Mirosław Jurdziński
Akademia Morska w Gdyni

FALE FENOMENALNE W ŻEGLUDZE MORSKIEJ

W pracy opisano proces planowania nawigacji w obszarach występowania fal fenomenalnych. Zdefiniowano fale fenomenalne, rejony i przyczyny ich powstawania. Przedstawiono kilka programów badawczych ukierunkowanych na propagację, występowanie i prognozowanie fal fenomenalnych. W zakończeniu wspomniano o konieczności wzmocnienia nowo budowanych kadłubów statków morskich z uwzględnieniem istnienia fal fenomenalnych.

Słowa kluczowe: *propagacja falowania, planowanie nawigacji morskiej, fala fenomenalna.*

WSTĘP

Na przestrzeni dwóch ostatnich dekad w literaturze fachowej pojawiły się liczne publikacje, wraz z wynikami badań statystycznych, na temat niezwykłego zjawiska falowania morskiego – **fal fenomenalnych.**

Fundamentalne znaczenie dla bezpieczeństwa nawigacji w planowanym rejonie pływania statku ma rzetelna informacja na temat stanu środowiska morskiego. Znajomość rejonów występowania niebezpieczeństw nawigacyjnych, jakie stanowią pola wysokiego falowania, pozwoli na ich omijanie lub zaplanowanie środków ostrożności w celu uniknięcia awarii statku.

Niniejszy artykuł zawiera zakres informacji dla nawigatorów, którzy w procesie nawigacji morskiej planują trasy żeglugowe przechodzące przez obszary nawiedzane przez fale fenomenalne. Temat jest bardzo aktualny w związku z dość intensywnym występowaniem pewnych zjawisk hydrometeorologicznych.

Według autora nazwa fal fenomenalnych kojarzy się ze zjawiskiem rzadkim, różniącym się od zjawisk znanych, codziennych, stale istniejących, powtarzających się w czasie. Pojęcie fal fenomenalnych pojawiło się w publikacji autora w 1975 roku, jako ostrzeżenie dla polskich statków pływających w rejonach południowo-wschodniej Afryki [9].

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Źródłami wywołującymi falowanie morza są: wiatr, zjawiska sejsmiczne i grawitacja ciał niebieskich [2]. W zależności od siły wiatru i przestrzeni morskiej oraz ciągłego czasu działania zmieniają się parametry fal morskich.

Znane są różne wielkości fal oceanicznych, zależne głównie od akwenu, panujących warunków pogodowych i czasu ich powstawania. Falowanie jako proces ma charakter stochastyczny, fale są w miarę regularne i przewidywalne. Wiele z nich może osiągać znaczne wymiary. Jednak nie wszystkie wysokie fale muszą być uznane za fale fenomenalne, które należą do zjawisk nieprzewidywalnych, groźnych dla bezpiecznej nawigacji. Ich zwiększone parametry, jak np. wysokość, stromość i szybkość rozchodzenia się, posiadają ogromną siłę niszczącą. Spotkanie statku z taką falą zwykle kończy się tragicznie.

Obecnie, w związku ze zmianami klimatycznymi, w wielu rejonach świata dochodzi do intensyfikacji zjawisk hydrometeorologicznych. Na oceanach obserwuje się zwiększoną częstotliwość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych. W związku z tym proces planowania i realizacji nawigacji powinien opierać się na znajomości warunków środowiska morskiego rejonu pływania. Ważnym elementem w tym procesie są aktualne prognozy hydrometeorologiczne, podstawą bowiem bezpiecznej nawigacji jest wyznaczenie trasy żeglugi statku wolnej od niebezpieczeństw nawigacyjnych.

Fale fenomenalne stanowią poważne zagrożenie dla statków morskich. Intencją publikacji jest przekazanie podstawowych informacji o falach fenomenalnych kapitanom statków, w celu wykorzystania ich w procesie planowania i realizacji podróży morskiej.

