

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Wiesław Galor

**Założenia budowy modelu uderzenia statku
w dno akwenu portowego**

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo manewrowania statku, akwen portowy, zapas wody pod stępką, uderzenie statku w dno

Zapasy wody pod stępką statku manewrującego na akwenu portowym powinien zapewnić bezpieczny ruch statku. Skutkami uderzenia statku w dno akwenu może być uszkodzenie kadłuba statku. Konieczne jest opracowanie naukowej metody określania minimalnego zapasu wody pod stępką przy zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa manewrowania statku. Artykuł przedstawia założenia budowy modelu oceny uderzenia statku w dno.

**Guidelines for Building a Model of Ship Impact
in Port Water Area Ground**

Key words: safety of ship manoeuvring, port water area, under-keel clearance, ship collision and grounding

The under-keel clearance of a ship manoeuvring in a port water area should provide for safe ship movement. The results of undesired ship impact into the channel ground can damage the ship hull. There is a need to prepare a scientific method of specifying the minimum under-keel clearance such that the safety of a manoeuvring ship will be maintained. The article presents guidelines for the model enabling the estimation of ship impact into the bottom.

Wprowadzenie

Rozwój floty światowej wykazuje, że generalnie ilość statków utrzymuje się na stałym poziomie, natomiast rośnie ich wielkość. Oznacza to, że porty, szczególnie zbudowane kilkadziesiąt lat temu, stają wobec konieczności obsługi statków o wielkościach, dla których nie były przewidziane. Budowa nowych portów jest bardzo kosztowna i często z różnych względów niemożliwa. Stąd zaistniała konieczność dopasowania istniejących portów do obsługi statków o wielkościach przekraczających te, dla jakich istniejące porty były zaprojektowane. Możliwość zwiększenia wielkości obsługiwanych statków przez istniejące porty stwarza inżynieria ruchu morskiego poprzez opracowanie i praktyczne zastosowanie metod określania warunków bezpiecznej żeglugi po akwenach, na których występują czynniki ograniczające ruch statku, mogące spowodować obniżenie poziomu bezpieczeństwa. Realizacja procesu żeglugi polega na bezpiecznym i efektywnym prowadzeniu statku do portu docelowego. Zawsze istnieje ryzyko wystąpienia wypadku jako zderzenia niepożądanego, czego skutkiem są straty mogące przyjmować różne formy. W wielu przypadkach są to katastrofy, szczególnie przy utracie życia dużej liczby ludzi lub zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Szczególnym typem obszarów wodnych są akweny portowe, charakteryzujące się występowaniem wielu czynników ograniczających manewrowanie statku. Analiza wypadków morskich wykazuje dużą ich ilość na akwenach portowych. Wy tłumaczeniem tego faktu, oprócz ograniczeń manewrowania statku, jest wysoka intensywność ruchu statków.

Minimalna zalecana wielkość wymaganego zapasu głębokości wody pod stępką statku według aktualnie obowiązujących zaleceń w Polsce, nie powinna być mniejsza niż 0,05 – 0,15 zanurzenia statku w zależności od typu akwenu lub toru wodnego. Jednak na świecie spotyka się mniejsze wartości. Przykładowo na torze podejściowym do Europortu zapas głębokości nie powinien być mniejszy niż 0,04 zanurzenia statku (nawet dla statków o zanurzeniu do 23 m). Aktualnie dla akwenu portu Świnoujście minimalny zapas wody pod stępką został ustalony na około 0,1 zanurzenia statku, co pozwala na wprowadzanie statków o maksymalnym zanurzeniu 12,8 m. Widać stąd, że mimo większych statków i gorszych warunków hydrologicznych (pływy) na podejściu do Europortu, zapas wody pod stępką jest tam ponad dwukrotnie mniejszy niż dla Świnoujścia. Nie oznacza to jednak, że poziom bezpieczeństwa jest dwukrotnie gorszy. Przyjęcie takich wartości zapasu wody pod stępką wynika z opracowania naukowo uzasadnionej metody prognozowania bezpiecznego zapasu wody pod stępką (BZWS). Stąd również dla portu Świnoujście możliwe jest zmniejszenie zapasu wody pod stępką, bez zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa, pod warunkiem zastosowania odpowiedniej metody wyznaczania zapasu wody pod stępką statku. Powinno to być powiązane z określeniem poziomu bezpieczeństwa, które

może być określone za pomocą ryzyka nawigacyjnego. Ryzyko można przedstawić jako kombinację prawdopodobieństwa uderzenia statku w dno akwenu i jego skutkami w postaci uszkodzenia kadłuba statku.

