalnych proporcjach poprawki te nie mają jednak istotnego wpływu na wynik. Z reguły kąt α nie przekracza 3^o. Wpływ tego czynnika będzie odgrywać rolę przy bardzo małym stosunku L/B.

Gdy zatopiony przedział rozciąga się od burty do burty, obliczenia wykonujemy za pomocą skali Bonjeana. W takim przypadku statek nie będzie mieć przechyłu, lecz musimy znać jego wysokość metacentryczną, gdyż jest ona miarą stateczności okrętu. Wysokość metacentryczna w tym stanie awaryjnym będzie równa

$$h_\Theta = z_{F\Theta} + r_\Theta - z_G \,.$$

Obliczenie wysokości metacentrycznej dla znanej dowolnej wodnicy pływania nie jest trudne, natomiast występują duże trudności w znalezieniu wodnicy pływania po zatopieniu dużego przedziału. Dlatego też zastosujemy i w tym przypadku podane powyżej wzory, traktując obliczone nowe zanurzenie okrętu jako pierwsze przybliżenie. Zastanówmy się tu teraz, jak obliczyć wysokości metacentryczne, gdy znana nam jest wodnica pływania, którą nanosimy na skalę Bonjeana. W tym celu trzeba obliczyć nowe położenie rzędnej środka wyporu i promienie metacentryczne. Przyjmujemy, że

8. 11. 1984 ~~S/14/83~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

zatopiony przedział jest symetryczny. Zaznaczmy go też na skali Bonjeana. Rzędna środka wyporu jest równa

$$z_{F\Theta} = \frac{M_v}{V_o},$$

gdzie: $$M_v = \int_L c(x).m_y\,dx, \qquad (10.44)$$

$c(x) = 1 - \mu$ w obrębie przedziału zatopionego,

$c(x) = 1$ poza tym przedziałem,

m_y - moment statyczny pola wrężnicy względem płaszczyzny podstawowej. Momenty te dla wszystkich przekrojów odczytujemy ze skali Bonjeana na wysokości naniesionej wodnicy. Przy rozwiązywaniu tej całki w sposób numeryczny należy odpowiednio dobrać rzędne i współczynniki Simpsonowskie, aby uwzględnić nieciągłości funkcji na granicy zatopionego przedziału (rys. 10.6). W ten sam sposób można sprawdzić wyporność okrętu do naniesionej wodnicy

$$V_o = \int_L c(x)\, S_{wr}\cdot dx\ . \qquad (10.45)$$

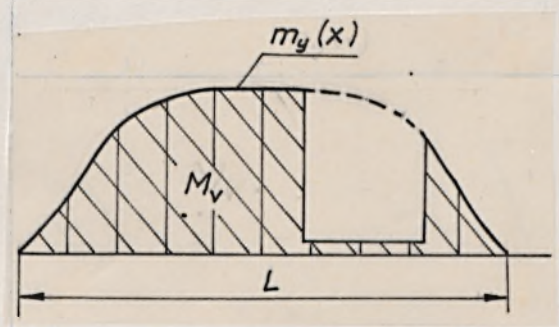
Z kolei poprzeczny promień metacentryczny jest równy

$$r_\Theta = \frac{J_{x\Theta}}{V_o},$$

gdzie

$$J_{x\Theta} = \frac{2}{3}\int_L c(x)y^3dx', \qquad (10.46)$$

a $x' = \frac{x}{\cos\Theta}$ uwzględnia wydłużenie między rzędnymi pod wpływem pochylenia okrętu. Moment bezwładności pola nowej wodnicy obliczamy także w sposób numeryczny, gdzie rzędne wodnicy odczytujemy z linii teoretycznych. Tak więc mając $z_{F\Theta}$ i r_Θ znamy wysokość metacentryczną okrętu w stanie awaryjnym, gdyż rzędna środka ciężkości okrętu nie ulega zmianie. Dodatnia wartość wysokości metacentrycznej świadczy o tym, że jeśli zatopiony przedział jest symetrycznie usytuowany wewnątrz kadłuba, to okręt pływa bez przechyłu i ma pewien zapas stateczności. Potrafimy też obliczyć kąt przechyłu, wtedy gdy będzie działać określony moment przechylający.



Rys. 10.6

Możliwe jest także obliczenie wzdłużnej wysokości metacentrycznej po wypadku. W tym celu należy tylko obliczyć moment bezwładności pola uszkodzonej wodnicy względem osi poprzecznej przechodzącej przez jej nowy środek ciężkości pola. Pole awaryjnej wodnicy jest równe

$$S_{wL\Theta} = 2\int_L c(x)\cdot y\cdot dx', \qquad (10.47)$$

8. 11. 1984 ~~S/114/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33⁰/₀

odcięta środka ciężkości tego pola

$$\bar{x}_c = \frac{2}{S_{wL\Theta}} \int_L c(x) y \cdot x' dx', \qquad (10.48)$$

a moment bezwładności pola tej wodnicy

$$J_{y\Theta} = 2 \int_L c(x) y (x')^2 dx' - S_{wL\Theta} \cdot \bar{x}_c^2 , \qquad (10.49)$$

gdy odcięta x' jest mierzona względem owręża.
Można to też zapisać w postaci

$$J_{y\Theta} = 2 \int_L c(x) (x' - \bar{x}_c)^2 y dx . \qquad (10.50)$$

Wzdłużna wysokość metacentryczna jest więc równa

$$H_{o\Theta} = z_{F\Theta} + R_\Theta - z_G = \frac{M_v}{V_o} + \frac{J_{y\Theta}}{V_o} - z_G .$$

Znajomość wartości wzdłużnej wysokości metacentrycznej pozwala na obliczenie momentu, który np. zmniejszy występujące przegłębienie okrętu.

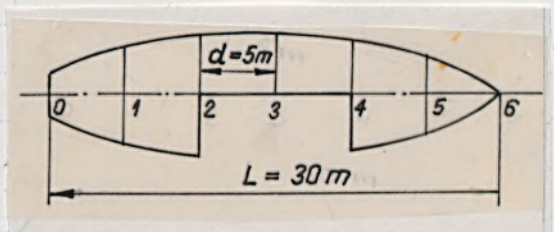
Wszystkie omówione tutaj rozważania statecznościowe związane z wysokością metacentryczną, dotyczą zatem małych kątów przechyłu, które można obliczyć wzorem metacentrycznym. Ciekawe byłyby także informacje o stateczności okrętu w stanie awaryjnym przy dużych kątach przechyłu. Do tego celu konieczne jest wykonanie obliczeń ramion stateczności kształtu dla różnych kątów przechyłu czyli pantokaren, lecz z potrąceniem możliwych do zatopienia przedziałów wewnątrz kadłuba okrętu i uwzględnieniem wszystkich wariantów. Widać stąd, jak bardzo rozszerza się wówczas zakres obliczeń zależny od podziału przestrzennego kadłuba okrętu.

Przykład 10.1

Dany jest ponton o burtach pionowych, którego kształt określa rys. 10.7 i tabela rzędnych 10.2.

T a b e l a 10.2

Nr wr	0	1	2	3	4	5	6
y(m)	1,2	3,2	4	4	3,7	2,8	0,1



Rys. 10.7

Długość pontonu L = 30 m, szerokość B = 8 m, zanurzenie T = 2,0 m, rzędna środka ciężkości pontonu z_G = 2,40 m. Ponton pływa w wodzie o ρ = 1000 kg/m^3 bez przechyłu i przegłębienia. Pod wpływem zderzenia zbiornik między wręgami 2 i 4

i płaszczyzną symetrii pontonu został zalany. Obliczyć kąt przechyłu i zanurzenie dziobu i rufy po awarii.

Rozwiązanie:

Zatopiony zbiornik wyłączamy z objętości kadłuba, przyjmując stopień zatopienia zbiornika $\mu = 0,97$. Obliczenia wykonujemy w tabeli 10.3 i 10.4 oddzielnie dla strony nieuszkodzonej i uszkodzonej.

Powierzchnia wodnicy przed awarią $S_{wL} = \frac{4}{3} d \sum_1 = \frac{4}{3} \cdot 5 \cdot 28,35 =$ $= 189,0\ m^2$. Wyporność $V = S_{wL} \cdot T = 189 \cdot 2 = 378\ m^3$. Odcięta środka ciężkości wodnicy i środka wyporu przed awarią

$$x_c = x_F = d \frac{\sum_2}{\sum_1} = 5 \frac{(-3,55)}{28,35} = -0,63\ m$$

Pole wodnicy uszkodzonej

$$S = \frac{2}{3} d(\sum_1 + \sum_{1'}) = \frac{2}{3} \cdot 5(28,35 + 16,86) = 150,7\ m^2.$$

Tabela 10.3

Strona nieuszkodzona

Nr wręgu	y_i(m)	c_s	$y_i c_s$	i	$y_i c_s \cdot i$	$y_i c_s i^2$	$y_i^2 c_s$	$y_i^3 c_s$
0	1,2	0,5	0,6	-3	-1,80	5,40	0,72	0,86
1	3,2	2,0	6,4	-2	-12,8	25,60	20,48	65,54
2	4,0	1,0	4,0	-1	4,0	4,00	16,00	64,00
3	4,0	2,0	8,0	0	0	0	32,00	128,00
4	3,7	1,0	3,7	1	3,7	3,7	13,09	50,65
5	2,8	2,0	5,6	2	11,2	22,40	15,68	43,90
6	0,1	0,5	0,05	3	0,15	0,45	0	0

$\sum_1 = 28,35$ $\sum_2 = -3,55$ $\sum_3 = 61,55$ $\sum_4 = 98,57$ $\sum_5 = 352,95$

Tabela 10.4

Strona uszkodzona

Nr wręgu	y_i(m)	c(x)	c_s	$c(x) y_i c_s$	i	$c(x) y_i c_s \cdot i$	$c(x) y_i c_s i^2$	$c(x) y_i^2 c_s$	$c(x) y_i^3 c_s$
0	1,2	1,0	0,5	0,6	-3	-1,8	5,40	0,72	0,86
1	3,2	1,0	2,0	6,4	-2	-12,8	25,60	20,48	65,54
2^-	4,0	1,0	0,5	2,0	-1	-2,0	2,00	8,00	32,00
2^+	4,0	0,03	0,5	0,06	-1	-0,06	0,06	0,24	0,96
3	4,0	0,03	2,0	0,24	0	0	0	0,96	3,84
4^-	3,7	0,03	0,5	0,06	1	0,06	0,06	0,22	0,81
4^+	3,7	1,00	0,5	1,85	1	1,85	1,85	6,84	25,31
5	2,8	1,00	2,0	5,60	2	11,20	22,40	15,68	43,90
6	0,1	1,00	0,5	0,05	3	0,15	0,45	0	0

$\sum_{1'} = 16,86$ $\sum_{2'} = -3,40$ $\sum_{3'} = 57,82$ $\sum_{4'} = 53,14$ $\sum_{5'} = 173,22$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/242/88

B-5

33

Odcięta środka ciężkości wodnicy nieuszkodzonej i środka wyporu

$$\bar{x}_c = x'_F = d\,\frac{\sum_{2^+}\sum_{2'}}{\sum_{1^+}\sum_{1'}} = 5\,\frac{(-3{,}55 - 3{,}40)}{28{,}35 + 16{,}86} = -0{,}77 \text{ m.}$$

Rzędna środka ciężkości wodnicy uszkodzonej i środka wyporu

$$\bar{y}_c = y'_F = \frac{1}{2}\cdot\frac{\sum_{4^-}\sum_{4'}}{\sum_{1^+}\sum_{1'}} = \frac{1}{2}\,\frac{(98{,}57 - 53{,}14)}{(28{,}35 + 16{,}86)} = 0{,}50 \text{ m.}$$

Moment bezwładności pola wodnicy uszkodzonej względem owręża

$$J_y = \frac{2}{3}d^3\left(\sum_{3^+}\sum_{3'}\right) = \frac{2}{3}\cdot 5^3(61{,}55 + 57{,}82) = 9947{,}5 \text{ m}^4.$$

Moment bezwładności pola wodnicy względem osi poprzecznej przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy

$$J_{\bar{y}} = J_y - S\cdot\bar{x}_c^{\,2} = 9947{,}5 - 150{,}7\cdot 0{,}77^2 = 9858{,}14 \text{ m}^4.$$

Moment bezwładności pola wodnicy uszkodzonej względem osi wzdłużnej

$$J_x = \frac{2}{9}d\left(\sum_{5^+}\sum_{5'}\right) = \frac{2}{9}\cdot 5(352{,}95+173{,}22) = 584{,}64 \text{ m}^4.$$

Moment bezwładności pola wodnicy względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości wodnicy

$$J_{\bar{x}} = J_x - S\cdot\bar{y}_c^{\,2} = 584{,}64 - 150{,}7\cdot 0{,}50^2 = 546{,}96 \text{ m}^4.$$

Duży promień metacentryczny

$$R_o = \frac{J_{\bar{y}}}{V} = \frac{9858{,}13}{378} = 26{,}08 \text{ m.}$$

Mały promień metacentryczny

$$r_o = \frac{J_{\bar{x}}}{V} = \frac{546{,}96}{378} = 1{,}45 \text{ m.}$$

Nowe średnie zanurzenie pontonu

$$T_1 = \frac{V}{S} = \frac{378}{150{,}7} = 2{,}51 \text{ m.}$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG M S/272/83
B-5
33°

Rzędna środka wyporu $z_F = \frac{T_1}{2} = 1,25$ m.

Wzdłużna wysokość metacentryczna

$$H_o = z_F + R_o - z_G = 1,25 + 26,08 - 2,40 = 24,93 \text{ m.}$$

Poprzeczna wysokość metacentryczna

$$h_o = z_F + r_o - z_G = 1,25 + 1,45 - 2,40 = 0,25 \text{ m.}$$

Kąt przegłębienia

$$tg\theta = -\frac{x'_F - x_F}{H_o} = -\frac{-0,77 + 0,63}{24,93} = +0,00562.$$

Zanurzenie dziobu

$$T_D = T_1 + (\frac{L}{2} - \bar{x}_c)tg\theta = 2,51 + (15 + 0,77)0,00562 = 2,60 \text{ m.}$$

Zanurzenie rufy

$$T_R = T_1 - (\frac{L}{2} + \bar{x}_c)tg\theta = 2,51 - (15 - 0,77)0,00562 = 2,43 \text{ m.}$$

Kąt przechyłu $tg\phi = \frac{y_{F'}}{h_o}$. Kąt obliczony wzorem metacentrycznym jest bardzo duży, zatem wzoru tego stosować nie można. Dla pontonu o burtach pionowych kąt przechyłu wyznaczymy z zależności

$$y'_F \cos\phi = (h_o + \frac{1}{2} r_o \cdot tg^2\phi)\sin\phi ,$$

czyli $$0,5 \cos\phi = (0,25 + 0,72\ tg^2\phi)\sin\phi .$$

Rozwiązując to równanie wykreślnie, otrzymujemy kąt przechyłu

$$\phi = 37^\circ.$$

Można też sprawdzić, jaki ma wpływ na wynik nieuwzględnienie obrotów wokół osi centralnych x' i y'.

Moment dewiacyjny $J_{xy} = (S_{wL} - s)\bar{x}_s\bar{y}_c = 150,7(-0,77)\cdot 0,50 = -58,02 \text{ m}^4$.

Kąt obrotu układu α

$$tg2\alpha = \frac{-2J_{xy}}{J_x - J_y} = \frac{2\cdot 58,02}{839,28 - 9858,13} = -0,0129,$$

$$\alpha \approx 0,37^\circ.$$

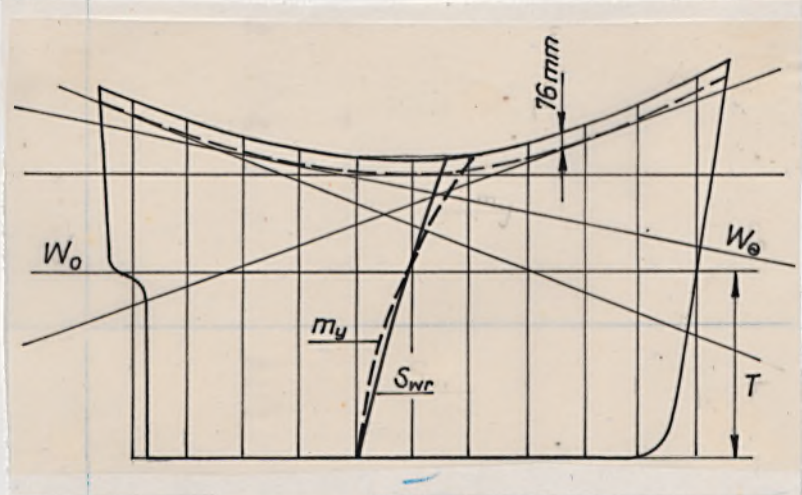
8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG M S/272/89
B-5
33 0/0

Kąt skręcenia układu jest bardzo mały. Uwzględnienie tego kąta nie ma żadnego praktycznego wpływu na obliczone już momenty bezwładności i z kolei na kąt przechyłu i przegłębienie.

