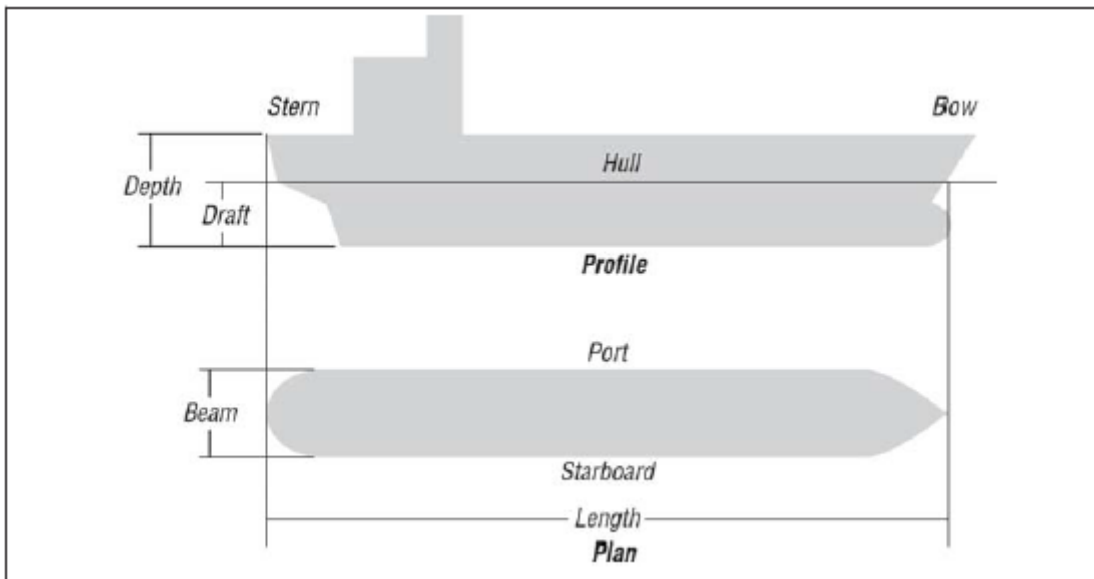


XVI. Statki i łodzie

Fizyka statków to ogromny temat. Chociaż te same zasady dotyczą czółna i super-tankowców, różnica między tymi dwiema skalami nie jest banalna. Naszym celem w tej części będzie wyjaśnienie niektórych podstawowych zasad fizycznych umożliwiających tworzenie realistycznych symulacji. Typowy statek typu przemieszczeniowego nadaje się dobrze do zilustrowania tych zasad; jednak wiele z tych zasad ma również zastosowanie do innych obiektów zanurzonych lub częściowo zanurzonych w płynie, takich jak okręty podwodne i balony powietrzne. Pamiętaj, że powietrze uważa się za płyn, gdy rozważamy pływalność. Podczas gdy statki powierzchniowe lub statki, które działają na powierzchni wody (przy interfejsie wody powietrznej) są podobne do całkowicie zanurzonych obiektów, takich jak okręty podwodne lub balony powietrzne, ponieważ wszystkie one doświadczają pływalności, istnieją pewne bardzo wyraźne różnice w ich fizycznej naturze, że będziemy zaznaczać w tym rozdziale. Różnice te wpływają na ich zachowanie, dlatego ważne jest, aby być ich świadomym, jeśli zamierzasz symulować takie obiekty. Statki mają cały swój własny język, więc spędzimy dużo czasu, starając się właściwie dobrać słownictwo. Umożliwi to prowadzenie dalszych badań na wszystkie tematy, które są szczególnie interesujące. Istnieje wiele sposobów klasyfikowania statków i łodzi, ale w odniesieniu do rządzącej nimi fizyki istnieją trzy podstawowe typy. Statki wypornościowe, półprzedstawne statki i strugające statki są nazwane po siłach, które utrzymują łódź na powierzchni, podczas gdy ma ona prędkość przelotową. Kiedy się nie poruszasz, wszystkie statki są w trybie przemieszczenia. Termin przesunięcie w tym kontekście oznacza, że statek jest obsługiwany wyłącznie przez pływalność - to znaczy bez dynamicznego lub aerostaticznego podniesienia, jak można zaobserwować na szybkiej łodzi wyścigowej lub poduszkowcu. Samo przemieszczanie się odnosi się do objętości wody wypieranej lub "wypychanej" z drogi przez statek, który unosi się w wodzie. Omówimy to więcej w następnej sekcji. Statek strugający to taki, który nie jest wspierany przez pływalność, ale przez windę hydrodynamiczną. Dotyczy to codziennych łodzi motorowych, które są własnością większości żeglarzy. Kiedy łódź się nie porusza, po prostu unosi się w wodzie, podskakując w górę i w dół. Jednakże, gdy łódź zaczyna podróżować z dużą prędkością, siła uderzenia wody w dno łodzi powoduje, że łódź podnosi się. Jest to znane jako struganie i znacznie zmniejsza opór statku. Naczynia półobrotowe to te, które łączą obie kategorie, z pewnym wsparciem płynącym z pływalności, a niektóre z sił strugających. Zanim przejdziemy dalej, omówmy niektóre słownictwo. Kadłub statku to wodoszczelna część statku, która faktycznie wypiera wodę. Wszystko na statku lub na nim jest zawarte w kadłubie, który jest częściowo zanurzony w wodzie. Długość statku to odległość mierzona od dzioba do rufy. W praktyce do określenia długości statku stosuje się kilka długości, ale w tym przypadku odniesiemy się do całkowitej długości kadłuba. Łuk jest przednią częścią statku, natomiast rufa jest częścią rufową. Kiedy znajdujesz się na statku skierowanym w stronę dzioba, strona portu znajduje się po twojej lewej stronie, a prawa strona po prawej. Całkowita wysokość kadłuba nazywana jest głębokością, a jej szerokość nazywana jest szerokością lub wiązką. Kiedy statek unosi się w wodzie, odległość od powierzchni wody do dna kadłuba nazywana jest zanurzeniem. Rysunek 16-1 ilustruje te terminy.



Biorąc pod uwagę, że projektowanie statków jest zróżnicowanym tematem, ograniczymy się do omówienia tych zagadnień aspekty statków, które składają się na realistyczne modele. Te tematy obejmują stabilność i tonięcie, charakterystyka odporności, propulsywność i zdolność manewrowania. Większość z tych tematów nie może być w pełni symulowana w czasie rzeczywistym, więc pokażemy ogólne zasady, które podążają za statkami zamiast pełnej symulacji numerycznej.