Aktualnie do portu Świnoujście zawija około 30 statków rocznie, których możliwości przewozowe są ograniczone do maksymalnego zanurzenia 12,80 m (według obowiązujących aktualnie Przepisów portowych). Oznacza to następujące straty z tego tytułu:

- ograniczenie ilości ładunku załadowanego lub wyładowanego, a co za tym idzie i mniejsze przychody dla portu i firm przeładunkowych;
- zmniejszenie zysku armatora nie korzystającego w pełni ze zdolności ładunkowych statku lub przedłużenie się obsługi statku spowodowane koniecznością odlichtowania statku na redzie, przed wejściem do portu. Należy tu zaznaczyć, że koszty eksploatacji statku są podobne przy wykorzystaniu pełnej ładowności statku, jak i ograniczonej o kilka lub kilkanaście procent;
- zmniejszenie opłat portowych, które są pobierane na podstawie tonażu statku (cumowanie, holowanie, itp.);

i wreszcie w wielu przypadkach rezygnacja z usług danego portu przez duże statki na skutek niemożności wykorzystania ich zdolności przewozowych.

Należy sobie zdawać sprawę, że niewykorzystanie zdolności ładunkowej statku na skutek ograniczenia jego zanurzenia wiąże się z mniejszą ilością ładunku (przewiezionego i przeładowanego).

Przykładowo dla statku maksymalnego dla portu Świnoujście o długości 260 m i szerokości 40 m, zwiększenie zanurzenia o 10 cm w stosunku do dotychczas obowiązującego (12,80 m) powoduje wzrost ładunku o około 800 ton. Daje to z jednej strony zysk na frachcie i operacjach przeładunkowych, z drugiej zaś strony ze względu na bardzo ostrą konkurencję portów w regionie Morza Bałtyckiego, możliwość pozyskania obsługi nowych statków i przeładunku dodatkowej masy ładunkowej. Jest to szczególnie ważne w obecnym czasie, gdy prognozy na najbliższe lata przewidują drastyczny spadek przeładunku węgla, a do tej pory wpływy z przeładunku tego ładunku masowego stanowiły około 45% wszystkich przychodów portów, co wymaga poszukiwania innych rodzajów ładunków.

Stąd konieczność podjęcia badań w celu opracowania naukowej metody określania bezpiecznego zapasu wody pod stępką w aspekcie jego minimalizacji, przy zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa.

Bezpieczeństwo manewrowania statku

Głównymi czynnikami wpływającymi na bezpieczeństwo manewrującego statku jest ograniczenie przynajmniej jednego z czynników określających odległość kadłuba statku od innych obiektów (dno akwenu, brzegi, budowle hydrotechniczne, przeszkody nawigacyjne).

W celu zapewnienia wykonania bezpiecznego manewru statku na danym akwenu musi być spełniony następujący warunek:

$$H_i \geq T + R_B \quad (1)$$

gdzie:

- H_i – głębokość w i -tym punkcie akwenu,
- T – zanurzenie statku,
- R_B – bezpieczny zapas wody pod stępką (BZWS).

Bezpieczny zapas wody pod stępką statku (BZWS) powinien umożliwić takie manewrowanie statku po akwenu, podczas którego nie nastąpi uszkodzenie kadłuba.

Należy podkreślić, że powyższa definicja dopuszcza uderzenie statku w dno, pod warunkiem że nie nastąpią znaczne straty, które można określić jako uszkodzenie kadłuba. Stan taki można opisać prawdopodobieństwem, że najniższy punkt kadłuba statku w trakcie manewrowania nie przekroczy bezpiecznego zapasu wody pod stępką w trakcie podróży statku, przy warunku że skutki (straty) uderzenia statku w dno akwenu nie przekroczą akceptowanego poziomu (uszkodzenia kadłuba):

$$P_u \left[z_c(t) \leq R_B / 0 \leq t \leq T_p \right] \quad \text{dla } C \leq c_{\min} \quad (2)$$

gdzie:

- P_u – prawdopodobieństwo uderzenia statku w dno akwenu,
- $z_c(t)$ – najmniejsza odległość kadłuba statku od dna w trakcie manewrowania,
- T_p – czas wykonywania manewrów,
- R_B – bezpieczny zapas wody pod stępką statku,
- C – straty na skutek uderzenia statku w dno akwenu,
- c_{\min} – akceptowalny poziom strat.

Na określenie BZWS ma wpływ wiele czynników [6]. Największą wagę ma określenie rezerwy na niskie stany wody oraz rezerwa dynamiczna na osiadanie statku, czyli zbliżenie kadłuba do dna akwenu na skutek zjawisk hydrodynamicznych.