10.4. Krzywa grodziowa

Wynikiem obliczeń pływalności awaryjnej okrętu jest określenie wymaganej ilości grodzi wodoszczelnych i rozmieszczenie ich w takich odległościach, aby po zatopieniu, w zależności od rodzaju statku, jednego lub więcej przedziałów, statek mógł utrzymać się na powierzchni wody. Wyznaczenie wymaganych odległości między grodziami w funkcji długości okrętu prowadzi do tzw. krzywej grodziowej, która to krzywa wchodzi w skład dokumentacji okrętowej, jeśli dany statek ma spełniać wymagania przepisów niezatapialności.

Literatura okrętowa zna wiele metod, prowadzących do skonstruowania takiej krzywej. Nie wchodząc w zbyt wiele szczegółów podamy tu ogólne zasady jednej z metod, której można przypisać nazwę metody analityczno-wykreślnej [15]. Pozwala ona na stosunkowo proste i szybkie dojście do wyniku. Podstawą obliczeń krzywej grodziowej tą metodą jest skala Bonjeana, na której nanosi się poniżej pokładu grodziowego, równolegle w odległości 76 mm linię graniczną. Przyjmuje się, że w przypadku jakiejś kolizji, do tej linii granicznej statek może się zanurzyć. W związku z tym wykreśla się stycznie do linii granicznej szereg wodnic, np. 7 (rys. 10.8), pokrywając cały możliwy zakres przegłębienia. Dla każdej takiej wodnicy, odczytując ze skali Bonjeana wartości zanurzonych pól wręgowych, obliczamy wyporność okrętu



Rys. 10.8

$$V_\Theta = \int_L S_{wr}\, dx$$

oraz moment statyczny wyporności względem owręża

$$M_{V_\Theta} = \int_L S_{wr}\, x\, dx.$$

Punktem wyjścia tych obliczeń jest zanurzenie konstrukcyjne okrętu i odpowiadająca mu wyporność V_o oraz odcięta środka wyporu x_F. Zapasowa więc wyporności wynosi

$$\vartheta_i = V_\Theta - V_o, \qquad (10.51)$$

8. 11. 1984 S/~~44/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

czyli jest to objętość wody, jaka może dostać się do wnętrza kadłuba, co pozwala na zachowanie przez okręt minimalnego zapasu pływalności. Środek wyporu tej zapasowej wyporności, znajdującej się między wodnicami W_o i W_Θ, wynosi

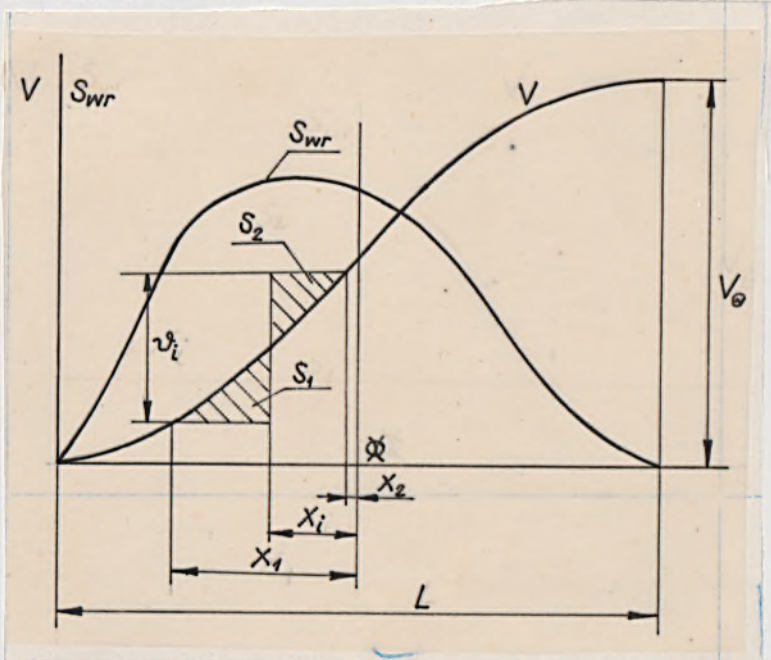
$$x_i = \frac{M_{v_\Theta} - M_{v_o}}{\vartheta_i} = \frac{V_\Theta \cdot x_{F_\Theta} - V_o \cdot x_F}{\vartheta_i} . \qquad (10.52)$$

Należy pamiętać, że zachodzi zależność

$$\vartheta_t = \frac{\vartheta_i}{\mu} ,$$

co daje pewien zapas wyporności.

Dla przyjętej wodnicy W_Θ należy teraz nanieść odczytane wartości pól wręgowych i wykreślić krzywą w funkcji długości okrętu $S_{wr}(x)$. Całkując pole pod tą krzywą, do poszczególnych przekrojów wrężnicowych uzyskamy krzywą wyporności też w zależności od długości okrętu (rys. 10.9). Zamiast pełnych krzywych $S_{wr}(x)$ i $V(x)$ w całym zakresie długości okrętu zupełnie wystarczy ograniczyć te dwie krzywe do otoczenia obliczonego punktu x_i. Dla odciętej x_i odkładamy na osi rzędnych w skali krzywej wyporności wartości zapasowej wyporności ϑ_i w taki sposób, aby pola pod krzywą wyporności $V(x)$ i nad tą krzywą były sobie równe, czyli aby $S_1 = S_2$. Ponieważ pola te, zakreskowane na rys. 10.9, przedstawiają momenty statyczne objętości, równość tych pól świadczy, że odcięta x_i przechodzi przez środek objętości ϑ_i, a odcięte x_1 i x_2 wyznaczają wówczas skrajne punkty przedziału. Długość zatem przedziału, który zatopiony powoduje zanurzenie okrętu do linii granicznej, wynosi $l = x_2 - x_1$, co jest odstępem między grodziami, natomiast środek tego przedziału występuje w punkcie o odciętej $x_1 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$.



Rys. 10.9

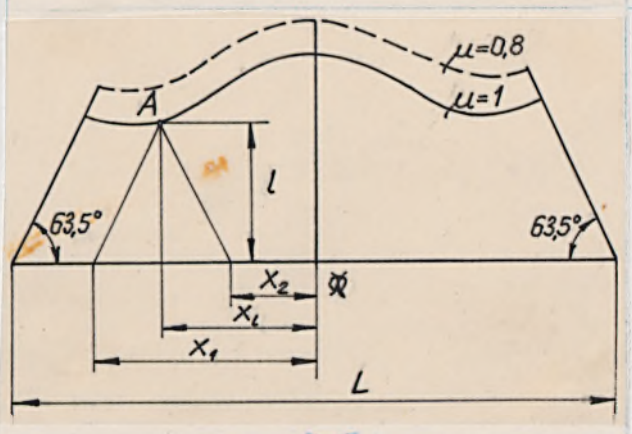
Gdy zakreskowane pola na rys. 10.9 nie są sobie równe, różnica ich wyznacza moment statyczny objętości względem płaszczyzny $x = x_i$

$$\Delta M = S_2 - S_1 = \int_{-x_1}^{x_2} (x - x_i) S_{wr}(x) dx = \int_{\vartheta_i}^{\vartheta} (x - x_i) dV , \qquad (10.53)$$

wobec czego odcinek przedstawiający objętość ϑ_i należy przesunąć w pionie o wielkość

1937 C4 C2
B-5
33
ZGPP

S/272/88PG



Rys. 10.10

$$\Delta\vartheta = \frac{-\Delta M}{x_2 - x_1}\,, \qquad (10.54)$$

co ma wpływ na położenie punktów x_1 i x_2. Po ustaleniu tych punktów rzędna równa odstępowi między grodziami wystawiona w punkcie $x_1 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$ określa jeden punkt (np. A) krzywej grodziowej (rys. 10.10). Powtarzając te czynności tyle razy, ile przyjęliśmy wodnic stycznych do linii granicznej, uzyskujemy punkty konieczne do wykreślenia pełnej krzywej grodziowej w całym zakresie długości okrętu. W rzeczywistości krzywa ta będzie przebiegać wyżej, gdyż należy jeszcze uwzględnić stopień zatopienia przedziału μ. Gdy przewidujemy wzdłuż długości okrętu zróżnicowane pomieszczenia o różnej wartości μ, krzywa grodziowa będzie nieciągła. Należy tu jeszcze pamiętać, że tak obliczona i wykreślona krzywa grodziowa dotyczy określonej wyporności konstrukcyjnej V_o, odpowiadającej zanurzeniu konstrukcyjnemu. Gdy dla danego statku zanurzenie projektowe będzie się zmniejszać, co wiąże się ze zwiększeniem wolnej burty okrętu, tym samym rzędne krzywej grodziowej będą się zwiększać.

Jako sprawdzenie poprawności wykonania krzywej grodziowej można wykorzystać jej własności różniczkowe i znaleźć styczną do krzywej w badanym punkcie [15]. Dla znalezienia pochodnej w danym punkcie przyjmijmy, że gdy okręt jest zanurzony do wodnicy awaryjnej W_θ, to wówczas do wnętrza kadłuba dostała się woda o objętości $\vartheta_i = V_\theta - V_o$, której moment statyczny wynosi $M_i = M_{V_\theta} - M_{V_o}$. Jeśli taką wodnicę pochylimy o kąt $d\theta$, to objętość zmieni się o wielkość $d\vartheta_i$, a moment o dM_i, równe

$$d\vartheta_i = m_s d\theta\,, \qquad (10.55)$$

$$dM_i = (x_s m_s + J_{ys}\cos\theta)d\theta\,, \qquad (10.56)$$

gdzie: $m_s = 2\int_L (x'-x'_s)ydx'$ jest momentem statycznym wodnicy awaryjnej, uszkodzonej, z uwzględnieniem ubytków, obliczonym względem punktu styczności S do linii granicznej.

x_s - odcięta punktu styczności S mierzona od owręża,

$J_{ys} = 2\int_L (x'-x'_s)^2 ydx'$ - moment bezwładności pola uszkodzonej wodnicy W_θ względem osi poprzecznej przechodzącej przez punkt S, przy czym $x' = x/\cos\theta$.

Pod wpływem zmiany przegłębienia o kąt $d\theta$, zmianie objętości $d\vartheta_i$ i jej momentu statycznego dM_i musi odpowiadać również zmiana położenia grodzi na krańcach przedziału. Można więc napisać równanie wyporności i jej momentu statycznego

8. 11. 1984
B-5
33°

$$d\vartheta_i = \mu S_{wr_2}\, dx_2 - \mu S_{wr_1}\, dx_1,$$

$$dM_i = \mu x_2\, S_{wr_2} dx_2 - \mu x_1\, S_{wr_1} dx_1,$$

gdzie S_{wr_1} i S_{wr_2} są wartościami pola przekroju wręgowego odpowiednio w punktach x_1 i x_2. Rozwiązując ten układ równań ze względu na dx_1 i dx_2, co odpowiada przesunięciu grodzi odpowiednio w punktach x_1 i x_2, otrzymujemy

$$dx_1 = \frac{m_s(x_s - x_2) + J_{ys}\cos\theta}{\mu S_{wr_1}(x_2 - x_1)}\, d\theta,$$

(10.57)

$$dx_2 = \frac{m_s(x_s - x_1) + J_{ys}\cos\theta}{\mu S_{wr_2}(x_2 - x_1)}\, d\theta.$$

Ponieważ długość przedziału $l = x_2 - x_1$, więc $dl = dx_2 - dx_1$, a odcięta środka długości przedziału $x_1 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$, więc $dx_1 = \frac{1}{2}(dx_1 + dx_2)$, stąd wartość pochodnej w punkcie x_1 jest równa

$$\frac{dl}{dx_1} = 2 \cdot \frac{dx_2 - dx_1}{dx_1 + dx_2}. \qquad (10.58)$$

Podstawiając wyrażenia na dx_1 i dx_2, otrzymamy

$$\frac{dl}{dx_1} = 2 \cdot \frac{a-b}{a+b}, \qquad (10.59)$$

gdzie

$$a = S_{wr_1}\left[m_s(x_s - x_1) + J_{ys}\cos\theta\right],$$

$$b = S_{wr_2}\left[m_s(x_s - x_2) + J_{ys}\cos\theta\right]. \qquad (10.60)$$

Możliwość wykreślenia stycznej do krzywej grodziowej ma na celu nie tylko sprawdzenie jej poprawności, lecz pozwala na ograniczenie ilości punktów obliczeniowych.

10.5. Normowanie niezatapialności

Wytyczne do projektowania okrętu, m.in. z punktu widzenia niezatapialności, zawarte są w międzynarodowych konwencjach. Przy składaniu zamówień na budowę nowych statków armatorzy żądają spełnienia wymagań konwencji, by zabezpieczyć się w przyszłości przed zwiększonymi opłatami portowymi czy kanałowymi w różnych częściach świata. Natomiast dla statków nie uprawiających żeglugi międzynarodowej brak jest bodźców materialnych do spełnienia wymagań konwencji. Sprawę bezpieczeństwa pasażerów i załóg pływających można wówczas rozpatrywać jedynie w aspekcie mo-

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/83
B-5
33
210

ralnym. Obecnie obowiązująca konwencja SOLAS z 1974 r. nie wykazuje zasadniczych różnic w stosunku do konwencji z 1960 r. Z niezatapialnością okrętu jest także związana międzynarodowa konwencja o liniach ładunkowych z 1966 r., gdyż wolna burta ma istotny wpływ na niezatapialność okrętu.

Niezależnie od wymogów międzynarodowych muszą być respektowane przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, pod nadzorem których statki są budowane. Statki budowane obecnie pod nadzorem Polskiego Rejestru Statków muszą spełniać wymagania przepisów z 1982 r. Między innymi przepisy te dotyczą także niezatapialności, obejmując swym zakresem cały szereg typów statków w uzależnieniu od ich długości. Ostrzejszymi wymaganiami objęte są statki pasażerskie, za które uznaje się statki przewożące powyżej 12 pasażerów, i statki do przewozu materiałów promieniotwórczych.

Podstawą normowania niezatapialności jest długość podziałowa będąca długością kadłuba poniżej linii granicznej [16]. Końcowym zaś wynikiem obliczeń jest informacja o niezatapialności, która winna wchodzić w skład dokumentacji okrętowej. Informacja taka powinna pozwolić kapitanowi na ocenę stanu statku w przypadku zatopienia przedziałów, a następnie na zastosowanie niezbędnych środków do zachowania pływalności i stateczności w stanie awaryjnym. Informacja ta winna zawierać ogólne dane statku, rysunek żładu wzdłużnego z zaznaczeniem pokładów, dna podwójnego, grodzi, przegród, otworów w nich i rodzajów ich zamknięć. Winny być także schematy instalacji służące do ratowania statku, wytyczne odnośnie do załadunku i balastowania wraz z zaleceniem właściwego rozkładu ładunku w poszczególnych ładowniach przy uwzględnieniu zatopienia symetrycznego i niesymetrycznego. Wszystkie te zalecenia mają na celu zachowanie niezatapialności okrętu, utrzymanie właściwego przegłębienia, stateczności i wytrzymałości okrętu. Winny być także podane wykresy stateczności dla najbardziej niekorzystnych stanów zatopienia statku. Stateczność okrętu nieuszkodzonego powinna być zatem we wszystkich stanach eksploatacyjnych wystarczająca do spełnienia wymagań dotyczących stateczności statku uszkodzonego.