Stabilność i tonięcie

Jeśli masz łódki w swojej grze wideo, to pierwszy krok, aby były realistyczne fizycznie pozwala im zatonać, jeśli ulegną uszkodzeniu. Aby zrozumieć, dlaczego łódzie toną i jak to robią, najpierw musisz zrozumieć stabilność.

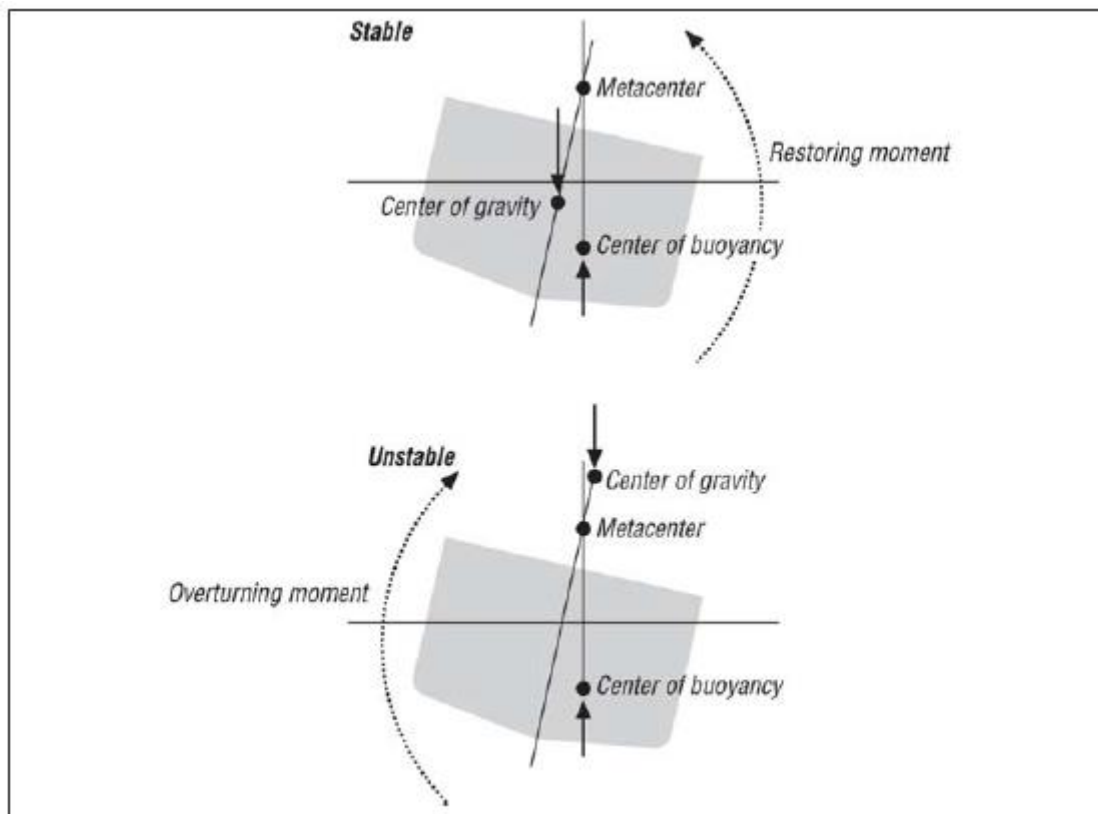
Stabilność

Większość łodzi ma najmniejszą stabilność względem osi podłużnej - to znaczy, że łatwiej jest podnosić lewą i prawą burtę, niż przetrzucać koniec na drugą. Jeśli statek przechylił się tak daleko, że jest odwrócony, nazywa się to wywracaniem. W ten sposób większość łodzi tonie z powodu wiatru, fal lub w niektórych przypadkach uszkodzeń bocznych. Jeden z najsłynniejszych przykładów tonącego statku, *Titanica*, pokazuje, że kiedy łódź tonie od uszkodzeń, może zatonać koniec ponad końcem, czasami przy rozbijaniu statku na dwie części. Omówimy tutaj oba, abyś mógł animować realistyczne zatopienie w swojej symulacji. W części 3 wprowadziliśmy pojęcie pływalności i stwierdziliśmy, że siła na zanurzonej objętości z powodu pływalności jest funkcją zanurzonej objętości obiektu. Zasada Archimedesesa stwierdza, że ciężar obiektu unoszący się w płynie jest równy ciężarowi objętości płynu przemieszczonego przez obiekt. To ważna zasada. Mówi się, że statek o określonej masie musi mieć wystarczającą objętość, aby wyprzeć wystarczająco wody, ilość równa masie statku, w celu jej wypłynięcia. Dalej, to zasada zapewnia sprytny sposób określania ciężaru statku: po prostu zmierzyc lub obliczyć ilość wody wypartej przez statek i można obliczyć ciężar statku. W polu morskim przemieszczenie jest równoznaczne z ciężarem statku. Jak omówiono w części 3, możemy obliczyć siłę wyporu na dowolnym obiekcie, używając następującej formuły:

$$FB = \rho g \nabla$$

Tutaj ∇ jest zanurzoną objętością przedmiotu, ρ jest gęstością płynu, w którym obiekt jest zanurzony, a g jest przyspieszeniem z powodu grawitacji. Ponieważ siła wyporu jest siłą, ma on zarówno wielkość, jak i kierunek i zawsze działa prosto przez środek pływalności. Środek wyporu jest geometrycznym

środkiem zanurzonej części obiektu. Kiedy statek unosi się w równowadze na powierzchni wody, jego środek wyporu musi znajdować się bezpośrednio poniżej środka ciężkości statku. Ciężar statku, siła, działa prosto w dół środka ciężkości, przeciwstawiając się sile spowodowanej wypornością. Kiedy statek znajduje się w równowadze, te dwie siły, ciężar i pływerność, są równe wielkości i przeciwne w kierunku. Teraz, gdy siła zewnętrzna powoduje, że statek się toczy lub pochyla, część kadłuba poniżej wody ulega zmianie, a środek wyporu przechodzi do nowego geometrycznego środka ciężkości podwodnej części kadłuba. Na przykład, jeśli statek toczy się na prawą burtę, środek pływerności przesuwa się w stronę prawej burty. Kiedy tak się dzieje, linie działania ciężaru statku i siły wyporu nie są już w linii, co powoduje moment (moment obrotowy), który działa na statku. Ten moment obrotowy jest równy prostokątnej odległości między liniami sił siłowników w stosunku do ciężaru statku. Teraz mamy dostęp do pływającej pionowej części, o której wspominaliśmy wcześniej. Kiedy statek toczy się, na przykład, nie chcesz, aby toczył się dopóki nie wywróci się. Zamiast tego, powinieneś delikatnie powrócić do pozycji pionowej po tym, jak siła, która spowodowała jej rzucenie - na przykład wiatr - została usunięta. Krótko mówiąc, chcesz, żeby statek był stabilny. Aby statek był stabilny, linia działania siły wyporu musi przecinać linię środkową statku w punkcie zwanym metacentrum, powyżej środka ciężkości. Kiedy tak się dzieje, moment rozwinięty, gdy statek wyrzuca, ma tendencję do przywracania statku do pozycji pionowej. Jeśli metacentrum znajduje się poniżej środka ciężkości, wówczas powstały moment będzie miał tendencję do przewracania się statku. Odległość między środkiem ciężkości a metacentrum nazywa się GM. Jest to również znane jako wskaźnik stabilności, ponieważ wartość dodatnia oznacza, że ciało pływające jest stabilne, a ujemny GM oznacza, że ciało jest niestabilne. Rysunek 16-2 ilustruje te dwa scenariusze