Skutki uderzenia statku w dno akwenu

Skutki uderzenia kadłuba statku w dno akwenu podczas jego ruchu w postaci uszkodzenia kadłuba, ewentualnej utracie ładunku (a w przypadku ładunków płynnych zanieczyszczenia środowiska naturalnego) zależą od wielu czynników i można je wyrazić różnymi miarami.

Prawdopodobieństwo uderzenia statku w danym okresie można określić na podstawie rozkładu funkcji czasu pomiędzy poszczególnymi zdarzeniami:

$$F_k(t) = 1 - \exp(-t/t_c) \quad (3)$$

gdzie:

t_c – okres, w którym zostanie przekroczone określone obciążenie kadłuba podczas uderzenia w dno;

$$t_c = [P_u / (1 - F_k(p))]^{-1} \quad (4)$$

gdzie:

$F_k(p)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia obciążeń kadłuba podczas uderzenia w dno akwenu przekraczające dopuszczalne wartości;

$$F_k(p) = P[Q_{sgr} \geq Z_G] \quad (5)$$

gdzie:

Q_{sgr} – dopuszczalne parcie na kadłub statku [N/m²],

Z_G – odpór gruntu [N/m²];

$$Z_G = f(\Delta, S_s, \phi, \beta, \delta_c) \quad (6)$$

gdzie:

Δ – wielkość statku (masa) [kg],

S_s – powierzchnia dna statku uderzającego w dno [m²],

ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],

β – kąt nachylenia stępki statku do dna akwenu [°],

δ_c – kąt tarcia między gruntem a kadłubem statku [°].

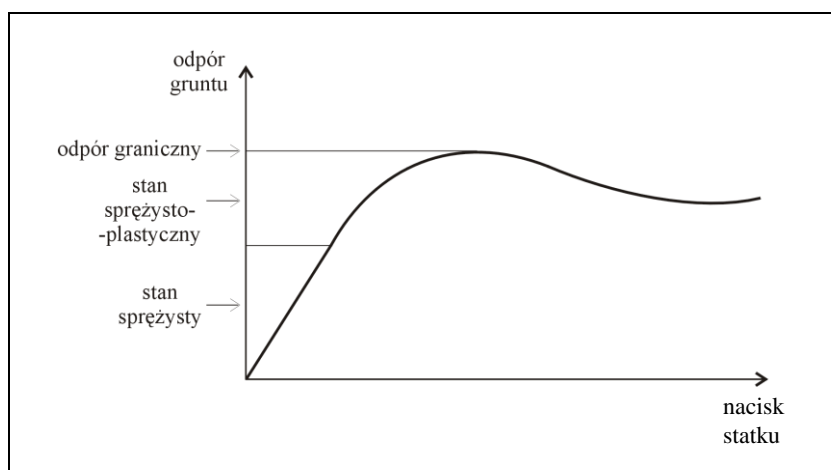
Parcie na kadłub statku w wyniku uderzenia w przeszkodę, po przekroczeniu dopuszczalnej wartości powoduje uszkodzenie kadłuba.

W rezultacie tego może nastąpić:

- wgięcie blach poszycia,
- pocięcie (połamanie) konstrukcji dna statku,
- rozdarcie poszycia,
- zmiżdżenie elementów konstrukcji kadłuba statku.

Odpór gruntu przy uderzeniu statku w dno

Przy uderzeniu statku w dno akwenu, następuje nacisk kadłuba statku na grunt i w rezultacie odpór gruntu. Odpór gruntu jest reakcją na nacisk kadłuba na dno akwenu. Odpór będzie tym większy, im większy nacisk. Po przekroczeniu maksymalnego granicznego odporu następuje utworzenie powierzchni odłamu i moment rozpoczęcia ruchu bryły odłamu na boki spod kadłuba statku. Wzrost odporu gruntu (dla gruntów niespoistych i spoistych) w miarę wzrostu siły nacisku następuje wskutek zmian strukturalnych w gruncie [4]. Polegają one na zmianach w układzie ziaren i cząstek gruntu. Początkowo ze stanu sprężystego przechodzi w stan sprężysto-plastyczny, a następnie plastyczny. W stanie tym wszystkie ziarna i cząstki znajdują się w stanie granicznej równowagi, co odpowiada granicznej wartości odporu gruntu. Rysunek 1 przedstawia ten proces.