Zgodnie z przepisami PRS-u standard niezatapialności wyrażony jest przez wartość wskaźnika podziału grodziowego R. Rozmieszczenie grodzi wodoszczelnych powinno zapewnić osiągnięcie wartości rzeczywistego wskaźnika grodziowego A, nie mniejszej niż wymagana wartość R, przy równoczesnym spełnieniu wymagań statecznościowych. Wskaźniki te oblicza się wzorami podanymi w przepisach. Wymagany wskaźnik R zależy od typu statku, długości podziałowej i liczby osób na statku, uzależniony jest także od rejonu żeglugi. Sposób obliczania jest więc bardzo zbliżony do tradycyjnego sposobu stosowanego niegdyś przez wiele lat dla określenia wskaźnika podziału grodziowego statków pasażerskich. Stopień podziału ma największą wartość w przypadku statków o największej długości i przeznaczonych głównie do przewozów pasażerów oraz statków przeznaczonych do żeglugi w Arktyce i Antarktydzie. Natomiast wskaźnik A wyrażający rzeczywistą wartość wskaźnika podziału grodziowego oparty jest na metodzie pro-

8. 11. 1984 S/14/85- PG MS S/272/88
B-5
33

babilistycznej. Zależy on od prawdopodobieństwa zatopienia przedziału lub grupy przedziałów przyległych oraz od prawdopodobieństwa utrzymania się statku na wodzie po kolizji. Prawdopodobieństwa te z kolei są uzależnione od umiejscowienia zatopionego przedziału wzdłuż długości statku i jego rozmiarów. Uwzględniają one w umowny sposób wpływ stateczności awaryjnej, rozkład zanurzenia statku, stopień zatopienia i wpływ prędkości statku. W odróżnieniu od losowego ujęcia problemu obliczeń uszkodzenia i zatopienia przedziału, obliczenia stateczności okrętu oparte są na modelu zdeterminowanym.

Przy obliczeniach stateczności okrętu uwzględnia się rzeczywisty kształt uszkodzonych przedziałów, stopień ich zatopienia, rodzaj zamknięć otworów, istnienie międzypokładów, podwójnych burt, poprzecznych i wzdłużnych grodzi ograniczających wlewanie się wody do wnętrza kadłuba. Przepisy wymagają, aby wysokość metacentryczna po zatopieniu przedziału lub przedziałów dla statku pływającego w położeniu wyprostowanym nie była mniejsza od 0,05 m czyli $h_o \geqslant 0{,}05$ m. Dla statków pasażerskich istnieją ponadto dodatkowe wymagania. Przepisy wymagają takiej stateczności od statku, aby po kolizji, a przed zastosowaniem środków wyrównawczych, kąt przechyłu był nie większy od:

- 15^o dla statków pasażerskich,
- 20^o dla statków niepasażerskich z wyjątkiem zbiornikowców do przewozu ropy naftowej, chemikaliowców i gazowców,
- 25^o (lub 30^o - jeżeli pokład grodziowy nie zanurza się w wodzie) - dla zbiornikowców, chemikaliowców i gazowców.

Po zastosowaniu środków wyrównawczych, przy czym czas wyrównywania statku winien być nie dłuższy od 10 minut, kąty przechyłu nie powinny przekraczać następujących wartości:

- 7^o dla statków pasażerskich przy zatopieniu jednego przedziału,
- 12^o dla statków pasażerskich przy zatopieniu dwu lub więcej przedziałów,
- 12^o dla statków niepasażerskich z wyjątkiem jak niżej,
- 17^o dla zbiornikowców, chemikaliowców i gazowców.

Wymagania z kolei dla krzywej ramion prostujących stateczności statycznej są następujące: wartość maksymalnego ramienia prostującego w końcowym stanie zatopienia po wyrównaniu statku powinna być nie mniejsza od 0,1 m; dodatni zakres krzywej ramion przy zatopieniu symetrycznym nie powinien być mniejszy od 30^o, a przy zatopieniu niesymetrycznym - 20^o; wartość ramienia stateczności dynamicznej winna wynosić co najmniej 0,0175 m.

Istniejące przepisy są dalekie od doskonałości, a podejście probabilistyczne skromnie wchodzące w przepisy jest tu nowością. W miarę postępu prac i zdobywaniu odpowiednich informacji statystycznych także i przepisy normowania niezatapialności będą ulegały zmianom i udoskonaleniom. Czynnikiem inspirującym jest tu powstawanie nowych typów statków, wzrost ich wielkości i ilości, bezpieczeństwo ludzi i groźba zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

11. WODOWANIE

„Statek ów został naturalnie ochrzczony, przy zachowaniu odpowiedniego rytuału, w dniu kiedy zeszedł z pochylni; lecz mimo to daleko mu jeszcze było do tego, aby mieć imię. Nie był jeszcze wypróbowany, nie znał wcale sposobów i podejść morza..."

11.1. Uwagi ogólne

Wodowaniem okrętu nazywamy przeniesienie budowanej konstrukcji z lądu na wodę. Wodowania mogą być więc rozmaitego typu. Będzie to uniesienie niewielkiej jednostki dźwigiem i wstawienie do wody, wypełnienie wodą niecki suchego doku i wyprowadzenie statku z doku po uzyskaniu przez niego pływalności, przeciągnięcie statku do doku pływającego i wypłynięcie statku po zanurzeniu doku, opuszczenie statku do wody na wózkach slipowych lub też ześlizg statku po pochylni. Z wyjątkiem ześlizgu po pochylni pozostałe rodzaje wodowań nie są operacją niebezpieczną, a obliczenia dotyczą jedynie określenia ciężaru, położenie środka ciężkości oraz wyznaczenie wodnicy pływania po uzyskaniu pełnej pływalności. Obliczenia więc sprowadzają się do określenia pływalności i sprawdzenia stateczności oraz narzucenia przez rozkład ciężarów takiego zanurzenia dziobu i rufy, aby uniknąć przegłębienia, a stąd i momentów gnących podczas uzyskiwania pływalności. Staranne obliczenia winny być wykonane, gdy ma miejsce ześlizg statku z pochylni do wody. Właściwe obliczenia winny poprzedzić ustawienie pierwszej sekcji statku na pochylni. Takie wodowanie ze względu na samoczynne przemieszczanie dużej masy jest zawsze operacją bardzo niebezpieczną i dostarcza wielu emocji. Stąd też cały ten proces musi być przygotowany bardzo starannie i w najdrobniejszych szczegółach. Z chwilą ruszenia statku człowiek jest tylko biernym obserwatorem i nie ma już żadnego wpływu na przebieg wodowania. Nieudane wodowanie pociąga za sobą ogromne straty, a były wypadki, których finałem było pocięcie nieukończonego statku na złom. Pod pojęciem wodowania będziemy właściwie ro-

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/88
B-5
33°

zumieli ześlizg okrętu z pochylni do wody, a odbywa się to w następujący sposób. Pod zbudowanym okrętem przeznaczonym do zwodowania ustawia się tory i płozy ślizgowe, na które następnie przenosi się ciężar okrętu przy równoczesnym usuwaniu podpór stępkowych i obłowych, na których spoczywał okręt podczas budowy. Ponieważ tory mają pewne nachylenie w stosunku do poziomu, okręt pod wpływem siły ciężkości ześlizguje się do wody. W zależności od tego czy tory ustawione są wzdłuż płaszczyzny symetrii okrętu, czy prostopadle do niej, rozróżniamy wodowanie wzdłużne i boczne. Każdy z tych sposobów posiada swoje zalety i wady. Najbardziej rozpowszechnione jest wodowanie wzdłużne, lecz wodowanie boczne też już nie należy do rzadkości. Dla pewnych typów statków o znacznej długości i bardzo małej wysokości bocznej, charakteryzujących się małą wytrzymałością wzdłużną - dotyczy to statków śródlądowych - wodowanie boczne jest jedynym sposobem spuszczania statku do wody, nie powodującym uszkodzenia jego konstrukcji.

Niebezpiecznymi momentami przy wodowaniu wzdłużnym są:

1. Zatrzymanie się statku na torach w chwili zwolnienia stoperów lub po przebyciu pewnej drogi.
2. Przekroczenie dopuszczalnych nacisków, powodujące uszkodzenie konstrukcji spustowej wodowanego okrętu lub pochylni.
3. Przeważenie okrętu.
4. Uderzenie tylnymi końcami płóz spustowych lub rufą statku o dno akwenu.
5. Uderzenie dziobu statku o krawędź pochylni przy zeskoku.
6. Uderzenie o przeciwległy brzeg w wypadku ograniczonej szerokości akwenu.
7. Przewrócenie się statku wskutek zbyt małej stateczności poprzecznej.

Pomija się tu oczywiście wszelkie awarie związane z nieprawidłową konstrukcją lub wykonaniem urządzeń spustowych.

Niebezpiecznymi momentami przy wodowaniu bocznym są:

1. Wyprzedzenie jednego z końców statku przy zsuwaniu się po pochylni, co może doprowadzić do zniszczenia całej konstrukcji spustowej oraz uszkodzenia kadłuba okrętu.
2. Zbyt silne uderzenie burtą lub dnem o wodę, co może spowodować wgniecenie poszycia, zerwanie zamontowanych mechanizmów z fundamentów, itp.
3. Nadmierny przechył, który może spowodować przewrócenie okrętu.
4. Uderzenie dnem lub płozami o dno akwenu.
5. Uderzenie burtą o krawędź pochylni przy powrotnym przechyle okrętu.
6. Uderzenie burtą o przeciwległy brzeg.

Mimo dużej ilości niebezpiecznych momentów wodowanie boczne ma w stosunku do wodowania wzdłużnego cały szereg zalet, m.in.:

1. można budować statek na równej stępce, co ułatwia proces technologiczny montażu;
2. statek może być budowany na lekkiej, nawet prowizorycznej pochylni;
3. unika się kosztownych robót podwodnych, gdyż cała pochylnia może być powyżej poziomu wody;

8. 11. 1984
B-5
33

4. unika się wzdłużnego zginania kadłuba, co umożliwia wodowanie statków o małej wytrzymałości wzdłużnej;
5. można wodować statek do niewielkiego akwenu.

Obliczenia wodowania wzdłużnego [7], z wyjątkiem określenia prędkości wodowanego okrętu, wykonać można całkowicie w oparciu o zasady statyki okrętu, natomiast wodowanie boczne, to typowe zjawisko dynamiczne, i zasady jego obliczania przedstawione będą tu bardzo ogólnie. Szczegółowo natomiast rozpatrzymy obliczenia wodowania wzdłużnego. Obliczenia te polegają na określeniu momentu obrotu i zabezpieczenia przed przeważeniem, wyznaczeniu w sposób przybliżony nacisków oraz prędkości wodowanego okrętu. Obliczenia te mają wpływ na ustawienie statku na pochylni w momencie rozpoczęcia jego budowy. Należy jednak pamiętać, że ustawienie statku na pochylni zależne jest też od wysokości urządzeń dźwigowych ustawionych wzdłuż pochylni, szczególnie w części dziobowej okrętu. Natomiast konstrukcja i montaż urządzenia spustowego, urządzeń zwalniających statek z pochylni, konstrukcja i montaż urządzeń hamujących jak również szczegółowe opracowanie wszystkich czynności związanych z procesem wodowania to zagadnienia, którymi zajmuje się technologia okrętu.

Statek budowany na pochylni wzdłużnej najczęściej ustawiony jest rufą do wody, a to ze względu na większą pełnotliwość części rufowej i szybsze osiągnięcie pełnego wyporu. Może być jednak ustawienie odwrotne. Statki o nietypowych kształtach, o bardziej pełnotliwych częściach dziobowych w celu uniknięcia balastowania, jak również nadmiernych nacisków na kołyskę dziobową, mogą wchodzić do wody dziobem. Tok obliczeń jest taki sam bez względu na ustawienie statku, jedynie współczynniki oporu będą wówczas nieco inne.

Wodowanie wzdłużne można podzielić na cztery charakterystyczne okresy ruchu:

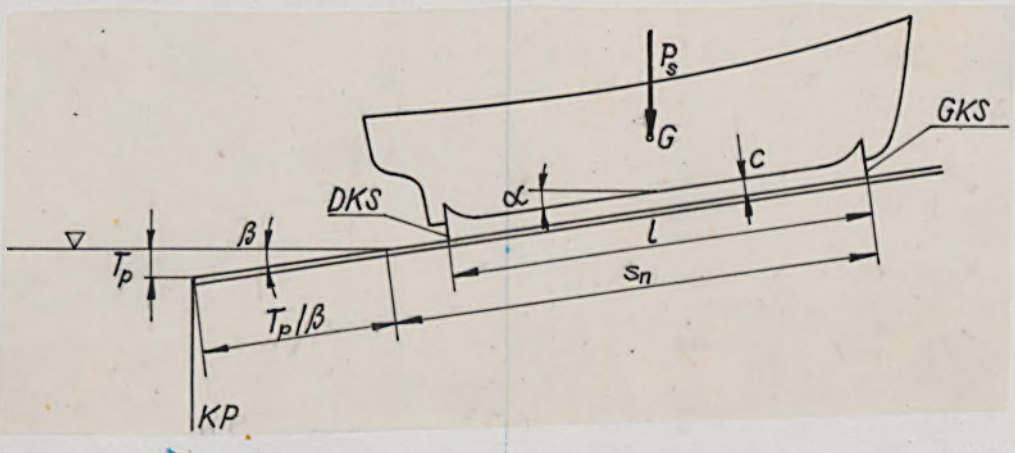
1. Ruch wstępny trwający od momentu rozpoczęcia ruchu do chwili zetknięcia się kadłuba z wodą.
2. Drugi okres zaczyna się od momentu zetknięcia się kadłuba z wodą do chwili obrotu.
3. Trzeci okres trwa od momentu obrotu do uzyskania pełnej pływalności.
4. Okres końcowy - pływanie swobodne okrętu.

Pochylnie wzdłużne też mają różne odmiany konstrukcyjne, co ma wpływ na wymienione wyżej okresy ruchu. Istnieją np. pochylnie bramowe, zakończone przy progu pochylni bramą. Przez odpompowanie wody cała pochylnia jest wówczas dostępna do budowy i unika się podwodnego ustawiania torów. Na krótko przed wodowaniem dolna część pochylni znajdująca się poniżej lustra wody jest zalewana wodą, w związku z czym już w chwili rozpoczęcia ruchu rufa statku jest w wodzie, nie ma więc wówczas pierwszego okresu. Od samego początku ruchu zaznacza się wówczas wpływ wzrastającej wyporności i oporu wody.

11.2. Pochylnia, urządzenia spustowe i ich elementy

Podstawową charakterystyczną wielkością pochylni jest jej kąt nachylenia β (rys. 11.1). Pochylnie przeznaczone do wodowania wzdłużnego mają nachylenie w granicach $\frac{1}{12}$ do $\frac{1}{24}$, w związku z czym można przyjąć, że:

$$\operatorname{tg}\beta \approx \sin\beta \approx \beta \quad \text{i} \quad \cos\beta \approx 1. \tag{11.1}$$



Rys. 11.1

Nachylenie zależy od przeznaczenia pochylni. Pochylnie przewidziane do budowy małych statków mają nachylenie $\frac{1}{12} - \frac{1}{15}$, dla statków średnich $\frac{1}{15} - \frac{1}{19}$, a dla dużych okrętów $\frac{1}{19} - \frac{1}{24}$. Można także spotkać pochylnie o zmiennym kącie β, o kącie jednostajnie rosnącym lub jednostajnie malejącym w kierunku wody. Z tego rodzaju pochylni częstsze są pochylnie o kącie rosnącym. Profil takiej pochylni jest łukiem koła o promieniu rzędu 10-20 km.

Pochylnie przeznaczone do wodowania bocznego mają większe nachylenia w granicach $\frac{1}{6} - \frac{1}{12}$.

Nachylenie linii stępki statku α najczęściej jest równe kątowi nachylenia pochylni β lub różnica między tymi kątami nie przekracza $\pm$ 0,020. Dla dużych statków bardzo często kąt ten jest mniejszy od kąta β średnio o 0,005.

Ważnym elementem pochylni jest zanurzenie progu pochylni T_p. Duże zanurzenie progu podnosi koszt budowy pochylni, lecz zwiększa bezpieczeństwo przebiegu wodowania. Ze względu na pływy, porę roku czy kierunek wiatru zmienia się poziom wody, a w związku z tym zanurzenie progu pochylni jest zmienne. W miejscowościach, gdzie występują pływy, wodowanie winno być przeprowadzone na krótko przed wysoką wodą. W polskich stoczniach także daje się zauważyć, w zależności od kierunku wiatru, wahania poziomu wody, które mogą dochodzić do $\pm$ 0,5 m.