Jeśli jesteś żeglarzem, wiesz, jak ważne jest utrzymanie niskiego środka ciężkości swojej łodzi. Pomaga to podnieść wysokość metacentrum powyżej środka ciężkości, a tym samym pomaga w stabilizacji. W przypadku całkowicie zanurzonych obiektów, takich jak okręty podwodne, sytuacja jest inna. Siła pływerności nadal działa poprzez geometryczny środek ciężkości przedmiotu, ale dla stabilności środek

wyporu musi znajdować się powyżej środka ciężkości. W ten sposób, gdy obiekt obraca się, linie działania ciężaru obiektu i siły wyporu są rozdzielane i tworzą moment, który ma tendencję do przywracania obiektu do jego pozycji pionowej. Jeśli jest odwrotnie, obiekt byłby niestabilny, na przykład próbując zrównoważyć jedną piłkę do kręgli na drugiej. W takim przypadku najmniejsze zakłócenia zaburzyłyby równowagę, a obiekt odwróciłby się do góry nogami, tak że środek ciężkości znajduje się poniżej środka wyporu.

Tonięcie

Ogólnie rzecz biorąc, łodzie chronią swoją stabilność poprzez podzielenie kadłuba na kilka wodoszczelnych sekcji, odpowiednio nazwanych przedziałami. W ten sposób, jeśli strona statku uderzy w górę lodową, tylko uszkodzony przedział zostanie zalany wodą morską. Jeśli wystarczająca ilość komór ulegnie zniszczeniu, statek nie będzie miał wystarczającej siły wypornościowej, aby utrzymać swoją wagę i opada. Koniec z zalanymi przedziałami zatonię najpierw, powodując duży kąt wokół osi poprzecznej. Tak stało się z Titanic. W rzeczywistości w tym statku kąt, zwany trymowaniem, był tak duży, że rufa została podniesiona z wody. Kadłub nie był w stanie utrzymać ciężaru sekcji rufowej, która nie była już podtrzymywana przez pływalność, a struktura rozdarta na pół. Należy zauważyć, że statki mogą zatonąć w ciągu kilku minut lub może to potrwać kilka godzin. Na przykład Titanicowi zabrakło około trzech godzin. Lusitania zatonęła w 18 minut. Czas potrzebny na to zależy w dużym stopniu od rodzaju uszkodzenia i budowy statku. Nie sugerujemy, aby gracze czekali trzy godziny na zakończenie swojej gry; jednakże możliwe jest dalsze zwalczanie / napędzanie statku, który jest śmiertelnie uszkodzony. W wielu przypadkach, w których podejrzewa się uszkodzenia terminalu, kapitanowie starają się uziemić swoje statki, aby nie dopuścić do tego, by statek faktycznie przepadł. Jeśli pojawią się uszkodzenia boczne, szczególnie przy silnym wietrze i falach, może to oznaczać, że statek nadal ma wystarczającą pływalność, by unosić się na wodzie, ale nie ma już wystarczającej stabilności, aby pozostać w pozycji pionowej. Ponieważ uszkodzenie zwykle występuje tylko po jednej stronie statku, środek wyporu nie będzie już na linii środkowej. Oznacza to, że moment przywracający w jednym kierunku jest zmniejszony o dowolną kwotę, jaką centrum przesunęło się na tę stronę. Nadchodzi duża fala i popycha statek do punktu, w którym ramię prostujące nie jest już dodatnie. Statek obróci się o 180 stopni w dół, ku dołowi, ale nadal będzie pływał (wywracał się). Po przewróceniu pozostałe komory będą miały tendencję do napełniania wodą, ponieważ z czasem zawory lub inne otwory zawodzą. W przypadku łodzi rekreacyjnych są one zwykle tylko pojedynczym przedziałem. Jeśli się wywróci, zejść łatwo; w rzeczy samej, jest to sposób, w jaki zatapia się większość małych łodzi. Jak wspomnieliśmy wcześniej, dokładne obliczenie wszystkich stopni swobody dla nietrywialnego kształtu ciała w czasie rzeczywistym byłoby trudne do osiągnięcia przy pomocy dzisiejszego sprzętu komputerowego. Zasadniczo chcesz przestrzegać kilku zasad wysokiego poziomu:

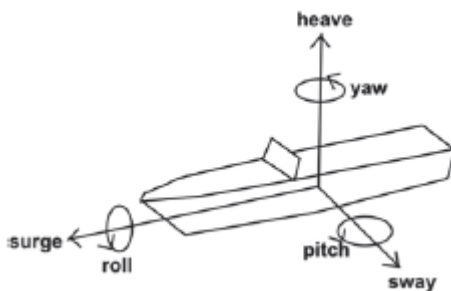
- Im wyższy środek ciężkości, tym większe prawdopodobieństwo, że łódź się przewróci.
- Duże statki są zawsze przedzielone. Uszkodzenia powinny ograniczać się do przedziału wodoszczelnego, w którym nastąpiło.
- Statek będzie leczył się lub trymował w kierunku uszkodzenia. Jeśli wystąpią uszkodzenia na po prawej burcie, łódź będzie przechylała się na prawą burtę. Jeśli obrażenia wystąpią w łuku, to łódź wyświetli listę do przodu.
- Łódź pozostanie pływająca, o ile nieuszkodzone przedziały mają objętość

w metrach sześciennych o masie co najmniej ciężaru kadłuba w tonach metrycznych podzielonej przez 1,025.

- Po uszkodzeniu, nawet jeśli statek ma wystarczająco dużo nieuszkodzonej objętości, aby mógł pozostać na powierzchni, niekoniecznie oznacza, że będzie unosić się pionowo.
- Zatonięcie prawie nigdy nie występuje tak szybko, jak pokazano w grach wideo; jednakże wywrócenie może nastąpić szybko i jest prawdopodobnie bardziej realistycznym sposobem modelowania stabilności.