Dobra praktyka morska wymaga od kapitanów statków handlowych zdecydowanych decyzji co do kontynuowania podróży, w momencie nagłego załamania pogody w rejonie nawigacji. W takich przypadkach kapitan musi umieć odpowiedzieć na trzy pytania [11]:

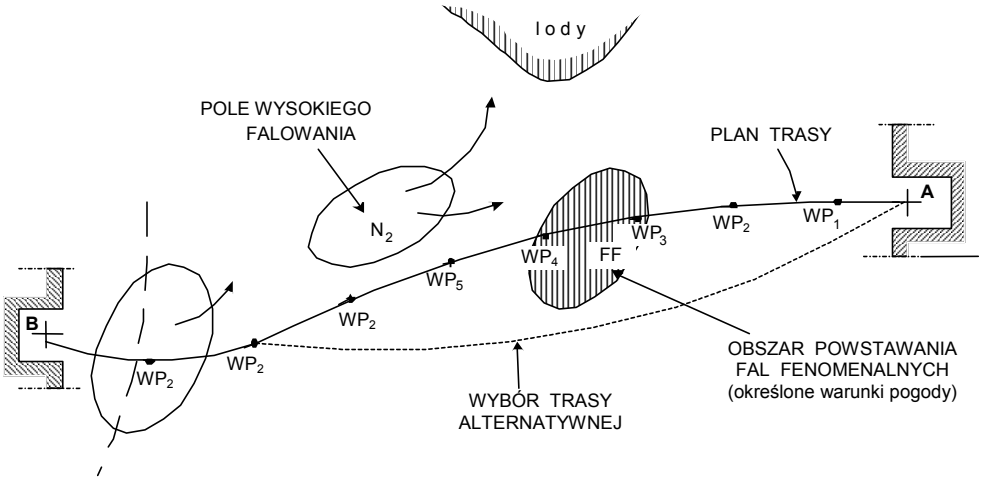
- Jak unikać pola wysokiego falowania (cyklonów tropikalnych)?
- Jak manewrować statkiem uszkodzonym po spotkaniu z wysoką falą?
- Kiedy podjąć decyzję opuszczenia przez załogę statku uszkodzonego?

Ważnym elementem specjalistycznej wiedzy morskiej jest zagadnienie fal fenomenalnych. Informacji na ten temat należy poszukiwać w:

- Światowym Banku Danych (*The World Data Bank*), który zawiera szczegółowe informacje o wypadkach morskich spowodowanych również działaniem fal fenomenalnych;
- prognozach środowiskowych, podających informacje o rejonach występowania fal fenomenalnych. Korzystać z prognoz falowania dotyczących wysokości fal i znacznej H_S [m];
- informacjach na temat prawdopodobieństwa występowania fal fenomenalnych w rejonach planowania podróży.

2. PLANOWANIE NAWIGACJI W REJONACH WYSTĘPOWANIA FAL FENOMENALNYCH

Zgodnie z Konwencjami SOLAS i STCW, każdy statek przed wyjściem w morze musi mieć przygotowany plan podróży, ze szczególnym opracowaniem trasy dla rejonów występowania niebezpieczeństwa, między innymi fal fenomenalnych.



Rys. 1. Planowanie trasy w rejonach występowania fal fenomenalnych (opracowanie własne)

Fig. 1. *Passage planning In the areas of freak waves occurrence*

Szczegóły te dotyczą:

- posiadania przez kapitana aktualnych, wiarygodnych informacji prognostycznych dla krytycznego rejonu pływania (o występowaniu fal fenomenalnych);
- uwzględnienia w planie podróży trasy alternatywnej na wypadek dużego prawdopodobieństwa wystąpienia fal fenomenalnych na planowanej trasie;
- wykorzystania wszystkich możliwości pomocy z lądu w prowadzeniu statku. Wyspecjalizowane ośrodki lądowe udzielają kapitanom porad w procesie wyboru optymalnych tras żeglugowych.

2.1. Systemy wspomagania podejmowania decyzji przy planowaniu tras żeglugowych

Światowe administracje morskie dysponują systemami do udzielania porad wspomagających kapitanów przy planowaniu tras oceanicznych. Systemy te obejmują: *System Nawigator* BVS, VOSS (*Vessel Optima Safety System*), *Smart routing* oraz kilka innych serwisów, jak np. SPOS, *Bridge*, AWT [27].