Pochylnie do wodowania bocznego mogą mieć próg pochylni pod powierzchnią wody, na wysokości lustra wody, a najczęściej krawędź pochylni znajduje się powyżej poziomu wody. Krawędź pochylni w skrócie oznaczać będziemy symbolem KP. Z zanurzeniem progu pochylni związana jest długość podwodnej części pochylni

$$s_p = \frac{T_p}{\beta}. \tag{11.2}$$

~~S/14/85~~ PG MS S/272/89

216

Tory ślizgowe, po których zsuwa się statek, ułożone są wzdłuż całej długości pochylni i związane są z pochylnią. Dlatego zanurzenie progu pochylni dotyczy zanurzenia górnej krawędzi torów. Natomiast płozy ślizgowe lub tzw. sanie związane są ze statkiem, przemieszczają się wraz z nim i demontowane są po zwodowaniu statku. Długość płóz kształtuje się w granicach 70-90% długości okrętu L. Ułożone są wzdłuż grodzi wzdłużnych lub wzdłużników, a kończą się na wysokości grodzi. Rufowa krawędź płóz (przy wodowaniu rufą naprzód) oznaczona będzie jako DKS - dolna krawędź sań, zaś dziobową krawędź GKS - jako górną krawędź sań. Wokół GKS dokonuje się obrót statku na pochylni w ciągu całego trzeciego okresu wodowania. Obrót ten polega na stopniowym podnoszeniu się rufy i jednoczesnym zsuwaniu się statku po pochylni. Praktycznie obrót ten nie odbywa się wokół krawędzi płóz, gdyż ze względu na duże siły doprowadziłoby to do zniszczenia urządzenia spustowego. Dlatego w części dziobowej instaluje się specjalną konstrukcję, która przenosi reakcję pochylni, tzw. kołyskę dziobową. Łukowe płozy w kołysce dziobowej umożliwiają obrót statku i rozkładają zarazem przenoszoną siłę na pewną powierzchnię. Aby uniknąć uszkodzenia statku, wzmacnia się od wewnątrz w tym miejscu kadłub na czas wodowania. Do obliczenia momentu wyporu przyjmujemy odległości odniesione do GKS.

Szerokość płóz dobiera się z dopuszczalnych nacisków. Jeśli wodowanie przebiegać będzie na dwu torach i płozach, wówczas szerokość płozy

$$b = \frac{P_s}{21p}, \qquad (11.3)$$

gdzie: P_s jest wodowanym ciężarem,

p - dopuszczalny nacisk, który jest liniową funkcją wodowanego ciężaru. Można przyjąć, że dla wodowanej masy M = 1000 t dopuszczalny nacisk $p = 160\ kN/m^2$, a dla M = 10000 t $p = 280\ kN/m^2$.

Istotnym elementem jest wysokość płaszczyzny podstawowej okrętu nad pochylnią. Odległość ta musi zapewnić dostęp do dna budowanego okrętu. Waha się w granicach 1,2 - 1,5 m. Nadmierna wysokość nie jest wskazana, gdyż wówczas wzrasta ilość materiałów na wykonanie torów i płóz. Do wykonywanych obliczeń konieczna jest znajomość wysokości płaszczyzny podstawowej (lub owręża, gdy $\beta \neq \alpha$) od górnej płaszczyzny torów. Średnio wysokość ta wynosi c = 0,8-1,0 m. Ciężar urządzenia spustowego związanego ze statkiem waha się w granicach 2-6% ciężaru wodowanego okrętu.

W wodowaniu dużą rolę odgrywają smary, którymi pokrywa się tory, aby zmniejszyć tarcie i umożliwić ześlizg statku z pochylni. Muszą mieć one odpowiednie własności. Smar winien zapewnić małe tarcie płóz na torach, a także nie może zostać wyciśnięty przy większych naciskach. Z reguły własności smarów zależą od temperatury i nacisków. Na naciski z kolei ma wpływ rozkład ciężarów wzdłuż długości okrętu. Stocznie prowadząc pomiary wodowań powinny gromadzić informacje odnośnie do współczynników tar-

8. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/272/88
B-5
33

cia w zależności od rodzaju smaru i warunków zewnętrznych. Tego rodzaju informacje oddają nieocenione usługi przy prognozie następnych wodowań, gdyż do obliczeń wodowania konieczna jest znajomość współczynników tarcia. Rozróżnia się współczynnik tarcia w spoczynku μ_s i dynamiczny współczynnik tarcia μ_d, który wprowadza się do obliczeń podczas ruchu okrętu. Współczynniki te wahają się w następujących granicach:

$$\mu_s = 0{,}03 - 0{,}07,$$
$$\mu_d = 0{,}015 - 0{,}050.$$

Współczynniki te zależą od nacisków płóz na tory. Orientacyjnie można przyjmować wartości wg tabeli 11.1.

T a b e l a 11.1

Współczynnik tarcia podczas wodowania

$p(kN/m^2)$	μ_s	μ_d
300	0,030 - 0,038	0,018 - 0,030
200	0,037 - 0,045	0,025 - 0,038
100	0,050 - 0,070	0,033 - 0,050

Dane te odnoszą się do ślizgowych urządzeń spustowych. Obecnie na świecie stosuje się urządzenia toczne, gdzie na torach zamontowane są kule stalowe lub rolki. Współczynniki tarcia spoczynkowe i dynamiczne wynoszą około 0,025. Urządzenie takie ma tę wielką zaletę w stosunku do torów ślizgowych, że jest trwałe i może być używane wielokrotnie. Eliminuje się wtedy takie parametry jak temperaturę, wilgotność i rodzaj smaru.

11.3. Statyczne obliczenia wodowania wzdłużnego

Obliczenia pierwszego okresu wodowania sprowadzają się do wyznaczenia prędkości ześlizgu po pochylni, co omówione będzie w zagadnieniach dynamicznych wodowania oraz do określenia nacisków, co rozpatrzymy łącznie dla wszystkich okresów. W okresie pierwszym działają dwie siły: ciężar okrętu i płóz i równa temu ciężarowi, lecz przeciwnie skierowana reakcja pochylni.

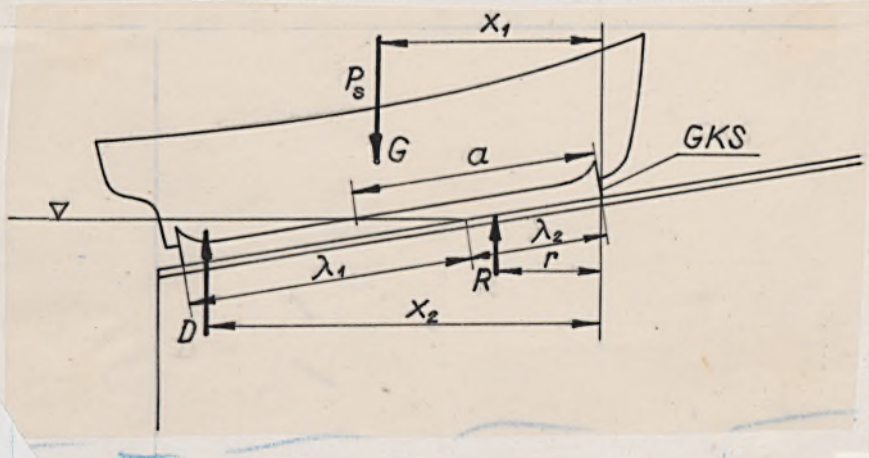
W drugim okresie wodowania w miarę zanurzania się do wody kadłuba pojawia się siła wyporu. Siła ta składa się z trzech składników

$$D = g\varrho(V + \vartheta_1 - \vartheta_2), \qquad (11.4)$$

gdzie $g\varrho V$ - jest siłą wyporu pochodzącą od zanurzonej części okrętu,
$g\varrho\vartheta_1$ - siła wyporu zanurzonej części płóz, podpór i elementów wiążących,
$g\varrho\vartheta_2$ - utrata siły wyporu związana z przyssaniem płóz do torów, gdyż na powierzchnię płóz spoczywającą na torach nie działa reakcja hydrostatyczna.

1937 C4 C2
B-5
33%
ZGPP

S/272/88PG



Rys. 11.2

Maksymalna wielkość tej siły może być równa (rys. 11.2)

$$\varepsilon \varrho \vartheta_2 =$$

$$= \varepsilon \varrho \frac{1}{2} \lambda_1 \cdot \lambda_1 \cdot \beta \cdot 2b =$$

$$= \varepsilon \varrho b \lambda_1^2 \beta , \quad (11.5)$$

gdzie λ_1 jest długością styku płóz z torami pod powierzchnią wody.

Równanie sił w drugim okresie wodowania ma postać

$$P_s = D + R, \quad (11.6)$$

gdzie: P_s - jest ciężarem wodowanej konstrukcji wraz z urządzeniami spustowymi,

R - reakcja pochylni,

zaś równanie momentów tych sił względem GKS

$$P_s \cdot x_1 = D x_2 + R \cdot r, \quad (11.7)$$

Ponieważ ciężar okrętu i położenie środka ciężkości nie ulegają zmianie, moment ciężaru przez cały czas jest wielkością stałą, zmienia się jednak udział składników prawej strony. Moment pochodzący od siły wyporu ma te same składniki co i siła wyporu

$$M_D = D x_2 = \varepsilon \varrho (V \cdot x_F' + M_1 - M_2); \quad (11.8)$$

$\varepsilon \varrho V x_F'$ jest momentem siły wyporu zanurzonej części okrętu liczonym od GKS,

$\varepsilon \varrho M_1$ - moment wyporu wytworzony przez elementy spustowe związane z okrętem względem tej samej krawędzi,

$\varepsilon \varrho M_2$ - moment siły przyssania, który jest równy

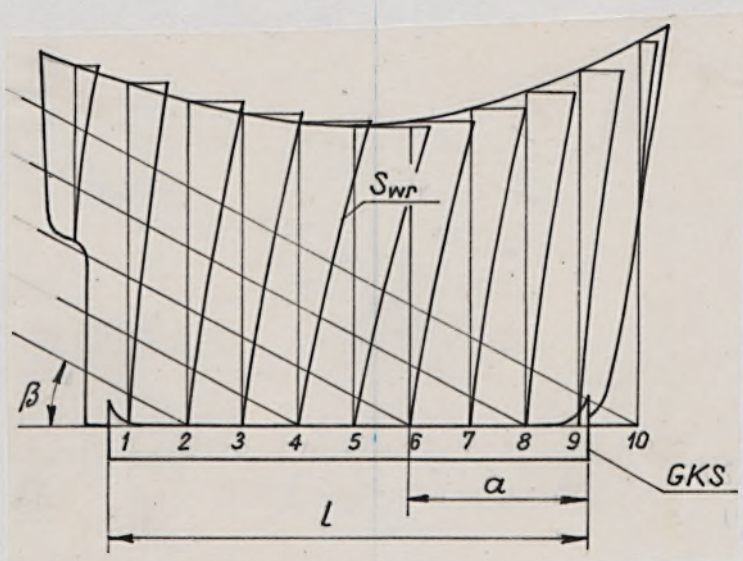
$$\varepsilon \varrho M_2 = \varepsilon \varrho \vartheta_2 (\frac{2}{3} \lambda_1 + \lambda_2) = \varepsilon \varrho b \lambda_1^2 \beta (\frac{2}{3} \lambda_1 + \lambda_2). \quad (11.9)$$

Objętość zanurzonej części kadłuba i moment wyporności oblicza się za pomocą skali Bonjeana. Uwzględniając podziałkę, długości obrysu i wysokości nanosi się na skalę Bonjeana cały szereg wodnic pod kątem równym kątowi nachylenia linii stępki w stosunku do poziomu wody. Po odczytaniu ze skali Bonjeana (rys. 11.3) w znany sposób wartości powierzchni pól wrężnicowych oblicza się objętość do danej wodnicy

$$V = \int_L S_{wr}\, dx = \frac{2}{3} d \sum S_{wr_i} c_{s_i}$$

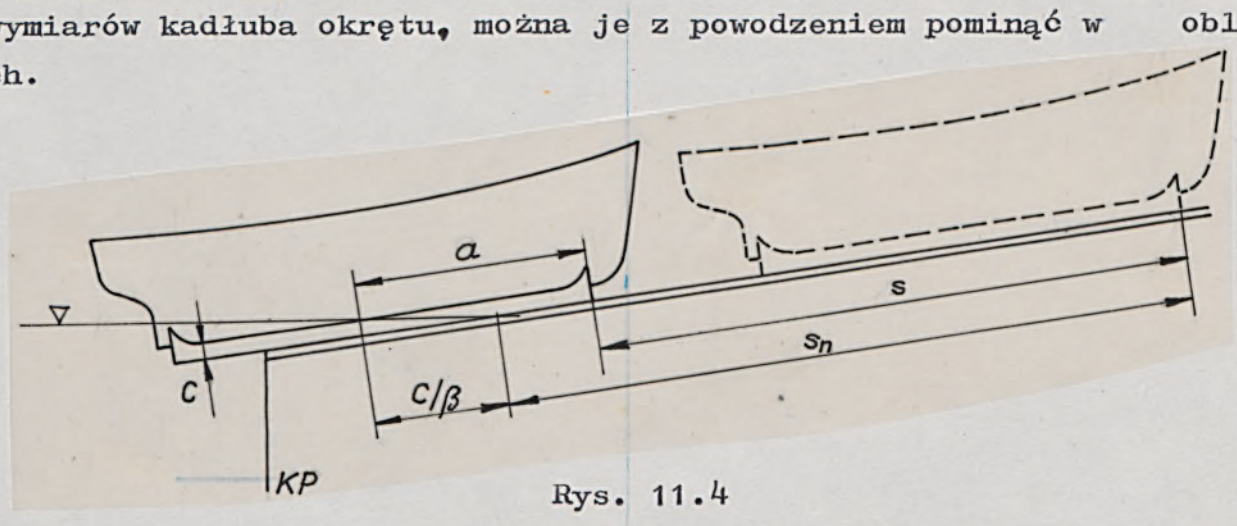
oraz moment statyczny objętości względem GKS

$$M_v = \int_L S_{wr} \cdot x dx = \frac{2}{3} d^2 \sum S_{wr_i} \cdot i \cdot c_{s_i} .$$



Rys. 11.3

Można tu od razu uwzględnić objętość i moment statyczny objętości pochodzący od płóz. Przy dużych statkach, gdy wymiary płóz są małe w stosunku do wymiarów kadłuba okrętu, można je z powodzeniem pominąć w obliczeniach.



Rys. 11.4

Te obliczenia mają na celu przedstawienie, jak zmienia się wyporność i jej moment w zależności od przebytej drogi (rys. 11.4), którą można określić z zależności

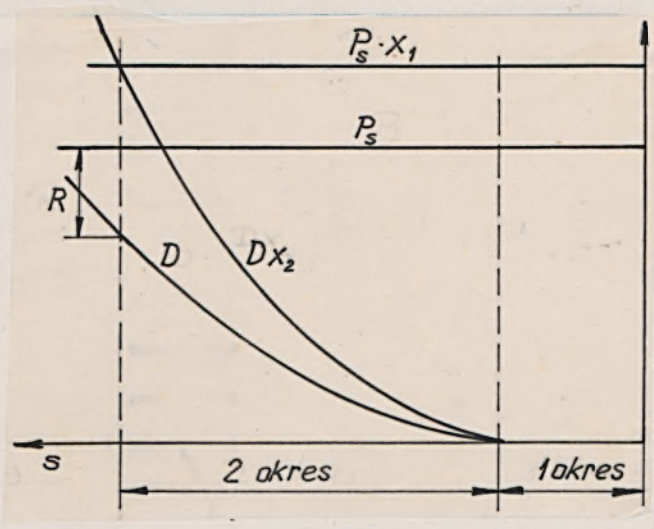
$$s = s_n + \frac{c}{\beta} - a. \qquad (11.10)$$

Obliczone wielkości pozwalają na sporządzenie wykresu (rys. 11.5), na którym przedstawione są siły P_s i D oraz momenty siły ciężaru i wyporu w funkcji przebytej drogi.