Ruch Statku

Ściśle związane ze statecznością statku jest przedmiot ruchów statku. Wiedząc, jak statek pracuje w losowym zbiorze fal znacznie pomoże ci zwiększyć realizm w twoich grach. Najważniejszym aspektem tego są ruchy skojarzone, o których będziemy mówić wkrótce. Po pierwsze, trochę więcej słownictwa! Jak wspomniano wcześniej, istnieje sześć stopni ruchu, do których zdolne jest każde ciało sztywne; w przypadku łodzi niektóre z nich mają specjalne nazwy i zostały opisane poniżej i zilustrowane na rysunku 16-3.



Nachylenie, pochylenie i odchylenie są terminami używanymi również w samolotach. Stopnie swobody translacji są nazywane gwałtownym wzrostem, falowaniem i kołysaniem. Surge, kołysanie i odchylenie nie są tak oczywiste, gdy statki poruszają się do przodu, więc dopuszczalne jest ograniczenie modelu do podnoszenia, ustawiania i przechylania się. Dźwignia to ruch w górę i dół łodzi spowodowany zmianą wysokości elewacji wody w miarę przechodzenia fali. Jeśli statek jest nieruchomy, będzie się go nazywać kołysaniem. Skok jest rotacją wokół osi poprzecznej statku ze względu na zwiększoną pływalność na jednym końcu statku, gdy przechodzi fala. Ruch ten jest najbardziej wyraźny, gdy fale poruszają się w tym samym kierunku (lub 180 stopni) od statku. Rolka jest jak skok, ale wokół osi podłużnej.

Falowanie

Jak wspomniano wcześniej, przemieszczenie jest przesunięciem w kierunku pionowym od ciągu równowagi statycznej. Ten stopień swobody jest prosty do modelowania jako sprężyna hydrostatyczna działająca w kierunku pionowym. Zakładając, że mamy barkę o długości 30 metrów i szerokości 10 metrów, opracujemy równanie, które może regulować naszą symulację przechyłu. Zwykle w hydrostatyce statku znajduje się coś, co nazywa się tonem na centymetr zanurzenia (TPCM) - co oznacza, że na każdy centymetr po naciśnięciu łodzi spada pewna liczba ton siły wyporu. Dla naszej barki jest to stosunkowo prosta kalkulacja. Biorąc pod uwagę, że powierzchnia płaszczyzny wody wynosi stałą 300 metrów kwadratowych, 1 centymetr zanurzenia dałby objętość 3 metrów sześciennych. Ponieważ 1 metr sześcienny słonej wody waży 1027 kg, 3 metry sześciennych wyniosłyby 3 081 kg, i (zakładając, że łódź znajduje się na Ziemi), spowodowałyby siłę wyporu wynoszącą 3 081 kg \times 9,81 m / s², czyli 30,2 kN. Dlatego 30,2 kN na cm dałoby dobrą wartość początkową dla stałej sprężystości, aby modelować odpowiedź falową tego statku na fale.

Nachylenie

Abyśmy mogli symulować realistyczne ruchy, ważne jest, aby statek potrzebował czasu na zakończenie ruchu. Ten czas nazywany jest okresem przechodzenia. Definiuje prędkość kątową, jaką statek przetoczy się na jedną stronę, kiedy przeżyje. Możemy to oszacować za pomocą następującego równania:

$$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \times GM}}$$

Gdzie k jest promieniem bezwładności, a GM jest odległością od metaśrodku do środka ciężkości. Dobry szacunek dla promienia bezwładności jest często brany jako 30% promienia statku. Statek o krótszym okresie przechyłu zareaguje szybciej na falę i spróbuje przyjąć nachylenie fali. Jest to znane jako "sztywne" i może powodować dyskomfort i uszkodzenia pasażerów poprzez wyższe przyspieszenia kątowe. Odwrotnie, statki o wyższych okresach przechyłów są znane jako "delikatne" i pozostają w tyle za falami. Statki te zwykle przechylają się dalej, ale są bardziej komfortowe dla pasażerów.

Kołysanie

Podobnie, istnieje okres tonu, który mierzy szybkość, z jaką statek reaguje na falę. Jest to w dużym stopniu zależne od długości statku i można je oszacować w następujący sposób:

$$T = (2\pi / g^{1/2})(k/(GM)^{1/2})$$

Gdzie k jest promieniem bezwładności i jest zwykle brany jako 30% wiązki. Zauważ, że okres tonu jest zwykle od jednej trzeciej do połowy okresu rzutu, tak, że dziób statku wzniesie się i opadnie wraz z falą bardziej w fazie niż podczas zdarzenia nachylenia.

Sprężone wnioski

Prawdziwą sztuczką do uzyskania prawidłowego wyglądu jest zrozumienie, że dla większości łodzi ruchy są sprzężone. Na przykład, falowanie i nachylenie są silnie sprzężone. To znaczy że jeśli fala spowoduje, że twoja łódź się podniosła, najprawdopodobniej również spowoduje jej rozbitcie. Wynika to z faktu, że rozkład wyporności wzdłuż kadłuba nie jest stały. Jeżeli linia wodna zostanie podniesiona o pewną stałą wartość, zwykle zapewnia się większą wyporność na rufie niż w przypadku tej samej zmiany w linii wodnej. Spowoduje to przesunięcie statku do przodu, aby przesunąć środek wyporu do wzdłużnego położenia środka ciężkości. Podobnie, zdarzenie kołysania spowoduje podniesienie statku, ponieważ jeśli rufę podniesie się z wody, zwykle traci się całkowitą wyporność, a łódź zatonię dalej w wodzie.

Opór i napęd

Opór jest siłą potrzebną do przesunięcia ciała przez wodę. Napęd jest metodą, za pomocą której tworzysz tę siłę.

Ogólny opór

W części 3 omówiliśmy siły oporu na obiektach poruszających się w cieczy. Konkretnie, omówiliśmy tarcie i ucisk ciśnienia. Statki poruszające się po powierzchni wody doświadczają tych sił oporu; jednak na interfejsie powietrze-woda są inne elementy, które należy wziąć pod uwagę. Gdyby napisać równanie zrywające całkowity opór działający na statek na jego trzy główne komponenty, równanie to wyglądałoby mniej więcej tak:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{friction}} + R_{\text{pressure}} + R_{\text{waves}}$$