Rys. 1. Zależności odporu gruntu od nacisku kadłuba statku
 Fig. 1. Relations between ground resistance and ship hull pushing force

Nacisk statku na grunt powoduje zagłębienie się statku w dno. Osiągnięcie odporu *granicznego* i wyparcie bryły odporu jest związane z określonym zagłę-

bieniem się dna statku w grunt. Przedstawione zjawisko występuje dla gruntów niespoistych (żwiry i pospółki, piaski) oraz dla gruntów spoistych (żwiry i pospółki gliniaste, piaski gliniaste, gliny i ropy).

Analizując proces oddziaływania kadłuba statku podczas uderzenia statku w dno akwenu, można stwierdzić zgodność z działaniem urządzeń odbojowych [2]. Oznacza to, że grunt pełni rolę ośrodka pochłaniającego energię uderzenia statku. Wielkość pochłaniania energii zależy w głównej mierze od własności gruntu [1].

Od rodzaju gruntu i jego wilgotności zależy w znacznej mierze przebieg odporu gruntu i jego wartość graniczna.

Dodatkowo, gdy następuje uderzenie statku w dno akwenu mogą wystąpić w kadłubie siły tnące i momenty gnące, po przekroczeniu których może nastąpić uszkodzenie kadłuba. Wystąpią one podczas podparcia kadłuba na przeszkodzie podwodnej o małych rozmiarach. W czasie ruchu statku po pogłębionym akwenu portowym nie powinny występować tego typu przeszkody, niemniej należy się liczyć z sytuacjami:

- uderzenia statku w dno częścią kadłuba (szczególnie przy wystąpieniu przegłębienia),
- uderzenia statku o naniesiony grunt (wybój) na skutek oddziaływania naturalnego prądu wody lub strumieni zaśrubowych.

Obydwa przypadki mogą różnić się skutkami, ze względu na różne własności gruntu, o który nastąpi uderzenie.

Ocena stopnia uszkodzenia kadłuba statku

Rodzaj i stopień uszkodzenia kadłuba statku zależy w głównej mierze od energii zaabsorbowanej przez kadłub podczas uderzenia statku w dno. Miarą uszkodzenia kadłuba stosowaną do oceny uderzenia jest objętość uszkodzenia materiału kadłuba. Stosowaną zależnością wiążącą absorbowaną energię ze stopniem uszkodzenia jest zależność empiryczna opracowana przez Minorskiego [5]:

$$E = 47,2 \cdot R_T - 37,2 \quad (7)$$

gdzie:

- E – energia absorbowana przez kadłub podczas uderzenia [MNm],
- R_T – stopień uszkodzenia materiału kadłuba [m³].

Ta zależność empiryczna została określona na podstawie obserwacji wielu kolizji i jest szeroko stosowana do oceny ich skutków.

Zależność ta wykazuje wprost proporcjonalną zależność stopnia uszkodzenia z obserwowaną energią przez kadłub statku podczas uderzenia w przeszkodę.

Jest to niewątpliwie podejście uproszczone, gdyż wielkość energii absorbowanej zależy od wielu czynników, w tym głównie od typu konstrukcji statku (dna), własności materiału i sposobu uszkodzenia. Stąd są prowadzone intensywne badania, mające na celu określenie jak najprostszych relacji pomiędzy energią absorbowaną i uszkodzeniem kadłuba (materiału) z uwzględnieniem powyższych uwarunkowań.

Podczas uderzenia statku w dno akwenu portowego należy się liczyć przede wszystkim z pogięciem i zmiżdżeniem konstrukcji dna statku. Rozpatrywane są one w stosunku do miejsca styku kadłuba statku z przeszkodą. Proponowana jest bardziej dokładna zależność empiryczna między energią absorbowaną a stopniem uszkodzenia kadłuba [5]:

$$E = 3,5(t/b)^{0,6} \cdot \delta_o R_T \quad (8)$$

gdzie:

- E – energia absorbowana podczas pogięcia i zmiżdżenia elementów kadłuba [MNm],
- t – średnia grubość uszkodzonych blach [m],
- b – średnia szerokość uszkodzonej powierzchni kadłuba [m],
- δ_o – odkształcenie elastyczne [m],
- R_T – stopień uszkodzenia kadłuba [m³].