Zgodnie z równaniem (11.7) gdy $P_s x_1 = D x_2$, reakcja R zaczyna działać jako siła skupiona, a rufa statku unosi się. Zaczyna się więc obrót statku wokół GKS, zakończył się drugi okres wodowania i zaczyna się trzecia

1937 C4 C2
B-5
33%
ZGPP

S/272/89PG

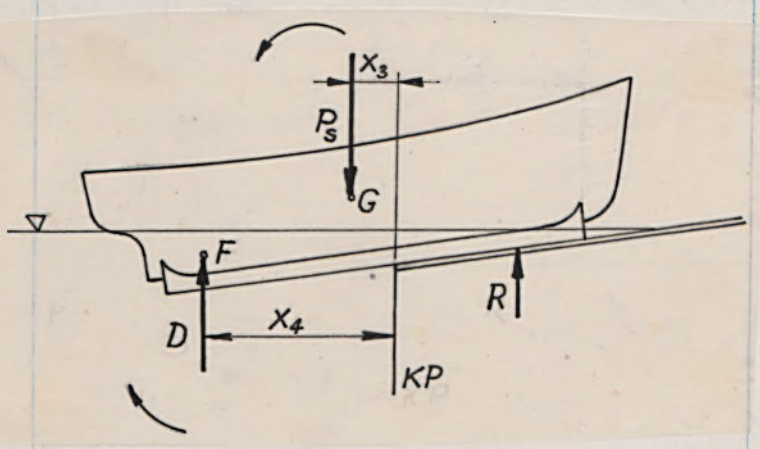


Rys. 11.5

faza. Ten moment wyznaczamy wykreślnie, jako punkt przecięcia się krzywej Dx_2 z prostą $P_s x_1$. Statek nie uzyskał jeszcze pełnej pływalności i jest podtrzymywany na pochylni siłą $R = P_s - D$. Reakcja ta jako siła skupiona ma w tym momencie największą wartość, która może dojść do 1/3 wodowanego ciężaru.

W drugim okresie wodowania zawsze sprawdza się czy przed obrotem wokół GKS nie wystąpi przeważenie okrętu, czyli czy statek nie wykazuje tendencji do wykonania obrotu wokół krawędzi pochylni. Tego zjawiska w czasie wodowania należy unikać, gdyż wywołuje ono nadmierne obciążenie progu pochylni, a moment gnący działający wówczas na okręt może być przyczyną odkształcenia wodowanej konstrukcji. Zjawisko to może mieć miejsce tylko przy przejściu środka ciężkości wodowanego okrętu poza krawędź pochylni. Zjawisko to nie wystąpi, gdy moment wyporu względem KP będzie zawsze większy od momentu ciężaru względem tej samej krawędzi, czyli (rys. 11.6) gdy

$$Dx_4 > P_s \cdot x_3. \qquad (11.11)$$

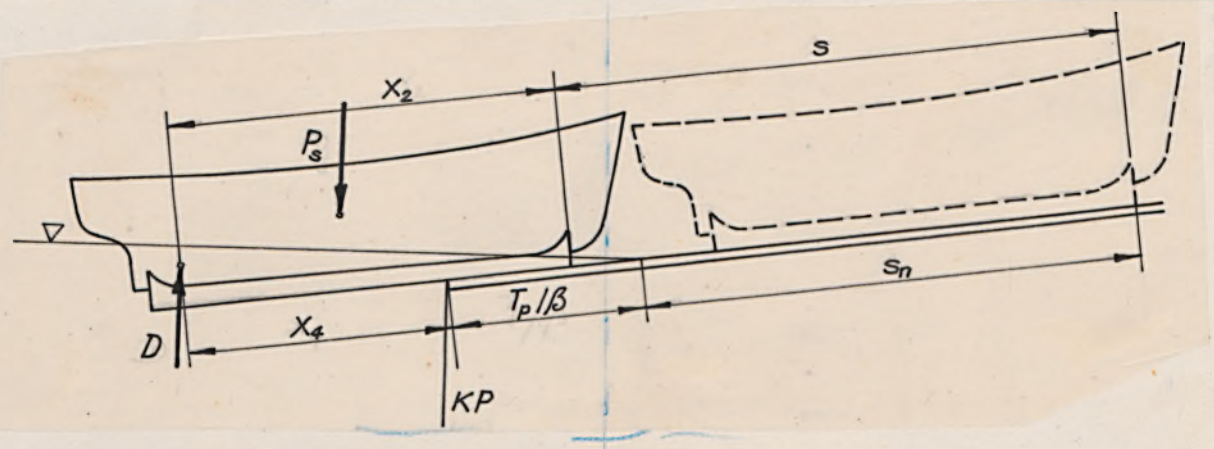


Rys. 11.6

Wykres momentu ciężaru będzie linią prostą, zatem do wykreślenia tej linii starczą dwa punkty. Wystarczy znaleźć punkt, w którym środek ciężkości mija KP, wówczas $P_s \cdot x_3 = 0$ i jeszcze drugi dowolny punkt. Od KP w kierunku pochylni ramiona są ujemne. Jeśli x_2 jest odciętą środka wyporu okrętu i płóz mierzoną od GKS, to odciętą tą od KP jest (rys. 11.7)

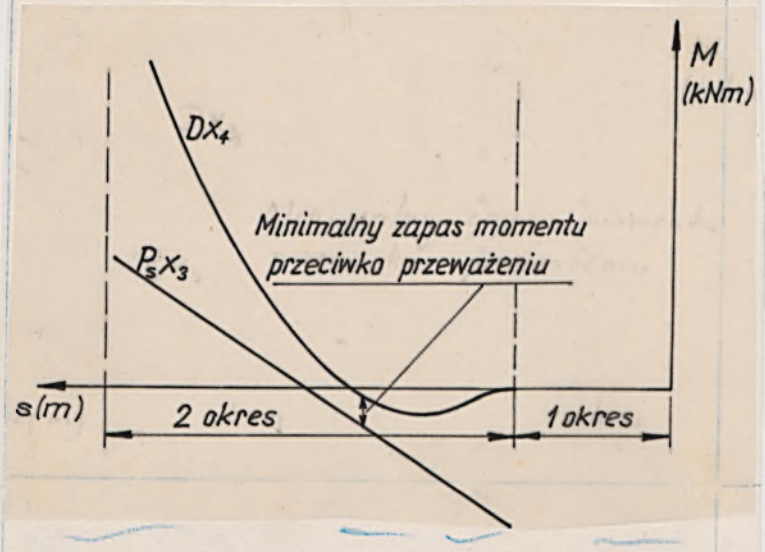
$$x_4 = s + x_2 - s_n - \frac{T_p}{\beta}. \qquad (11.12)$$

Przykładowo przebieg momentu ciężaru i momentu wyporu względem KP, gdy nie zachodzi niebezpieczeństwo przeważenia okrętu, przedstawia rys. 11.8. Obliczony moment wyporu musi być zawsze większy z pewną nadwyżką od momentu ciężaru. Musi być zachowany pewien zapas bezpieczeństwa na możliwe niedokładności, m.in. w obliczeniu środka ciężkości okrętu. Należy tu także uwzględnić możliwość wahania poziomu wody. Im woda jest niższa, tym



Rys. 11.7

większa możliwość przeważenia okrętu. Gdy krzywa momentu wyporu jest zbyt bliska do momentu ciężaru, należy przesunąć środek ciężkości okrętu w kierunku dziobu przez dodanie balastu do części dziobowej. Takie jednak rozwiązanie powoduje dodatkowe obciążenie kołyski dziobowej, co też jest niepożądane. Zabezpieczenie się przed przeważeniem może iść w kierunku zmiany kąta nachylenia linii stępki α lub ostatecznym rozwiązaniem może być doczepienie



Rys. 11.8

dodatkowych pontonów w rufowej części okrętu.

Trzeci okres wodowania jest najbardziej krytyczny, a to głównie ze względu na występujące duże naciski na kołyskę dziobową, zwłaszcza w początkowej fazie i duże momenty gnące. W okresie tym równanie sił ma taką samą postać jak w okresie drugim, czyli

$$P_s = D + R,$$

natomiast przez cały czas trwania trzeciego okresu moment wyporu jest stały i równy momentowi ciężaru względem GKS

$$P_s x_1 = Dx_2. \qquad (11.13)$$

Cechą charakterystyczną tego okresu jest zsuwanie się statku z pochylni przy równoczesnym zmniejszaniu przegłębienia. Wyporność przyrasta już teraz znacznie wolniej, a środek wyporu przesuwa się w kierunku dziobu. W miarę wzrostu siły wyporu maleje reakcja R aż do momentu, gdy osiągnie wartość zerową i statek traci kontakt z pochylnią. Obliczenia wzrostu wyporności w tym okresie muszą być poprzedzone wyznaczeniem wodnicy pływania, jaką będzie mieć okręt w czwartym okresie, czyli gdy będzie już swobodnie pływać na wodzie.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33°

Jeśli pominiemy wpływ urządzeń spustowych, przy znanym ciężarze $P = g\varrho V$ i położeniu środka ciężkości x_G, z wykresu hydrostatycznego dla statku przegłębionego dla V i $x_F \approx x_G$ od razu można odczytać zanurzenie rufy T_R i dziobu T_D. Jeśli nie posiadamy takiego wykresu, to z arkusza krzywych hydrostatycznych dla wyporności V należy odczytać zanurzenie średnie T, a dla tego zanurzenia odciętą środka wyporu x_F, odciętą środka ciężkości wodnicy pływania x_c i jednostkowy moment przegłębiający M_j. Działający na statek moment przegłębiający

$$M_{py} = \varrho V(x_G - x_F)$$

wywoła przegłębienie równe

$$t = \frac{M_{py}}{M_j} .$$

Zanurzenie rufy będzie więc równe

$$T_R = T - (\frac{L}{2} + x_c)\ \frac{t}{L}$$

a dziobu

$$T_D = T + (\frac{L}{2} - x_c)\ \frac{t}{L} .$$

W celu podniesienia dokładności wyniku, gdy przegłębienie zwodowanego okrętu jest znaczne, tzn. gdy kąt przegłębienia okrętu jest bliski kątowi nachylenia pochylni (kąt Θ musi być zawsze mniejszy od kąta β, gdyż w przeciwnym wypadku dojdzie do przeważenia statku na pochylni), oblicza się dla danego V w drugim przybliżeniu zanurzenie średnie ze wzoru (7.30).

$$T = \frac{1}{2}\ (T_R + T_D) + x_c' \frac{t}{L},$$

gdzie

$$x_c' = x_c + \frac{1}{2}\varrho_L \frac{t}{L} .$$

Wartość x_c' dla współczesnych statków morskich jest z reguły ujemna.

Tak obliczoną wodnicę pływania należy nanieść na skalę Bonjeana. Na skalę Bonjeana należy też nanieść wodnicę, przy której zaczyna się obrót wokół GKS. Jeśli więc z wykresu momentów względem GKS znamy drogę s, po przebyciu której wystąpi początek obrotu okrętu, to ze wzoru (11.10) można obliczyć odcinek a

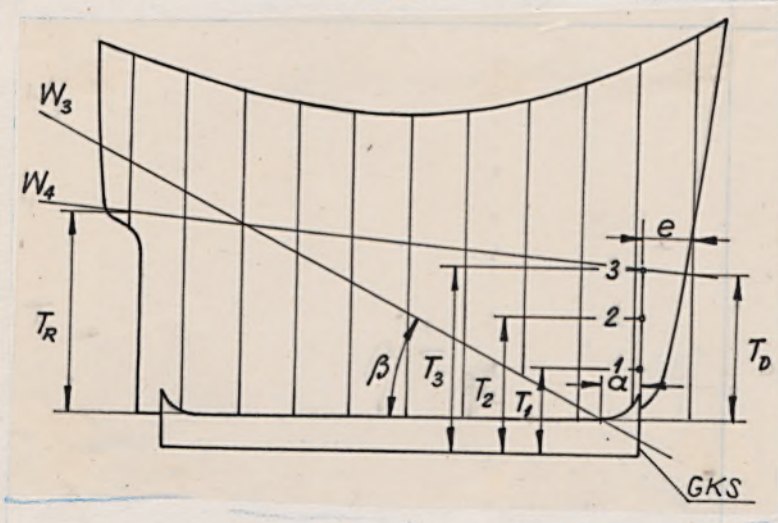
$$a = s_n + \frac{c}{\beta} - s,$$

który po odłożeniu na GKS na linii stępki określa szukaną wodnicę wykreśloną na skali Bonjeana, pod kątem β z uwzględnieniem dwu różnych podziałek obrysu statku (rys. 11.9). Gdy obrót nastąpi po wejściu całych płóz pod wodę, wielkość a będzie ujemna, należy więc ją odłożyć z prawej strony punktu wyznaczającego górną krawędź płóz. Zawarta między tymi

1937 04 02
B-5
33%
ZGPP

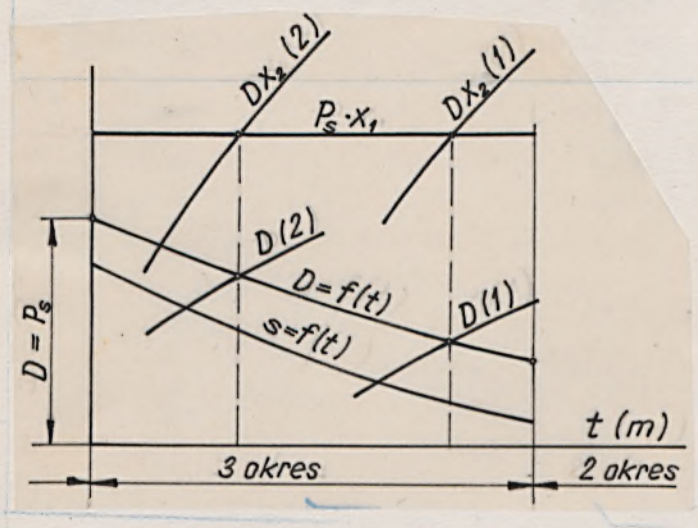
S/242/83PG

dwoma tak wyznaczonymi wodnicami objętość musi zanurzyć się pod wodę podczas całego trzeciego okresu wodowania. Rozkład tej objętości w funkcji przebytej drogi określa się w następujący sposób. Przez krawędź GKS prowadzimy prostą prostopadłą do linii stępki. Na prostej tej między wodnicami W_3 i W_4 lub między linią stępki i W_4 nanosimy punkty 1 i 2 tak, aby cały ten odcinek podzielony był na trzy części. Przez punkt 1 i 2 prowadzimy pęk wodnic w taki sposób, aby objąć objętości zawarte między wodnicami W_3 i W_4. Wystarczy dla każdego punktu wykreślić cztery wodnice. Dla tych wodnic pomocniczych w oparciu o pola przekrojów wrężnicowych i ich odległości od GKS obliczamy wypór $D = g\varrho V$ i moment statyczny tej siły $g\varrho Vx_2$. Obliczone wartości, dla każdego punktu oddzielnie nanosimy na dodatkowy wykres w funkcji przegłębienia okrętu $t = T_R - T_D$ lub kąta przegłębienia θ. Punkty przecięcia się momentów wyporu z linią prostą przedstawiającą moment statyczny ciężaru wyznaczają przegłębienie dla punktu 1 i 2, przy którym spełniony jest warunek równości obu momentów statycznych. Dla tych przegłębień można już z tego wykresu odczytać odpowiadający tym punktom wypór. Punktom tym odpowiada przebyta droga s. Statek zanurzy się do punktu 1 wówczas, gdy przesunie się na odległość



Rys. 11.9

$$s = \frac{T_1}{\beta} + s_n, \qquad (11.14)$$



Rys. 11.10

gdzie T_1 jest zanurzeniem tego punktu mierzonym na wysokości GKS wraz z uwzględnieniem wysokości płóz c. W podobny sposób można wyznaczyć przebytą drogę dla punktu 2, a następnie na tym dodatkowym wykresie można wykreślić przebytą drogę w funkcji przegłębienia okrętu (rys. 11.10).

Odległość s, przy której okręt uzyskuje pełną pływalność, co odpowiada końcowi trzeciego okresu i początkowi pływania swobodnego, wyznaczyć można z warunku zanurzenia okrętu do wodnicy W_4 na wysokości GKS (rys. 11.9).

$$s_4 = \frac{T_3}{\beta} + s_n = \frac{1}{\beta}\left(T_D + c + e\frac{t}{L}\right) + s_n. \qquad (11.15)$$

3. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/242/83
B-5
33

Jest to oczywiście ważne tylko wówczas, gdy odległość ta jest mniejsza lub równa długości nadwodnej i podwodnej części pochylni

$$s_4 \leqslant s_n + \frac{T_p}{\beta} . \qquad (11.16)$$

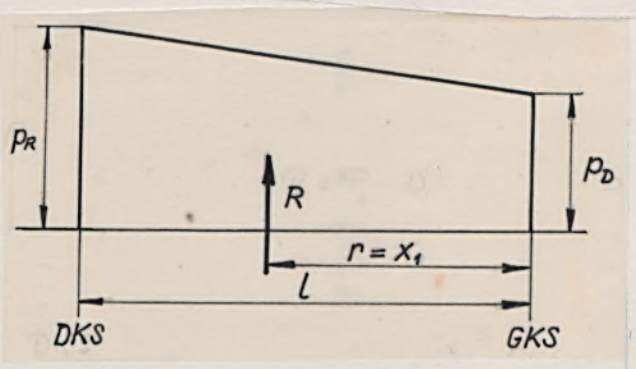
Gdy ten warunek nie jest spełniony, długość podwodnej części pochylni jest niewystarczająca i następuje zeskok statku z pochylni.