Opiszemy każdy z tych składników i przedstawimy kilka formuł empirycznych w jednej chwili. Najpierw jednak chcemy zakwalifikować materiał do naśladowania, stwierdzając, że ma on bardzo ogólny charakter i ma zastosowanie tylko wtedy, gdy znane są pewne szczegóły dotyczące całkowitej geometrii danego statku. W praktyce projektowania statków formuły te byłyby stosowane tylko na bardzo wczesnych etapach procesu projektowania, aby zbliżyć się do oporu. To powiedziawszy, są one bardzo przydatne do tego, aby dostać się do gry w piłkę nożną i (czasem ważniejsze) w przeprowadzaniu badań parametrycznych, aby zobaczyć efekty zmian głównych parametrów. Pierwszym elementem oporowym jest opór tarcia na podwodnej powierzchni kadłuba podczas ruchu przez wodę. Jest to to samo, co tarcie, które omówiliśmy w części 3. Jednakże dla statków istnieje wygodny zestaw formuł empirycznych, których można użyć do obliczenia tej siły:

$$R_{\text{friction}} = (1/2)\rho V^2 S C_f$$

W tym wzorze ρ jest gęstością wody, V jest prędkością statku, S jest powierzchnią podwodnej części kadłuba, a C_f jest współczynnikiem tarcia. Możesz użyć tej empirycznej formuły do obliczenia C_f :

$$C_f = 0,075 / (\log_{10} R_n - 2)^2$$

W tym przypadku R_n jest liczbą Reynoldsa, określoną w części 6, w oparciu o długość kadłuba okrętu. Ta formuła została przyjęta w 1957 r. Przez International Towing Tank Conference (ITTC) i jest szeroko stosowana w dziedzinie architektury okrętów do szacowania współczynników oporów tarcia dla statków. Aby zastosować wzór dla R_{friction} , musisz również poznać powierzchnię S , podwodnej części kadłuba. Możesz bezpośrednio obliczyć ten obszar za pomocą numerycznych technik integracji, podobnych do tych do obliczania objętości, lub możesz użyć jeszcze innej empirycznej formuły:

$$S = C_{ws} V (\nabla)$$

W tym wzorze ∇ jest objętością przemieszczoną, L długością statku, a C_{ws} jest współczynnikiem zwilżonej powierzchni. Współczynnik ten jest funkcją kształtu statku - jego stosunek szerokości do pochylenia - i statystycznie wynosi od 2,6 do 2,9 dla typowych form kadłuba wypornościowego. Opór ciśnieniowy doświadczany przez statek jest taki sam jak w przypadku pocisków, o których mowa w części 3. Pamiętaj, że ten opór spowodowany jest efektem lepkości, powodującym stosunkowo niski poziom ciśnienia za statkiem. Kwantyfikacja tej siły jest trudna dla statków o dowolnej geometrii. Możemy użyć obliczeniowych algorytmów dynamiki płynów do przybliżenia tej siły, ale wymaga to szczegółowej znajomości geometrii kadłuba i wielu czasochłonnych obliczeń. Alternatywą jest poleganie na danych testowych modelu skalowania, w których wyniki z testu modelu ekstrapoluje się na przybliżoną wartość oporu na pełnym statku. Podobnie jak w przypadku oporu ciśnieniowego, współczynnik oporu fali jest trudny do obliczenia, a my zwykle polegamy na testowaniu modelu w praktyce. Fala przeciągania jest spowodowana przeniesieniem energii lub przeniesieniem pędu ze statku do płynu, lub innymi słowy, jest funkcją pracy wykonywanej przez statek na otaczającym płynie w celu generowania fal. Widoczna obecność oporu falowego jest widoczna w dużej fali dziobowej, która buduje się z przodu statku, a także układu fal, który powstaje na rufie statku, gdy porusza się on w wodzie. Fale te wpływają na rozkład ciśnienia wokół statku, a tym samym wpływają na opór ciśnieniowy, co utrudnia nam oddzielenie składnika oporu fali od oporu ciśnieniowego podczas wykonywania analizy. Podczas wykonywania testów w skali modelu, opór ciśnieniowy i opór fali są zwykle łączone w tzw. rezystancję rezidualną. Analogicznie do współczynnika oporu tarcia, można wyznaczyć współczynnik oporu resztkowego, który:

$$R_r = R_{\text{asterure}} + R_{\text{wave}} = (1/2)\rho V^2 S C_r$$

Tutaj R_r jest całkowitą rezystancją rezydualną, a C_r jest współczynnikiem rezystancji rezydualnej. Istnieje wiele dostępnych metod szacowania oporności, które pozwalają oszacować współczynnik rezystancji szczątkowej statku; są one jednak zazwyczaj prezentowane dla określonych typów statków. Na przykład jedna metoda może dawać wzory empiryczne dla C_r dla statków typu niszczycieli, podczas gdy inna może dawać formuły dla C_r dla dużych tankowców. Sztuczka polega oczywiście na wybraniu metody odpowiedniej dla analizowanego rodzaju statku. Zasadniczo wartość C_r wzrasta wraz ze wzrostem przemieszczenia i prędkości statku. Typowy zakres dla C_r dla kadłubów o dużym przemieszczeniu wynosi od $1,0 \cdot 10^{-3}$ do $3,0 \cdot 10^{-3}$. Podczas gdy te trzy składniki oporu - tarcie, ciśnienie i fala - są najważniejsze dla typowych statków typu przemieszczeniowego, nie są one jedynymi. Ponieważ statek działa na styku woda-woda, znaczna część jego struktury znajduje się nad powierzchnią wody i jest wystawiona na działanie powietrza. Oznacza to, że na statku będzie również występować opór powietrza. Możesz oszacować ten opór powietrza, używając następującej formuły:

$$R_{\text{air}} = (1/2)\rho V^2 A_p C_{\text{air}}$$

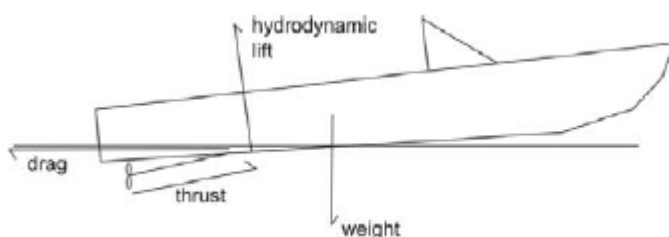
Tutaj C_{air} jest współczynnikiem oporu powietrza, ρ jest gęstością powietrza, V jest prędkością statku, a A_p jest rzutowanym poprzecznym (profilowym) obszarem statku. C_{air} zwykle waha się od 0,6 do 1,1, w zależności od typu statku. Cysterny i duże statki towarowe mają tendencję do zbliżania się do górnej granicy zasięgu, podczas gdy statki bojowników mają tendencję do zbliżania się do dolnego krańca. Zamiast wystarczającej ilości informacji do obliczenia przewidywanego obszaru poprzecznego statku, można go przybliżyć w następujący sposób:

$$A_p = B^2 / 2$$

gdzie B to szerokość (szerokość) statku.