System Nawigator BVS prowadzi pełny serwis informacji dla kapitanów statków morskich z zakresu nawigacji pogodowej. Planowanie trasy polega na przekazywaniu *online* informacji o warunkach atmosferycznych na trasie rejsu i miejscu aktywności piratów. System pomaga:

1. Zaplanować podróż na aktualny obszar ruchu, na podstawie prognozy 15-dniowej, odnawianej cztery razy na dobę (co 6 godzin).
2. Prowadzić planowanie graficzne na mapach z predykcją, uwzględniając adaptację prędkości i zużycie paliwa na podstawie algorytmów.
3. Stosować optymalizację podróży według kryteriów: minimum czasu, minimum zużycia paliwa, minimum kosztów na określony, stały moment zawinięcia statku do punktu przeznaczenia, dla różnych cen i typów paliw.
4. Określić i uwzględnić rejony zlodzone (góry lodowe), obszary zimowe linii ładunkowych, obszary zagrożone militarnie. Określić obszary zakazane w czasie optymalizacji podróży.
5. Uwzględnić na żądanie plan podróży w rejonach podejściowych do portów świata (3000 miejsc).
6. W planowaniu uwzględniać ostrzeżenia dla ruchu statku na fali, gdzie może następować rezonans kołysań (na podstawie specjalnych diagramów), podając bezpieczne wektory sterowań (kursy prędkości).
7. Podawać dane o ostatnim napadzie piratów.

2.2. Ograniczenia systemów przekazywania porad kapitanom statków w procesie optymalizacji tras oceanicznych

1. Ponad 50% zamówień porad dla kapitanów w procesie wyboru tras optymalnych zgłaszanych jest przez czarterujących w celu kontroli ustawowych umów o utrzymanie prędkości statku (klauzule) [3]. Problemy dokładności, kierunki i prędkości wiatru (falowanie) nie są brane pod uwagę.
   Parametry wiatru, wyrażone w skali Beauforta, stanowią ograniczenia ze względu na duże parametry statków.
2. Tradycyjne dwa systemy do udzielania porad kapitanom statków w procesie wyboru tras optymalnych odnoszą się głównie do kryterium „unikania sztormów", na podstawie map powierzchniowego ciśnienia, prędkości zaś do unikania wysokiego falowania opierają się na charakterystykach dla kierunków natarcia fali do kursu statku.
3. Każdy statek inaczej reaguje na zewnętrzne zakłócenia falowania. Statek zwalnia prędkość w wyniku zwiększenia oporu falowego przy stałym zużyciu paliwa, a kapitan redukuje obroty silnika w celu ochrony statku przed uszkodzeniami sztormowymi. Porady ośrodków lądowych obu tych czynników na ogół nie uwzględniają w procesie kalkulacji prędkości bezpiecznej.

2.3. Zakres informacji pomocny przy wyborze optymalnych tras rejsu

Technologiczny rozwój łączności oraz szybkość transmisji informacji w żegludze morskiej pozwoliły na przekazywanie, w różnej formie, danych prognostycznych na statki pełnomorskie. Wzrosła dokładność obserwacji hydrometeorologicznych, co dało możliwość globalnego przekazywania informacji o wysokim falowaniu (z dokładnością do 1 m), w prognozach 3-dniowych. Prognozy 10-dniowe pozwalają na obserwację trendów ruchu niżów barycznych na oceanach. Doskonała łączność satelitarna ułatwia możliwość konsultacji kapitana z lądem w systemie *online*, w sprawie prognoz hydrometeorologicznych.

Innowacje w konstrukcjach statków w zakresie hydrodynamiki, jak wprowadzenie czujników do kadłubów statku, pozwalają na określenie naprężeń elementów konstrukcyjnych. Uzyskane dane dają kapitanom informacje o zachowaniu się kadłuba na fali. Wymuszona zmiana prędkości na fali oraz dobrowolna redukcja prędkości statku może spowodować zmniejszenia uszkodzeń sztormowych statku i ładunku.