Statyczne obliczenia wodowania wzdłużnego obejmują jeszcze oszacowanie występujących nacisków. Wypadkowa obciążenia pochylni

$$R = P_s - D$$

działa w odległości od GKS

$$r = \frac{P_s x_1 - D x_2}{P_s - D} .$$



Rys. 11.11

W celu przybliżonej oceny nacisków można założyć [4], że reakcja ta ma rozkład trapezu, działając na długości równej długości płóz l. Obliczenia sprowadzają się do oceny nacisków występujących przy DKS i GKS. Z równania sił i momentów przy dwu płozach

$$R = 2b\left[p_D\, l + (p_R - p_D)\,\frac{l}{2}\right] \qquad (11.17)$$

$$R \cdot r = 2b\left[p_D\,\frac{l^2}{2} + (p_R - p_D)\,\frac{l^2}{3}\right], \qquad (11.18)$$

wyznaczyć można naciski w skrajnych częściach płóz

$$p_D = \frac{P_s - D}{l \cdot b}\left(2 - \frac{3r}{l}\right) , \qquad (11.19)$$

$$p_R = \frac{P_s - D}{lb}\left(\frac{3r}{l} - 1\right). \qquad (11.20)$$

Zależności te są ważne, gdy wypadkowa reakcja R działa w odległości od GKS w granicach

$$\frac{1}{3}\, l < r < \frac{2}{3}\, l.$$

Gdy zbliża się moment przeważenia okrętu wokół KP, kołyska dziobowa jest odciążana, wartość p_D może być ujemna, rozkład nacisków ma postać trójkąta z maksymalną wartością na progu pochylni. Z równania siły i momentu

$$P_s - D = xb \cdot p_R, \qquad (11.21)$$

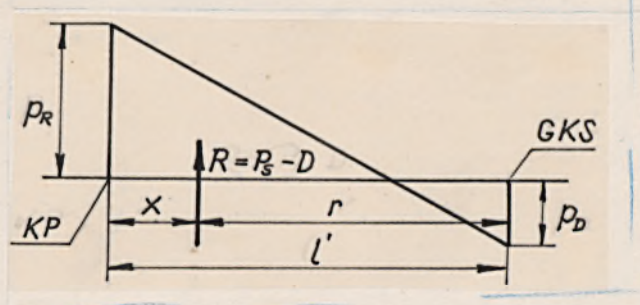
1986 06 17
B-5
33%
ZGPP

S/272/88 PG

$$(P_s - D)r = xbp_R\left(1 - \frac{1}{3}x\right) \qquad (11.22)$$

wyznaczyć można nacisk występujący na pochylni (gdyż wówczas DKS jest poza pochylnią)

$$p_R = \frac{P_s - D}{3b(1-r)} . \qquad (11.23)$$



Rys. 11.12

Taka sytuacja ma miejsce, gdy wypadkowa $R = P_s - D$ znajduje się w przedziale

$$\frac{2}{3}\,1 < r < 1,$$

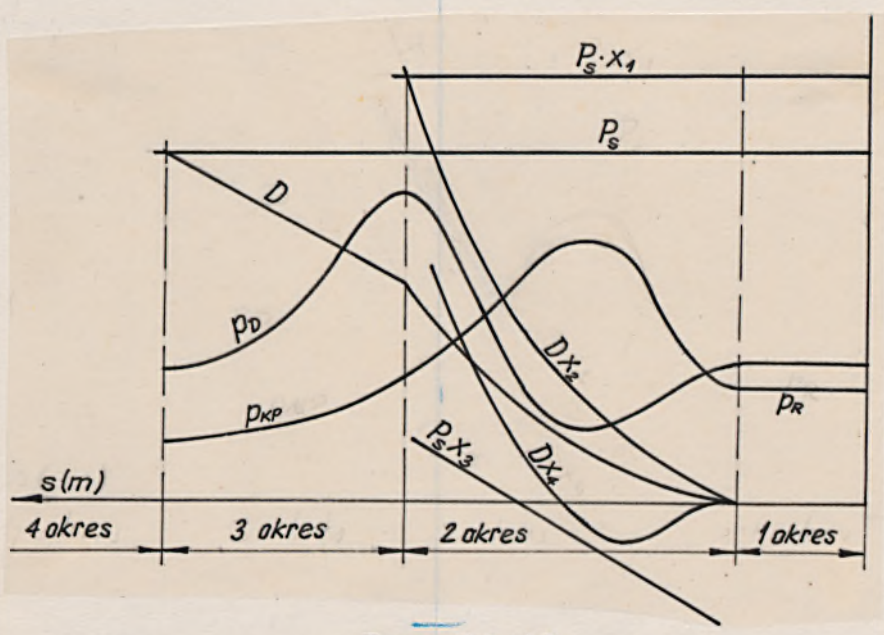
gdzie 1 jest aktualną długością płóz znajdującą się w danej chwili na pochylni. Natomiast gdy punkt przyłożenia naporu jest bliski GKS, tzn. gdy

$$0 < r < \frac{1}{3}\,1,$$

co ma miejsce, gdy zbliża się moment obrotu, wówczas nacisk na GKS wynosi

$$p_D = \frac{P_s - D}{3br} . \qquad (11.24)$$

Naciski przy obrocie są znacznie wyższe, niż to ma miejsce przy ześlizgu przed obrotem. Średnio wahają się w granicach 400-550 kN/m^2, choć znane są wypadki, że naciski dochodziły do 1500 kN/m^2. Nie należy jednak dopuszczać do zbyt wysokich obciążeń i naciski winny występować w granicach przeciętnych. Wyznaczenie nacisków ma nie tylko istotne znacze-



Rys. 11.13

nie przy projektowaniu urządzenia spustowego, lecz wartości te służą także jako wytyczne przy projektowaniu pochylni.

Wyniki omówionych tu obliczeń, wykonanych zgodnie z zasadami statyki okrętu, przedstawia się w funkcji przebytej drogi na tzw. głównym wykre-

sie wodowania. Wykres taki przedstawia rys. 11.13. Wpływ na te krzywe ma zanurzenie progu pochylni. Jeśli poziom wody ulega wahaniu, zmiana ta nie wpływa na wielkość siły wyporu i jej momentów, jak również na reakcję pochylni, lecz powoduje ich przesunięcie na wykresie. Jeśli obliczenia dotyczą zanurzenia progu T_{p_1}, to dla zanurzenia T_{p_2} krzywe te winny być przesunięte o

$$\Delta s = - \frac{T_{p_2} - T_{p_1}}{\beta} . \qquad (11.25)$$

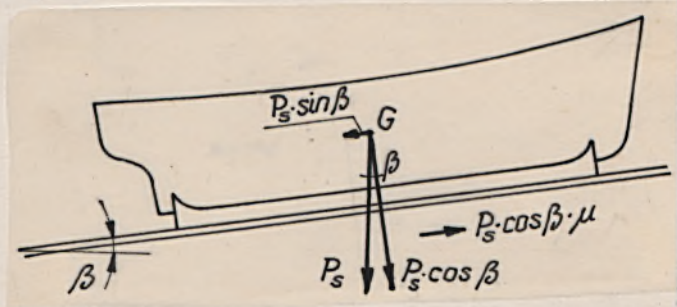
Jeśli więc $T_{p_2} > T_{p_1}$, długość podwodnej części pochylni powiększa się, zatem obrót i spłynięcie statku z pochylni nastąpi wcześniej. Moment Dx_4 wówczas także przesuwa się w prawo, natomiast moment ciężaru $P_s \cdot x_3$ pozostaje w tym samym miejscu - powiększa to zapas momentu przeciwko przeważeniu. Odwrotnie zaś - im niższy jest stan wody, tym większa możliwość obrotu wokół KP i większe naciski na KP.

Statyczne obliczenia zakładają m.in. nieodkształcalną powierzchnię wody. W rzeczywistości pod wpływem ruchu okrętu występuje spiętrzenie wody bezpośrednio przy rufie statku i obniżenie zwierciadła wody wzdłuż kadłuba. Szczególnie wyraźnie to widać, gdy część pochylni jest ograniczona pionowymi ścianami, co występuje przy pochylniach bramowych. Z tego powodu obrót statku następuje później niż to wynika z obliczeń statycznych, tak jakby wodowanie odbywało się przy niższym stanie wody. Dlatego też statyczne obliczenia nie dają pełnej gwarancji poprawności wyników. Musi więc być zawsze zachowany pewien zapas bezpieczeństwa, szczególnie gdy chodzi o zabezpieczenie przed przeważeniem.

Niepewna jest również ocena wodowanego ciężaru i położenia środka ciężkości, więc i tu trzeba przyjąć możliwość pewnego błędu.

11.4. Dynamiczne obliczenia wodowania wzdłużnego

Tego typu obliczenia polegają głównie na określeniu prędkości wodowanego okrętu. Obliczona prędkość w funkcji przebytej drogi także winna znaleźć się na głównym wykresie wodowania. Prędkość ta jest podstawą do zaprojektowania odpowiednich urządzeń hamujących, umożliwiających zatrzymanie zwodowanego statku przed osiągnięciem przeciwległego brzegu.



Rys. 11.14

Na okręt stojący na pochylni działa siła ciężaru okrętu i urządzeń spustowych z nim związanych oraz reakcja pochylni. Siłę ciężaru można rozłożyć na składową równoległą do pochylni i normalną (rys. 11.14). Siła, pod wpływem której wystąpi ruch okrętu wzdłuż pochylni, jest równa

$$F = P_s \sin\beta - P_s \cos\beta \cdot \mu_s \approx P_s(\beta - \mu_s) . \qquad (11.26)$$

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33

Aby więc po zwolnieniu stoperów nastąpił samoczynny ruch, musi być spełniony warunek

$$\beta > \mu_s, \tag{11.27}$$

czyli kąt nachylenia pochylni powinien być większy od spoczynkowego współczynnika tarcia.

W celu odpowiedniego przygotowania wodowania należy założyć tu możliwie duży współczynnik tarcia μ_s, a dla zapewnienia ruchu okrętu przewidzieć urządzenia hydrauliczne, które dadzą odpowiedni impuls, gdy okręt sam nie ruszy z miejsca. Z chwilą ruszenia statku współczynnik tarcia μ_d jest znacznie mniejszy od wartości spoczynkowej μ_s i ruch będzie kontynuowany.

Równanie różniczkowe ruchu w pierwszym okresie wodowania ma postać

$$\frac{P_s}{g}\ddot{s} - P_s(\beta - \mu_d) = 0. \tag{11.28}$$

Jeśli β i μ_d są stałe, stałe też jest w tym okresie także przyspieszenie

$$\ddot{s} = g(\beta - \mu_d). \tag{11.29}$$

Dla chwili $t = 0$ statek stoi jeszcze na pochylni w swym początkowym miejscu, więc $s = 0$ i $\dot{s} = 0$, a po upływie czasu t prędkość jest

$$\dot{s} = g(\beta - \mu_d)t \tag{11.30}$$

i przebyta droga

$$s = \frac{1}{2} g(\beta - \mu_d)t^2 , \tag{11.31}$$

a z tych dwu zależności wynika prędkość statku w funkcji przebytej drogi

$$\dot{s} = \vartheta = \sqrt{2g(\beta - \mu_d)s}. \tag{11.32}$$

W przypadku gdy współczynnik tarcia μ_d zależy od przebytej drogi, co w rzeczywistości ma miejsce, gdyż μ_d zależy z kolei od występujących nacisków, a przy pochylni łukowej β jest zmienne, to wówczas

$$\dot{s} = \vartheta = \sqrt{2g \int_0^{s_z} (\beta - \mu_d)ds}, \tag{11.33}$$

gdzie całkę tę obliczyć można numerycznie, uwzględniając zmienność μ_d lub μ_d i β.

Gdy statek wchodzi do wody, pojawia się siła wyporu i reakcja hydrodynamiczna w postaci oporu wody, w założeniu proporcjonalna do kwadratu prędkości okrętu. Równanie ruchu można więc przedstawić w postaci

$$\frac{P_s}{g}\ddot{s} - R(\beta - \mu_d) + k\dot{s}^2 = 0, \tag{11.34}$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/242/85
8-5
33%

z którego prędkość można wyznaczyć numerycznie dla wybranych punktów drogi. Jeśli np. pominąć opór wody, to przyspieszenie w drugim i trzecim okresie jest równe

$$\ddot{s} = \left(1 - \frac{D}{P_s}\right) g\,(\beta - \mu_d), \qquad (11.35)$$

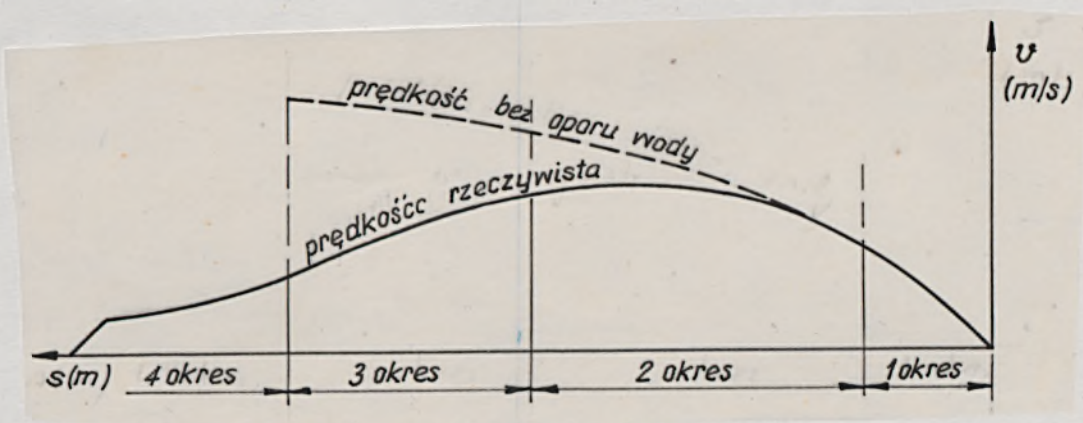
które można obliczyć dla określonych wartości s z krzywej D danej na wykresie wodowania. Wówczas prędkość jest równa

$$\dot{s} = \sqrt{\left(1 - \frac{D}{P_s}\right) g(\beta - \mu_d) 2s} \qquad (11.36)$$

lub

$$\dot{s} = \sqrt{2 \int_{s_1}^{s_4} \ddot{s}\, ds}, \qquad (11.37)$$

którą to całkę można obliczyć numerycznie jako pole pod krzywą przyspieszeń wyznaczonych wzorem (11.35) w obszarze od początku pierwszego okresu do początku czwartej fazy. Tak obliczona krzywa określa wartości graniczne. Jeśli jeszcze przyjąć maksymalnie niską wartość współczynnika tarcia μ_d, będzie to maksymalna możliwa prędkość wodowania okrętu. Pomiary wykonywane podczas wodowania wykazują mniejsze wartości. Należy więc w obliczeniach prędkości uwzględnić opór wody, jak również dodatkową siłę potrzebną do obniżenia prędkości ześlizgującego się w końcowej fazie okrętu, aby następnie łatwo można było zatrzymać statek na wodzie.