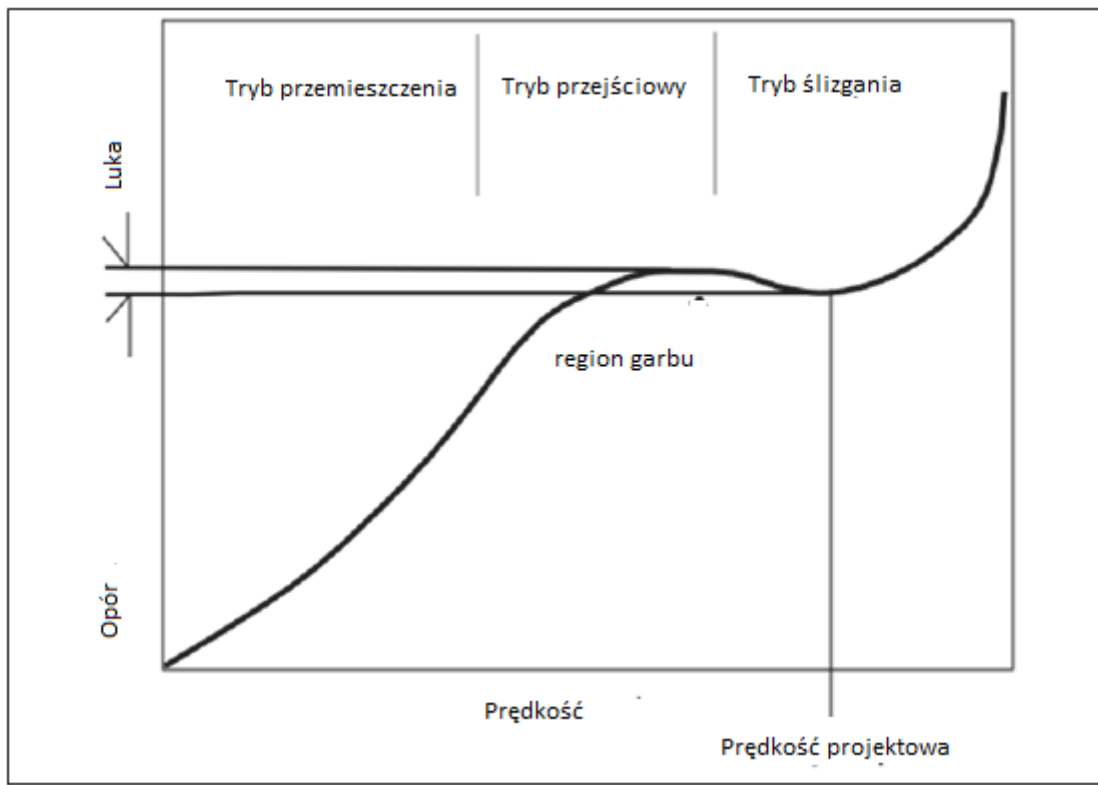
Ślizgacz

Ślizgacze różnią się od jednostek wypornościowych tym, że po osiągnięciu prędkości przelotowej nie są wspierane przez pływalność. W przeciwieństwie do super-tankowca rekreacyjna łódź motorowa ma dużo "płaską" formę kadłuba. To prawie wygląda na bardzo grubą folię, którą jest! Kiedy tylko łódź motorowa po prostu siedzi w wodzie, jest w pełni wspierana przez jej pływalność, tak jak tankowiec. Jednakże, gdy łódź zaczyna poruszać się do przodu, kadłub znajduje się pod kątem ataku do wody. Podobnie jak super-tankowiec, łódź również tworzy falę przed nią, gdy się porusza, zwana falą dziobową. Jednakże, podobnie jak w przypadku samolotu przerywającego barierę dźwiękową, helikopter jest wystarczająco szybki, aby nadążyć za tą falą. Gdy osiągnie swoją własną falę łuku, statek zacznie przechylać się do tyłu. To przechylenie zwiększa opór dzięki zwiększeniu kąta natarcia kadłuba statku. Jednakże, jeśli statek ma dodatkową moc, aby pokonać ten zwiększony opór, siła nośna wygenerowana z folii kadłuba zacznie unosić kadłub z wody. W tym momencie siły na rysunku 16-4 zaczynają dominować.



Jak widać, w porównaniu do czasu, gdy łódź jest w spoczynku, bardzo mało kadłuba znajduje się teraz w wodzie. To z kolei zapewnia pozytywne sprzężenie zwrotne, ponieważ zmniejsza zwilżoną powierzchnię i tarcie skóry, a także pozwala jednostce poruszać się szybciej, generując więcej siły

nośnej i zmniejszając tarcie skóry jeszcze raz. Jednocześnie opór utworzony przez folię poruszającą się w cieczy zwiększa się do momentu wyczerpania dostępnej mocy i osiągnięcia maksymalnej prędkości. Jeśli wyznaczmy opór względem prędkości, może to wyglądać jak na rysunku 16-5.



Zwróć uwagę na region garbu. W tym miejscu statek przycina rufę w trybie przejściowym i następuje wzrost oporu. Pojawiły się kłopotliwe przypadki, w których statek, choć dysponował wystarczającą mocą, aby uzyskać prędkość projektową raz nad garbami, nie posiadał możliwości przejścia.

Wirtualna masa

Koncepcja wirtualnej masy jest ważna dla obliczenia przyspieszenia statku w symulatorze w czasie rzeczywistym. Masa wirtualna jest równa masie statku plus masa wody przyspieszona ze statkiem. W części 3 opowiedzieliśmy o lepkiej warstwie granicznej i powiedzieliśmy, że względna prędkość (w stosunku do poruszającego się ciała) cząstek płynu w pobliżu powierzchni ruchomego ciała wynosi 0 na powierzchni ciała i wzrasta do prędkości swobodnego przepływu jako odległość od powierzchni ciała się zwiększa. Zasadniczo część płynów przykleja się do ciała podczas ruchu i jest przyspieszana wraz z ciałem. Ponieważ prędkość płynu zmienia się w warstwie granicznej, tak samo przyspiesza. Dodatkowa masa, której masa ulega przyspieszeniu, to ważona integracja całej masy płynu, na którą wpływa przyspieszenie ciała. Dla statku lepka warstwa graniczna może być dość gruba, do kilku stóp pod koniec statku w zależności od jego długości, a masa wody, która ulega przyspieszeniu, jest znacząca. Dlatego też, wykonując jakiegokolwiek analizy, które wymagają przyspieszenia statku, należy również rozważyć dodatkową masę. Obliczanie masy dodanej wykracza poza zakres tego tekstu. Powinniśmy również zwrócić uwagę, że w przeciwieństwie do masy, dodana masa jest tensorem - co oznacza, że zależy od kierunku przyspieszenia. Ponadto, dodana masa dotyczy zarówno ruchu liniowego, jak i kątownego. Masa dodana jest zwykle wyrażana w postaci dodanego współczynnika masy, który jest równy dodanej masie podzielonej przez masę statku. Niektóre metody faktycznie integrują się z rzeczywistą powierzchnią kadłuba, podczas gdy inne przybliżają kadłub jako elipsoida o proporcjach pasujących do