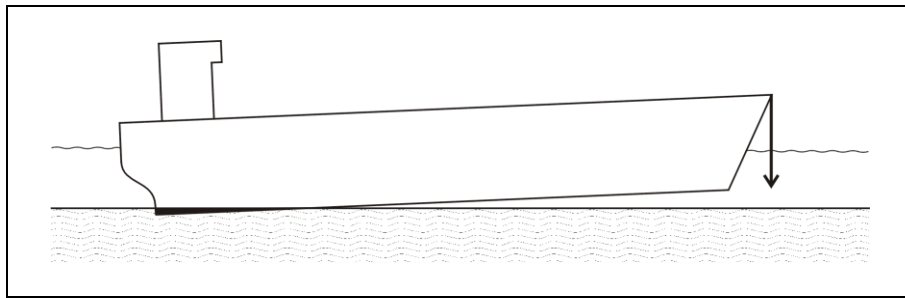
Energia absorbowana przez uderzający kadłub statku w dno akwenu jest równa pracy wykonanej przez statek podczas uderzenia. Zależy ona głównie od siły występującej na styku kadłub – dno akwenu. Określenie jej wielkości oraz przebieg w funkcji czasu jest trudne do wyznaczenia metodami analitycznymi. Stąd są stosowane uproszczone metody, oparte na wynikach badań rzeczywistych. Poniższe wyrażenie empiryczne przedstawia wielkość siły uderzenia w zależności od masy statku i prędkości uderzenia w dno [7]. Dla uderzenia w dno akwenu powinna być uwzględniana składowa pionowa prędkości statku:

$$P_s = 0,98(\Delta)^{1/2} \cdot (V_H / 8,22) \quad (9)$$

gdzie:

- P_s – siła uderzenia w dno [MN],
- Δ – masa statku [t],
- V_H – składowa wertykalna prędkości statku [m/s].

Gdy statek uderza częścią kadłuba w dno, energia absorbowana przez kadłub ulega zmniejszeniu na skutek zamiany części energii na pracę związaną z przechyłem wzdłużnym (rys. 2) oraz pochłanianiem części energii przez grunt podczas nacisku kadłuba statku.



Rys. 2. Przechył wzdłużny statku przy uderzeniu w dno częścią kadłuba
Fig. 2. Longitudinal motion of the ship due to impact of the hull

Wielkość tej energii można określić następująco:

$$E = E_H \cdot C_E \cdot C_G \quad (10)$$

gdzie:

- E – energia absorbowana przez kadłub statku,
- E_H – składowa pionowa energii statku (dla masy wirtualnej statku),
- C_E – współczynnik centryczności,
- C_G – współczynnik pochłonięcia energii uderzenia przez odkształcenie gruntu.

Współczynnik centryczności można określić metodą stosowaną do obliczeń podczas cumowania statku do nabrzeża [2]. Współczynnik C_G jest określony pracą wykonaną przez kadłub statku podczas nacisku na dno akwenu.

Podsumowanie

1. Uderzenie statku w dno akwenu może nastąpić na skutek zmniejszenia zapasu wody pod stępką (ZWS).
2. Głównymi przyczynami zmniejszenia tego zapasu może być obniżenie poziomu wody i osiadanie statku w ruchu.
3. Mechanizm uderzenia statku w dno akwenu różni się zasadniczo od wejścia statku na mieliznę czy uderzenia w element brzegowy i nie znajduje dostatecznego opisu w literaturze.

4. Zasadniczą rolę w ocenie skutków uderzenia statku w dno akwenu odgrywają zjawiska związane z parciem statku na grunt i jego reakcją (odporem gruntu).
5. Wydaje się celowe opracowanie, na podstawie przedstawionych założeń, modelu uderzenia statku w dno akwenu, aby określić skutki takiego zdarzenia.

Literatura

1. Dembicki E., *Parcie, odpór i nośności gruntu*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1979.
2. Galor W., *Poprawa poziomu bezpieczeństwa podczas manewru cumowania statku do nabrzeża za pomocą odbojnic nabrzeżowych*, Materiały V Konferencji „Okrętownictwo i Oceanotechnika”, Międzyzdroje 2000.
3. Galor W., *Ryzyko kolizji statku z budowlami hydrotechnicznymi*. Materiały „XXXII Zimowej Szkoły Niezawodności”, Szczyrk 2004.
4. Hueckel S., *Budowle morskie*, tom 2, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1972.
5. Pedersen T.P., Zhang S., *Absorbed energy in ship collision and grounding*, Revision Minorsky's Empirical Method, Journal of Ship Research, Vol. 44, No. 2, 2000.
6. Salmonowicz W., Galor W., *Wybrane problemy określania zapasu wody pod stępką na akwenach ograniczonych*, Materiały X Konferencji „Inżynieria Ruchu Morskiego”, Szczecin 2003.
7. Simonsen B.C., *Mechanics of ship grounding*, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Danmark 1997.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Bolesław Mazurkiewicz
prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Stanisław Gućma

Adres Autora

dr hab. inż. Wiesław Galor, prof. AM
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego, Zakład Urządzeń Nawigacyjnych
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, tel. 48 09 514