Rys. 11.15

Można napisać [4], że wzdłuż drogi statku działa siła, która przyspiesza lub opóźnia jego ruch, na którą to siłę ma wpływ szereg składników

$$F = F_o - F_1 - F_2 - F_3 - F_4, \qquad (11.38)$$

gdzie: $F_o = P_s \cdot \beta$ - składowa wodowanego ciężaru,
$F_1 = D \cdot \beta$ - składowa siły wyporu,
$F_2 = (P_s - D)\,\mu_d$ - opór tarcia po pochylni,
$F_3 = k \cdot \vartheta^2$ - opór kadłuba i urządzeń spustowych w wodzie,
$F_4 = gm\,\mu_m$ - opór urządzeń hamujących,

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS S/272/89
B-5
33°

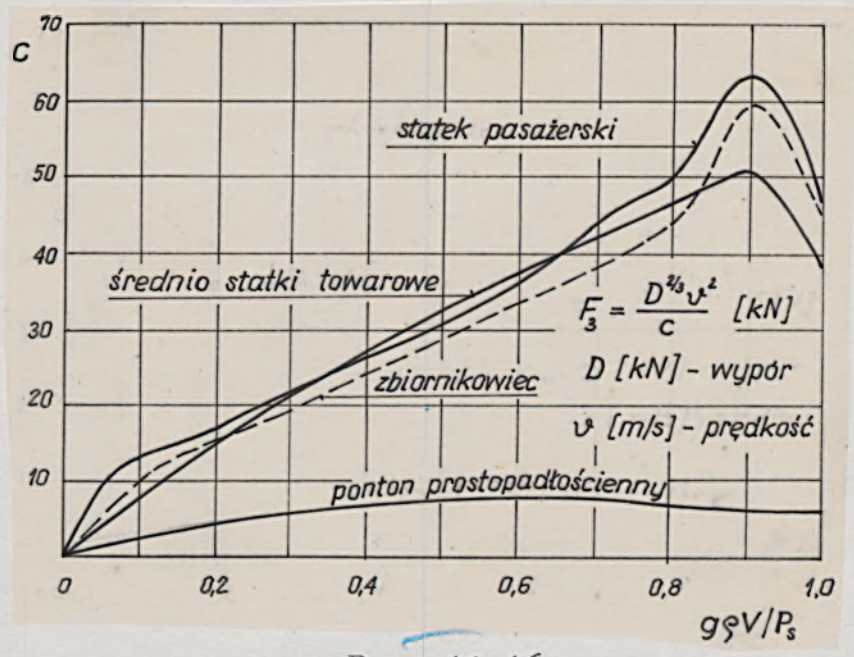
k – współczynnik oporu wody,

m – masa wleczonych ciężarów, jeśli taki sposób został zastosowany do zmniejszenia prędkości,

μ_m – współczynnik tarcia wleczonych ciężarów po pochylni.

Na podstawie analizy całego szeregu wodowań można przyjąć, że współczynnik oporu wody jest równy

$$k = \frac{D^{2/3}}{c},$$



Rys. 11.16

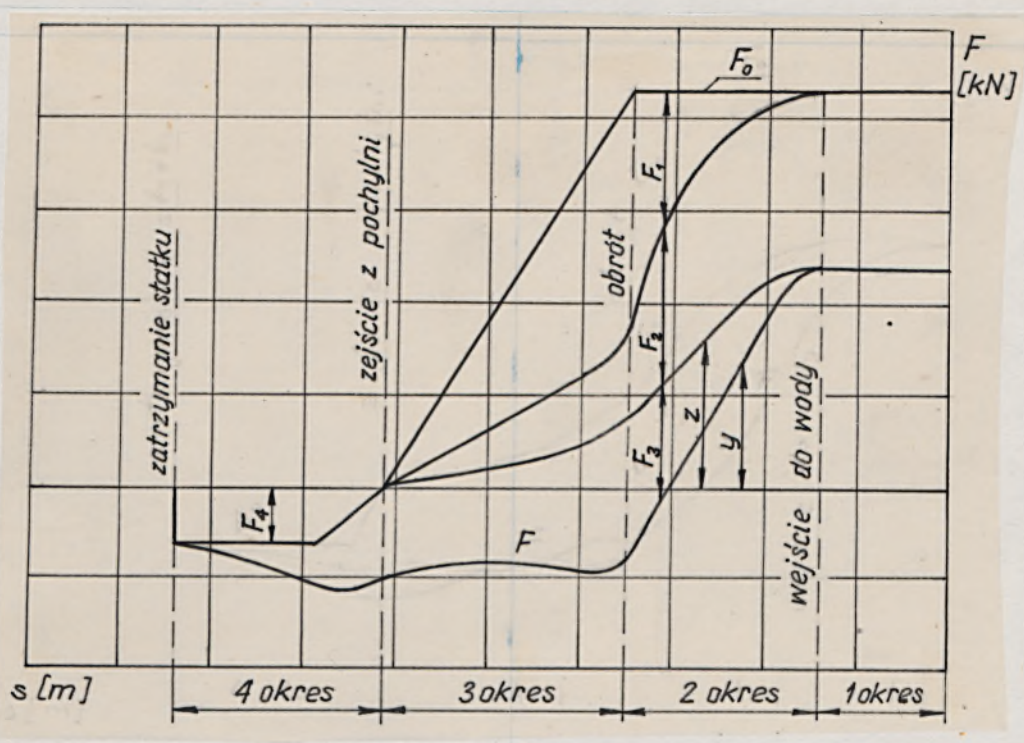
gdzie D jest aktualną wyporności na przyjętym odcinku drogi, natomiast współczynnik c przyjmować można z rys. 11.16. Jednym z popularnych i bardzo skutecznych sposobów zmniejszających prędkość wodowanego okrętu jest wleczenie wzdłuż pochylni pęków łańcuchów kotwicznych. Używa się całego szeregu wiązek łańcuchów, które w miarę przemieszczania się okrętu stopniowo, parami z obu burt, zaczynają być ciągnione przez okręt. Współczynnik tarcia μ_m zależy od rodzaju podłoża, po którym wiązki łańcuchów są wleczone. Kilka wartości μ_m podano w tabeli 11.2.

T a b e l a 11.2

Współczynniki tarcia łańcuchów na pochylni

Rodzaj podłoża	μ_m
Twarda, ubita ziemia	0,65 - 0,75
Gładki beton	0,35 - 0,45
Piasek na betonie	0,65 - 0,70

Przykładowy wykres sił działających na okręt wzdłuż pochylni o stałym kącie β przedstawia rys. 11.17. Widać z tego wykresu, że energia wodowanego okrętu jest absorbowana przez wzrastający wypór, tarcie na pochylni, opór kadłuba w wodzie i opór urządzeń hamujących. Energia ta do danego odcinka drogi s jest równa



Rys. 11.17

$$E = \int_0^s F \, ds, \tag{11.39}$$

a odpowiadająca tej drodze prędkość wynosi

$$\vartheta = \left(\frac{2gE}{P_s} \right)^{1/2}. \tag{11.40}$$

Energia w stanie początkowym jest energią potencjalną i równa jest iloczynowi wodowanego ciężaru i pionowej odległości, o jaką przesunie się środek ciężkości okrętu po zakończeniu wodowania. Jest ona równoważna polu pod linią F_o czyli

$$E_p = \int_0^{s_3} P_s \psi \, ds, \tag{11.41}$$

gdzie kąt ψ zmienia się w granicach od $\psi = \beta$ w początkowym okresie wodowania do kąta $\psi = 0$ przy pływaniu swobodnym. Aby uniknąć kolejnych przybliżeń przy określaniu prędkości, gdyż opór kadłuba w wodzie zależy głównie od prędkości ϑ, siłę F, która działa na okręt, można przedstawić w postaci

$$F = (F_o - F_1 - F_2 - F_4) - F_3$$

lub

$$y = z - k\vartheta^2. \tag{11.42}$$

Między dwoma kolejnymi punktami drogi $\Delta s = s_{i+1} - s_i$ znajdującymi się w niezbyt dużej odległości od siebie, np. 5 lub 10 m, przyrost lub ubytek energii kinetycznej, zgodnie ze wzorem trapezów, jest w przybliżeniu równy

$$E_{i+1} - E_i = \frac{\Delta s_i}{2} (y_{i+1} + y_i) \tag{11.43}$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

i wówczas

$$E_{i+1} = E_i + \frac{\Delta s_i}{2}\left[(z_{i+1} - k_{i+1}\cdot \vartheta_{i+1}^2) + (z_i - k_i \cdot \vartheta_i^2)\right]$$

lub

$$\frac{P_s}{2g}\vartheta_{i+1}^2 + \frac{\Delta s_i}{2} k_{i+1}\cdot \vartheta_{i+1}^2 = \frac{P_s \cdot \vartheta_i^2}{2g} - \frac{\Delta s_i}{2}\cdot k_i \cdot \vartheta_i^2 + \frac{\Delta s_i}{2}(z_{i+1} + z_i)$$

Stąd prędkość w punkcie s_{i+1}, gdy znamy prędkość ϑ_i w punkcie s_i, jest równa

$$\vartheta_{i+1} = \left[\frac{(P_s - \Delta s_i g k_i)\,\vartheta_i^2 + \Delta s_i g (z_{i+1} + z_i)}{P_s + \Delta s_i g k_{i+1}}\right]^{1/2} . \qquad (11.44)$$

Za warunki początkowe można przyjąć prędkość w chwili zakończenia pierwszego okresu wodowania, określoną wzorem (11.32). Począwszy od tego punktu dla kroku Δs_i obliczać należy kolejno prędkości dla odpowiedniej drogi s_i. Wartość sił z_{i+1} i z_i można określić z przygotowanego wykresu sił $z = F_o - F_1 - F_2 - F_4$ (rys. 11.17), a współczynnik oporu k_i dla odpowiedniej drogi w zależności od wyporności D i współczynnika c z rys. 11.16. Wykreślając obliczone prędkości na głównym wykresie wodowania można określić, w którym miejscu statek zostanie zatrzymany i czy masa łańcuchów użytych do hamowania została przyjęta prawidłowo.

Należy jeszcze rozpatrzyć ewentualny zeskok statku z pochylni, który wystąpi, gdy zanurzenie progu pochylni T_p będzie mniejsze od wysokości wodnicy pływania swobodnego wraz z płozami na wysokości GKS, czyli $T_p < T_3$,

gdzie $$T_3 = c + T_D + e\,\frac{t}{L}$$ (por. rys. 11.9)

W tym wypadku, gdy GKS znajduje się na progu pochylni a statek nie uzyskał jeszcze pełnego wyporu, jest więc wychylony na dziobie z położenia równowagi o wielkość $T_3 - T_p$ następuje zeskok, czyli tzw. ukłon statku. Pod wpływem tego wymuszonego ruchu statek na dziobie zanurzy się początkowo głębiej niż wskazuje to obliczona wodnica W_4. Gdyby pominąć opór wody, pionowy ruch dziobu byłby wówczas $2(T_3 - T_p)$, ze względu na obecność jednak silnego tłumienia wody można przyjąć, że dziób statku wykona ruch w pionie równy w przybliżeniu $1{,}7\,(T_3 - T_p)$. Zgodnie z teorią kołysań wzdłużnych na wodzie spokojnej pełny okres takiego ruchu jest w przybliżeniu równy

$$T_\Theta \approx 2{,}8\sqrt{T\,\frac{\delta}{\alpha}}\,, \qquad (11.45)$$

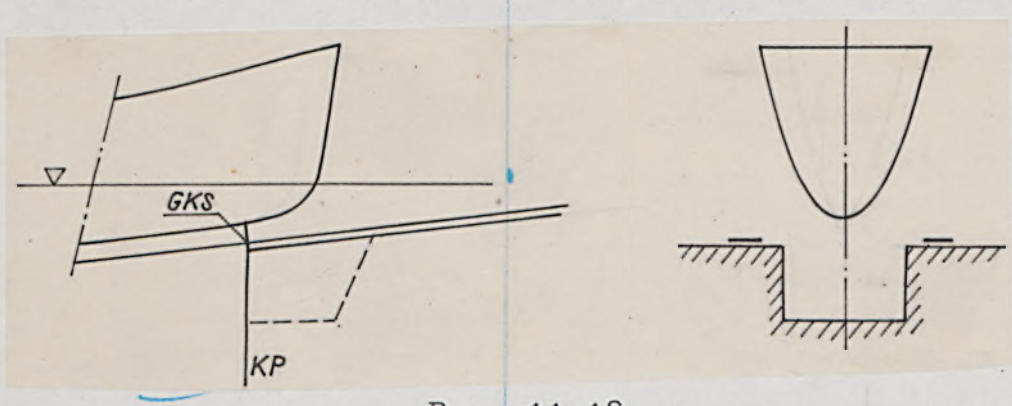
gdzie T jest średnim zanurzeniem okrętu.

Średnia więc liniowa prędkość dziobu pionowo w dół będzie w przybliżeniu wynosić

$$\dot{s} = \frac{3{,}4(T_3 - T_p)}{2{,}8\sqrt{T\,\delta/\alpha}} = \frac{1{,}21(T_3 - T_p)}{\sqrt{T\cdot \mathfrak{Ae}}}\,. \qquad (11.46)$$

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/88
B-5
33%

Z drugiej strony statek ma jeszcze ruch postępowy wzdłuż pochylni o prędkości równej prędkości na progu pochylni. Przez złożenie tych dwóch ruchów można ocenić, czy nastąpi uderzenie dziobem o próg pochylni.



Rys. 11.18

Niektóre pochylnie o ograniczonym zanurzeniu progu miewają przy progu wnękę, która zabezpiecza dziób mimo zeskoku przed zetknięciem się z pochylnią (rys. 11.18).

Przykład 11.1

W czasie pierwszego okresu wodowania zmierzono przebytą przez okręt drogę i odpowiadający czas, uzyskując następujące wyniki

droga s (m)	5	10	15
czas t (s)	5,6	7,9	9,7

Nachylenie pochylni wynosi $\beta = 0{,}0588$. Obliczyć dynamiczny współczynnik tarcia.

Rozwiązanie:

Przyspieszenie w tym okresie jest równe

$$\ddot{s} = g(\beta - \mu_d),$$

stąd współczynnik tarcia jest równy $\mu_d = \beta - \frac{\ddot{s}}{g}$.

Ponieważ droga w ruchu jednostajnym przyspieszonym jest

$$s = \frac{1}{2}\ddot{s}\,t^2,$$

stąd $\ddot{s} = \frac{2s}{t^2}$ i $\mu_d = \beta - \frac{2s}{gt^2}$.

Wyniki dla odpowiednich pomiarów wynoszą: 0,0263; 0,0261; 0,0263, średni więc współczynnik tarcia wynosi $\mu_d = 0{,}0262$.

11.5. Wodowanie boczne

Wodowanie boczne jest zjawiskiem typowo dynamicznym i w żadnym wypadku do jego obliczenia nie można przyjmować zasad statycznych. Zjawisko to

6. 11. 1984 S/14/85 PG MS S/242/83
B-5
33%

trwa znacznie krócej niż wodowanie wzdłużne. Do prognozy przebiegu wodowania wykorzystuje się wyniki uzyskane z pomiarów wodowań statków podobnych, z badań modelowych lub określa się ten proces w sposób obliczeniowy. Metody obliczeniowe polegają na opisie zjawiska nieliniowymi równaniami różniczkowymi, w których niektóre współczynniki należy obliczyć w oparciu o linie teoretyczne, inne zaś określić na podstawie doświadczeń wykonanych w skali rzeczywistej lub modelowej.

Wodowanie boczne, podobnie jak i wzdłużne, dzieli się na cztery charakterystyczne okresy. Przyjmując, że próg pochylni znajduje się powyżej poziomu wody, jak to ma miejsce w polskich stoczniach, a dzięki czemu unika się kosztownych prac podwodnych, mamy do czynienia z tzw. wodowaniem bocznym z zeskokiem. Okresy te są wtedy następujące:

Okres pierwszy - statek po zwolnieniu stoperów zsuwa się w dół torów spustowych. Okres ten kończy się z chwilą początku obrotu dookoła krawędzi pochylni.

Okres drugi - statek ześlizguje się płozami po krawędzi pochylni, wykonując jednocześnie obrót dookoła tej krawędzi. Okres kończy się z chwilą zetknięcia się kadłuba z wodą.

Okres trzeci - statek wykonuje w dalszym ciągu ześlizg i obrót, zaczynając się jednocześnie zanurzać w wodzie. Pojawiają się siły oporu i wyporu wody. Okres kończy się z chwilą zejścia płóz z pochylni.