statku. Przy użyciu tego przybliżenia długość elipsoidy odpowiada długości statku, a szerokość odpowiada szerokości statku. W przypadku ruchu wzdłużnego (to jest ruchu liniowego wzdłuż osi równoległej do długości statku), dodany współczynnik masy zmienia się prawie liniowo od 0,0 przy stosunku szerokości do długości równym 0 (statek jest nieskończenie cienki) do 0,5 przy stosunku szerokości do długości równy 1 (sfera). Gdy dodany współczynnik masy jest wyrażony jako procent masy statku, wirtualną masę można obliczyć jako $m_v = m(1 + x_a)$, gdzie m jest masą, a x_a jest dodanym współczynnikiem masy - na przykład 0,2 dla 20%. Dla typowych proporcji statku wyporowego podłużna dodana masa waha się od około 4% do 15% masy statku. Ostrożne szacunki na ogół wykorzystują 20%.

Prędkości orientacyjne

Aby zapewnić pewne wskazówki, poniżej podano typowe typy statków i odpowiednie zakresy prędkości. Pomoże to w prawidłowym symulowaniu oporu statku.

Niektóre statki i ich prędkości

Rodzaj statku	Szybkość (węzły)	Moc koni (KM)
Lotniskowiec	31,5	260 000
Krążownik	30	80 000
Tankowiec	15-20	20 000-60 000
Kontenerowiec	21	100 000
200-stopowy jacht	15,5	4 000
35-stopowa łódź rekreacyjna	30	420
35-metrowa łódź motorowa	70	1,200
40-metrowa łódź motorowa	8,5	N / A

Zauważ, że przy pewnej prędkości, w przypadku kadłubów, które nie są ślizgaczami, teoretyczna granica jest ograniczona jak szybko może płynąć łódź. Ta prędkość jest nazywana prędkością kadłuba. Przy prędkości kadłuba fale dziobu i rufy wzmacniają się nawzajem i wzrasta opór falowania. Może to być bariera dla niektórych pełniejszych kadłubów. Zauważ, że prędkość dla łodzi o długości 40 stóp to prędkość kadłuba w pełni uformowanego (nie smukłego) kadłuba o wysokości 40 stóp. Możemy obliczyć prędkość kadłuba za pomocą następującej formuły:

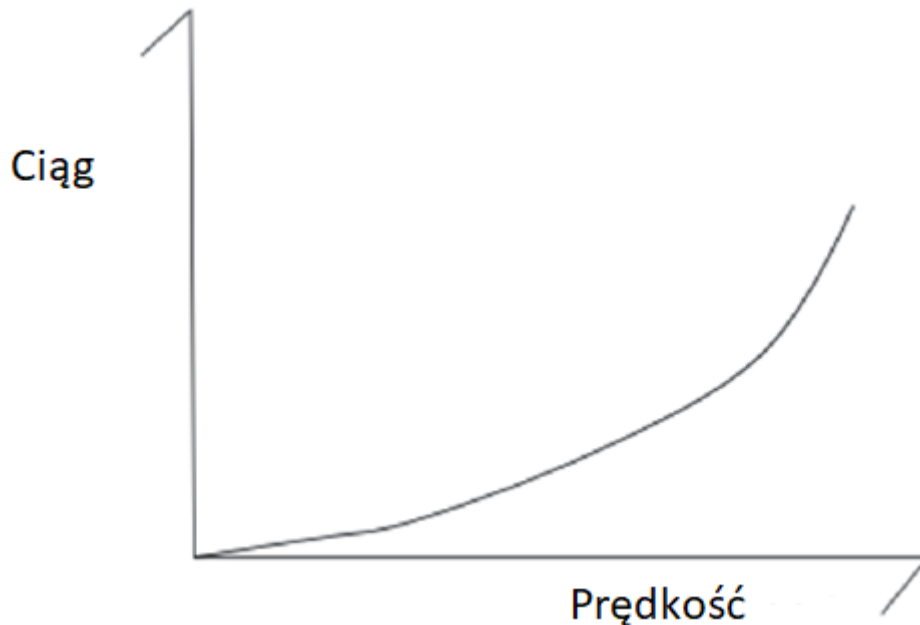
$$V_{\text{hull}} \approx 1,34 \times \sqrt{\text{LWL}}$$

Gdzie V_{hull} jest prędkością kadłuba w węzłach, a LWL jest długością na linii wodnej. Trochę nowoczesne łodzie wypornościowe, zwłaszcza kajaki wyścigowe, mogą przekraczać prędkość ich kadłuba, jeśli mają bardzo cienkie końce, długie kadłuby o wąskich belkach lub inną zoptymalizowaną formę kadłuba.

Napęd

Istnieje wiele metod napędzania łodzi przez wodę. Najstarszy jest za pomocą żagli za pomocą wiatru. Fizyka żeglarstwa mogłaby sama wypełnić kilka rozdziałów, więc nie będziemy tutaj szczegółowo omawiać. Jeśli jesteś zainteresowany tym tematem, dobrym punktem wyjścia jest *The Physics of Sailing Explained* (Sheridan House) autorstwa Bryona Andersona. Możesz również zapoznać się z rozdziałem o samolocie w tej książce i pamiętać, że żagiel jest tylko pionowym skrzydłem. Powiemy tak: jeśli zdecydujesz się umieścić w swojej symulacji statek żaglowy, pamiętaj o złotej regule! Z reguły nie można płynąć w promieniu 45 stopni od kierunku wiatru. Istnieje wiele różnych rodzajów napędu:

stery, śmigła o ustalonym skoku, śmigła z pędnikami CPP, silniki azymutujące, śmigła w dyszach, strumienie wody, dysze pompujące, przeciwbieżne i bardzo dziwny typ Voitha Schneidera. Nie możemy w to zagłębić się tutaj, ale wyżej wymieniona lista powinna się zacząć, jeśli interesuje was modelowanie specyfiki różnych typów pędników. Główną zależnością napędową dla twojej symulacji będzie prędkość obrotowa ciągu na śrubę lub krzywka ciągu do przepustnicy. Lot w maści polega na tym, że siła ciągu zależy również od prędkości jazdy. Gdy łódź porusza się coraz szybciej i szybciej w wodzie, prędkość przepływu wody do śmigła jest coraz większa. Oznacza to, że różnica pomiędzy prędkością wlotu a prędkością wyjścia jest mniejsza, co zmniejsza ilość ciągu. Ogólnie rzecz biorąc, krzywa ciągu względem prędkości łodzi będzie wyglądać jak na rysunku 16-6.