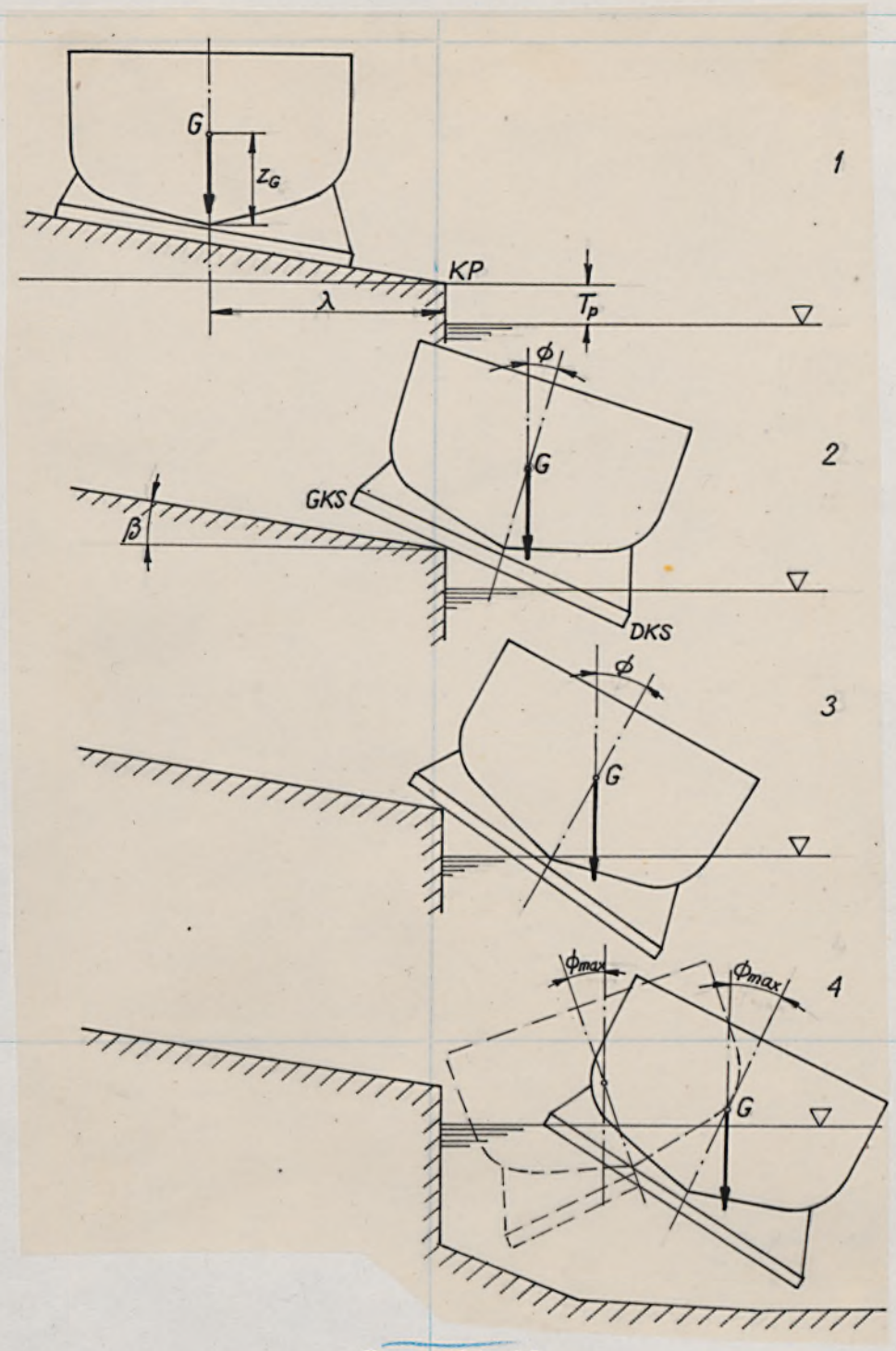
Okres czwarty - statek pływa swobodnie, wykonując kołysania boczne i nurzania, oddalając się jednocześnie od pochylni.

Okręt w różnych fazach wodowania przedstawiono na rys. 11.19. Przygotowując wodowanie boczne należy przede wszystkim zwrócić uwagę, by nie wystąpiły następujące przypadki: zarzucenie jednego z końców statku, uderzenie o dno i przewrócenie się statku.

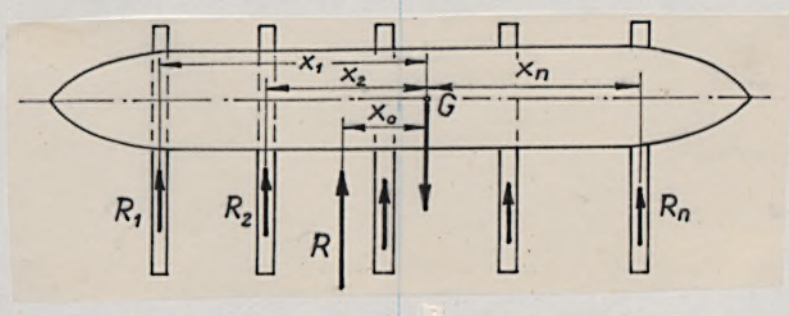
Statek przygotowany do wodowania i stojący już na płozach i torach spustowych winien mieć tak rozłożone ciężary wzdłuż długości statku, aby środek ciężkości okrętu wraz z płozami znajdował się w tej samej płaszczyźnie, co i wypadkowa sił tarcia, która z kolei zależy od nacisków na poszczególne płozy. Wymaga to odpowiedniego rozłożenia ciężarów na budowanym okręcie, odpowiedniego rozmieszczenia płóz oraz równomiernego przejęcia obciążenia przez poszczególne tory. W przypadku gdy te dwie siły różnią się wzdłuż długości swym położeniem, należy statek balastować. Różnica w położeniu tych sił daje moment skręcający, co może spowodować zarzucenie jednego z końców statku. Dziób lub rufa zsuwa się wówczas szybciej po pochylni, płozy więc mogą wypaść z torów lub zaklinować się na torach (rys. 11.20).

Ważnym elementem w wodowaniu bocznym jest upewnienie się czy głębokość akwenu jest wystarczająca, aby statek wykonując zeskok i będąc maksymalnie przechylony nie uderzył płozami o dno, co mogłoby doprowadzić do uszkodzenia kadłuba lub do przewrócenia statku.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/89
6-5
33%
234



Rys. 11.19



Rys. 11.20

Przyczyną przewrócenia się okrętu przy zeskoku z pochylni może być niewystarczająca jego stateczność. Przechył okrętu jest sprzężony z liniowym ruchem bocznym statku i oscylacyjnym ruchem pionowym. Podstawowe znaczenie mają tu rzędna środka ciężkości okrętu jak również wysokość płóz, które to wielkości określają wysokość środka ciężkości nad torami. Wpływ na powiększenie kąta przechyłu ma także niski stan wody.

8. 11. 1984
B-5
33%

Należy również sprawdzić, czy statek po zwodowaniu nie uderzy o przeciwległy brzeg, i przewidzieć ewentualne odpowiednie urządzenie hamujące, lub czy nie uderzy o krawędź pochylni przy powrotnym swym przechyle.

Mimo obliczeń komputerowych w powszechnym zastosowaniu są badania modelowe wodowania bocznego. W badaniach tych nie można odtworzyć współczynnika tarcia na pochylni, dlatego możliwość skrętu na pochylni ocenia się jedynie w sposób obliczeniowy. Pozostałe interesujące wielkości wyznacza się z pomiarów. Doświadczenia takie wykonuje się na modelach o długości rzędu 3-4 m. Wiernie jest odtworzony kształt kadłuba wraz z płozami i częścią nadwodną, lecz podczas badań ruch po pochylni, którą przedstawiają stalowe tory, odbywa się na dwu płozach rolkowych. Model ma odpowiednią masę, odtwarzane jest też położenie środka ciężkości okrętu i to zarówno wzdłużne jak i wysokościowe, oraz odtwarzane są momenty bezwładności masy względem osi przechodzących przez środek ciężkości, zarówno względem osi x i z. Odtwarza się także kształt dna basenu, do którego ma być wodowany okręt.

Badania obejmują zawsze szerszy zakres. Celowe są pomiary przy różnych możliwych stanach wody, przy różnych położeniach środka ciężkości wzwyż i różnych możliwych współczynnikach tarcia, z czym z kolei związane są odpowiednie prędkości zsuwania się modelu po pochylni. Ważnym więc parametrem pomiarów jest prędkość modelu w chwili, gdy jego płaszczyzna symetrii znajduje się nad progiem pochylni. W badaniach modelowych prędkość tę reguluje się oddaleniem modelu od progu pochylni.

Ruch modelu podczas całego czasu trwania wodowania jest rejestrowany. Często wykorzystuje się tu metodę fotograficzną z wirującą przesłoną odsłaniającą obiektyw. Stała liczba obrotów przesłony wyznacza czas. Pomiar przeprowadza się w zaciemnionym pomieszczeniu, dzięki czemu cały zapis ruchu utrwalony jest na jednej kliszy. Taka rejestracja sprawia, że model jest całkowicie swobodny, a na jego ruch nie wpływają przewody czy inne połączenia z aparaturą rejestrującą.

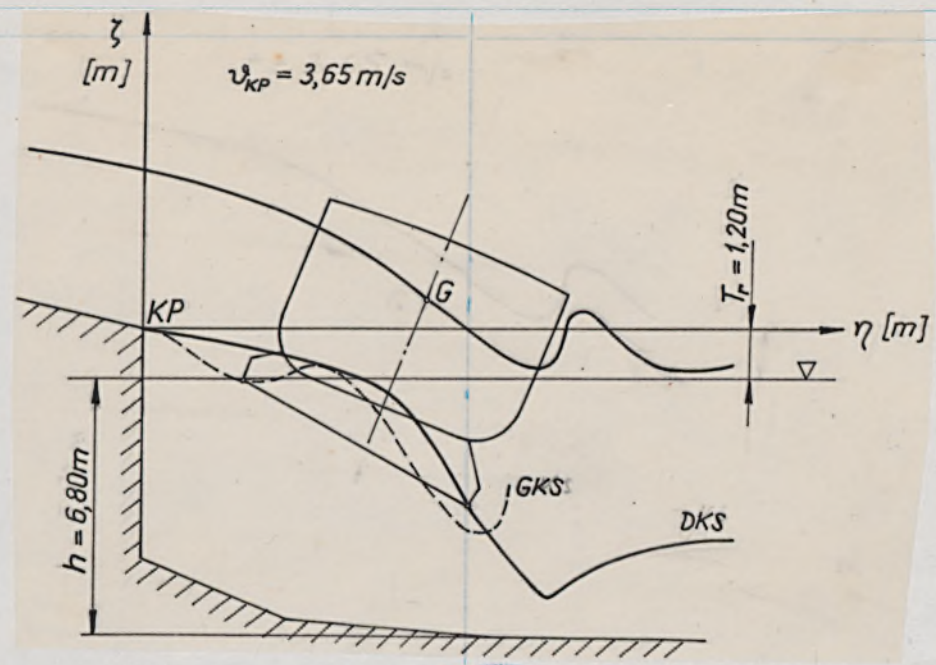
Analizując zapis należy wyznaczyć następujące parametry:

1) tor środka ciężkości G okrętu,
2) tor górnej i dolnej krawędzi sań (GKS i DKS),
3) prędkość przemieszczania się środka ciężkości ponad krawędzią pochylni,
4) kąt przechyłu w funkcji czasu lub przebytej drogi.

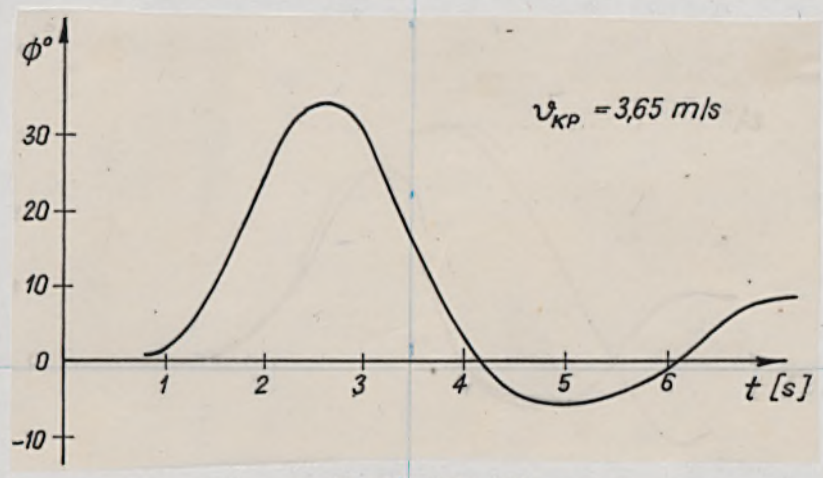
Przykładowe wykresy dotyczące wodowania bocznego przedstawiają rys. 11.21 i 11.22.

Wykonanie badań modelowych dla prawidłowego przygotowania wodowania w skali rzeczywistej dla jednostki prototypowej jest zawsze celowe. Obliczenia nie są tu zbyt dokładne. Koszt takich badań jest mały w porównaniu np. z niewielką awarią podczas wodowania w skali rzeczywistej.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/89
B-5
33%



Rys. 11.21



Rys. 11.22

8. 11. 1984 S/~~14/85~~ PG MS s. 237 S/272/88 ~~287~~ S. 240 akat
B-5
33%

LITERATURA

„Widać, posiadał gruntowną wiedzę o tym języku, ponieważ zawsze rozumiał na opak wszystko, co się do niego mówiło"

[1] H. Bird, A.Y. Odabasi, State of Art: Past, Present and Future. International Conference on Stability, Glasgow 1975.

[2] S.N. Błagowieszczenski, A.N. Holodilin: Sprawocznik po statikie i dynamikie karablja cz. 1. Izdat. „Sudostrojenie", Leningrad 1975.

[3] D. Bogucki, S. Czarnecki: Geometria kształtu kadłuba. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1983.

[4] J.P. Comstock: Principles of Naval Architecture. SNAME, New York 1967.

[5] J.H. Cox: Fishing Vessel Safety. Transactions, RINA 1977.

[6] M. Frąckowiak, M. Pawłowski: Ćwiczenia z hydromechaniki okrętu, skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1978.

[7] M. Frąckowiak, M. Maksymiuk, N. Nawrocki: Zbiór zadań z teorii okrętu cz. 2, skrypt PWN. Łódź-Warszawa-Poznań 1962.

[8] J. Kaźmierczak: Pływalność i stateczność okrętu. Wydawnictwo Komunikacyjne, Warszawa 1954.

[9] L. Kobyliński: Kryteria statecznościowe IMCO. Budownictwo Okrętowe nr 4, 1970.

[10] L. Kobyliński: Bezpieczeństwo statku na morzu i kryteria stateczności. Budownictwo Okrętowe nr 1, 1975.

[11] M. Krężelewski: Hydromechanika ogólna i okrętowa, cz. 1, skrypt Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1977.

[12] A.A. Łukaszewicz, A.D. Piernik, G.A. Firsow: Teoria karablja. Sudpromgiz 1950.

[13] V.P. Nadeinski, J.E. Jens: The Stability of Fishing Vessels. Transactions, RINA 1969.

[14] M. Pawłowski: Bezpieczeństwo statków rybackich w świetle istniejących kryteriów stateczności, wydawn. wewnętrzne Instytutu Okrętowego nr 550. Gdańsk 1975.

8. 11. 1984 ~~S/14/85~~ PG MS S/272/83

[15] M. Pawłowski: Materiały pomocnicze Zakładu Hydromechaniki Okrętu do projektu ze statyki okrętu, sem. V Gdańsk 1983 i sem. VI Gdańsk 1984.

[16] J.W. Piskorz-Nałęcki: Niezatapialność statków. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1979.

[17] K.J. Rawson, F.C. Tupper: Basic Ship Theory. Longman, London and New York 1976.

[18] W.W. Semienow Tjan-Szanski: Statika i dinamika karablja. Izdat. Sudpromgiz, Leningrad 1960.

[19] W. Wełnicki, M. Krężelewski: Zbiór zadań z teorii okrętu, cz. 1 skrypt PWN. Łódź-Warszawa-Poznań 1962.

[20] J. Wysocki: Mechanika płynów, PWN Warszawa 1967.

8. 11. 1984
B-5
33%

~~S/14/85~~ PG MS

S/272/89 ~~239~~

Wykaz ważniejszych symboli i ich odpowiedników w literaturze międzynarodowej

Użyty w skrypcie	Stosowany w literaturze światowej	Jednostka	N a z w a
D	ϱg▽	N	wypór
H	D	m	wysokość boczna okrętu
L	LBP	m	długość między pionami
L_c	LOA	m	długość całkowita
l	GZ	m	ramię prostujące
M	△	t	wyporność masowa okrętu
r_o	BM	m	poprzeczny promień metacentryczny
T	d	m	zanurzenie okrętu
T_R	d_A	m	zanurzenie rufowe
T_D	d_F	m	zanurzenie dziobowe
V	▽	m^3	wyporność objętościowa
x_C	LCF	m	odcięta środka ciężkości wodnicy
x_F	LCB	m	odcięta środka wyporu
z_F	VCB	m	rzędna środka wyporu
α	C_w	-	współczynnik pełnotliwości wodnicy
β	C_M	-	współczynnik pełnotliwości owrężа
δ	C_B	-	współczynnik pełnotliwości kadłuba
φ	C_P	-	współczynnik pełnotliwości podłużnej
$\varkappa$	C_{VP}	-	współczynnik pełnotliwości pionowej