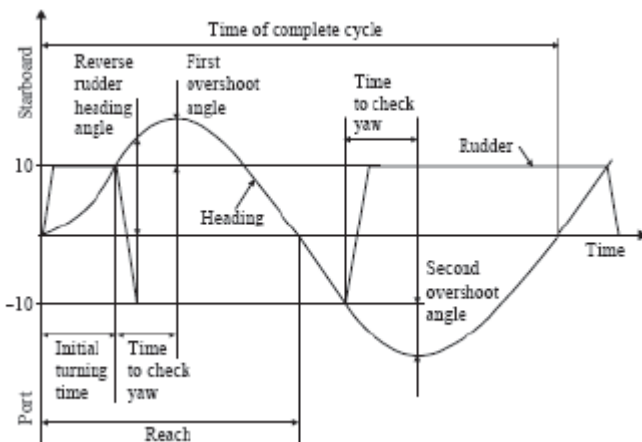
Ważnym zjawiskiem fizycznym dotyczącym napędu, które możesz chcieć włączyć, jest kawitacja. Kawitacja pojawia się, gdy śmigło porusza się wystarczająco szybko, aby strona niskiego ciśnienia ostrza zaczęła spontanicznie tworzyć pęcherzyki pary. Pęcherzyki te istnieją przez krótki czas, a następnie, gdy śmigło się obraca, zmienia się ciśnienie statyczne. To wyższe ciśnienie statyczne powoduje gwałtowne zawalenie się pęcherzyków. Ta zapaść jest tak szybka i wściekła, że może powodować erozję metalu w wysokim tempie. Będzie jadał śmigło, dopóki nie będzie już wytwarzać ciągu. Jest również bardzo głośny. Właśnie dlatego śmigła podwodne mają inny kształt niż śmigła innych statków. Starają się ograniczyć kawitację, aby nie zostały usłyszane przez wrogie statki. Uszkodzenia spowodowane kawitacją powodują również ograniczenie prędkości na RPM dla śmigła. Kawitacja jest prawdziwym zjawiskiem, które można wykorzystać do karania gracza za jazdę z dużą prędkością przez cały czas.

Manewrowość

Innym aspektem statków i łodzi, który jest często zbyt uproszczony, jest manewrowość. Zwrotność jest również bardzo złożonym tematem, którego symulacja numeryczna wykracza poza obecny obszar symulacji w czasie rzeczywistym. Jednak przy pewnych uproszczeniach i założeniach można go dokładniej modelować, niż jeśli nie znasz podstawowej struktury. Prawie wszystkie statki manewrują za pomocą dwóch metod: sterów lub wektorowania ciągu. Użytkownicy na ogół nie przejmują się różnicami, więc można modelować zarówno poprzez odchylenie wektora ciągu od centrum.

Sterowanie wektorem i ciągami

Chociaż ster i wektorowanie ciągu mają taki sam wynik, istnieją pewne istotne różnice. System wektorowania ciągu, taki jak łódź odrzutowa, może sterować tylko wtedy, gdy statek wytwarza siłę ciągu. Z kolei ster działa tylko wtedy, gdy statek ma prędkość do przodu. Jeśli łódź nie porusza się do przodu z wystarczającą prędkością, wówczas ster nie może wytworzyć momentu obrotowego. Jeśli pamiętasz o tych różnicach, możesz modelować oba systemy w ten sam sposób. Najważniejszą rzeczą, o której należy pamiętać podczas modelowania większych statków w twoich grach, jest to, że potrzebują dużo czasu, aby zareagować na wejścia sterujące. Rysunek 16-7 śledzi kurs statku w czasie, podczas tak zwanego manewru 10/10.



Statek porusza się po linii prostej, a ster skierowany jest ponad 10 stopni w jednym kierunku. Gdy kurs statku zmieni się o 10 stopni, ster zostanie przesunięty na przeciwną stronę pod tym samym kątem. Początkowy czas zwrotu to czas, w którym statek zmienił kurs o 10 stopni. Ponieważ duże statki mają ogromny pęd, będą nadal się obracać, nawet jeśli ster jest w przeciwnym kierunku. Maksymalne odchylenie od pierwotnego kursu minus 10 stopni, przy których ster został przewrócony, nazywa się kątem przeregulowania. Rozmiar tego kąta jest miarą tego, jak wolno statek reaguje na ster. W przypadku większych statków może to wynosić od 15 stopni, gdy światło i 45 stopni, gdy jest załadowany ładunkiem. Czas na sprawdzenie odchylenia to czas w sekundach potrzebny do osiągnięcia kąta przeregulowania i ponownego rozpoczęcia zmiany kursu przez statek. Powtarza się to dla drugiej strony, aby wykryć wszelkie odchylenia, jakie może mieć naczynie do obracania w określonym kierunku. Morał tej historii polega na tym, że dla statków innych niż szybkie małe statki, łodzie i statki mogą potrzebować znacznej ilości czasu, aby odpowiedzieć sterowi. Twoja symulacja powinna dążyć do odtworzenia zdolności obrotowej, która pasuje do rysunku 16-7, aby uzyskać dodatkowy realizm. Specjalny rodzaj wektorowania ciągu nazywany jest kierowaniem przepustnicy. Wyobraź sobie, że łódź ma dwa silniki. Jeśli jeden biegnie do przodu, a drugi do tyłu, statek obróci się dość szybko. W przypadku dwusilnikowego statku pracującego z małą prędkością, stery są często wyśrodkowane, a statek manewruje wyłącznie poprzez zmianę ustawień przepustnicy dwóch podpór.

Spacer śmigła

Innym interesującym zjawiskiem manewrowania, które jest ściśle związane z wektoryzacją ciągu, nazywa się spacerem śmigła. Jest to szczególnie ważne w przypadku statków z jednym śmigłem poruszającym się w ciasnych przestrzeniach. Przyczyna chodzenia śmigła związana jest z faktem, że większość śmigieł jest ustawiona pod kątem do horyzontu. Ten kąt powoduje, że nacisk jest większy, gdy ostrza poruszają się w dół, niż gdy ostrza poruszają się w górę. W śmigle, które obraca się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, powoduje to pchnięcie w prawo. Na biegu do przodu ster jest bardzo skuteczny w przeciwdziałaniu skokowi śmigła, ale w kierunku przeciwnym ster jest mniej skuteczny, co

sprawia, że śmigło porusza się znacznie lepiej. Może to znacznie zwiększyć realizm podczas symulowania statków w manewrach dokowania.