Odpowiedź kadłuba na zakłócenia falowe w szerokim zakresie ruchu pozwala kapitanom na podejmowanie decyzji w sprawie wyboru bezpiecznego wektora sterowań w pływaniu na wysokiej fali. Wchodzą tu w grę bezpieczeństwa statecznościowe, wytrzymałościowe oraz zdolności ruchowe (manewrowe).

W instytucji *Ocean System Institute* [3] od lat działają zintegrowane systemy optymalizacji trasy statku VOSS (*Vessel Optimization and Safety System*). Z systemów tych korzystają armatorzy statków morskich, czarterujący oraz ubezpieczyciele.

3. ZJAWISKO FALOWANIA MORSKIEGO

Falowanie morskie może być wywołane i zdefiniowane takimi parametrami, jak:

- prędkość wiatru i czas jego działania;
- pozycja odległa od lądu (wolnej przestrzeni działania wiatru) nazywana dystansem rozbiegu (*Fetch*);
- czas stałego kierunku działania wiatru.

Parametry fizyczne i geometryczne falowania morskiego obejmują:

- energię fali znacznej;
- wysokość fali [m];
- długość od grzbietu do grzbietu fali [m];
- okres [s];
- kierunek rozchodzenia się fal, czyli kierunek, z którego nadchodzi fala [°];
- prędkość rozchodzenia się fal [m/s].

Rodzaje tworzących się fal są następujące:

- fale kapilarne;
- fale rozwinięte (morskie) o parametrach ustalonych i nieustalonych, gdy parametry fal jeszcze rosną;
- fale martwe.

Uzupełnienie do podziału fal morskich stanowią:

- fale fenomenalne (monstrualne).

W literaturze fachowej występuje szereg określeń zjawiska (pojęcia) fal fenomenalnych (F.F.), jak:

1. Ekstremalne (*Extreme waves*)
2. Niezwykłe (*Freak waves*)
3. Monstrualne (*Monster waves*)
4. Dzikie (złośliwe) (*Rogue waves*)
5. Olbrzymie (*Gigant waves*)
6. Asymetryczne (*Asymetric waves*)
7. Fenomenalne (wg autora nazwa polska)
8. Fale znikąd (*Waves from nowhere*)
9. Dziury w morzu (*Holes in the sea*)
10. Ściana wody (*Wall of water*)
11. Trzy siostry (*Three Sisters waves*)
12. Chwilowe, przemijające (*Transient*)
13. Nieprawidłowe (*Abnormal waves*)
14. Epizodyczne (*Episodic waves*)
15. Stuletnie (*Hundred years waves*)
16. Zabójcze (*Killer waves*)

Tyle nazw pojawiło się ze względu na długi okres istnienia tego zjawiska na morzach i oceanach świata. Najczęściej w literaturze anglojęzycznej pojawiają się określenia *Freak waves* (niezwykłe fale) i *Rogue waves* (dzikie fale).

3.1. Definicje fal fenomenalnych

W literaturze fachowej pojawiają się różne definicje określające zjawisko powstawania (tworzenia się) fal fenomenalnych:

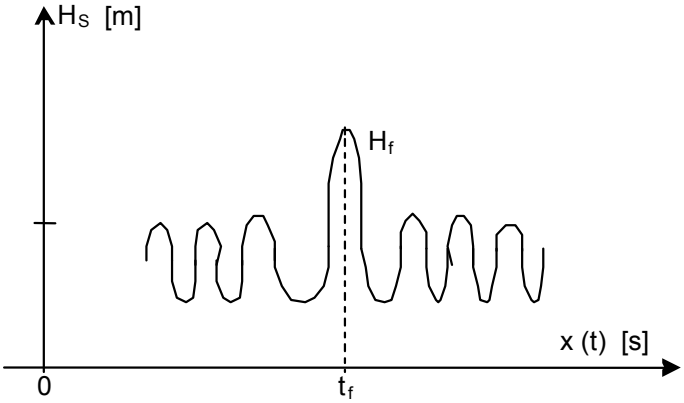
1. Są to fale, które pojawiają się znikąd, powstają niespodziewanie i są znacząco wysokie. Inne od fal spotykanych w tym rejonie i w tym samym czasie. Ponadto są bardzo strome [6].
2. Oficjalne źródło Światowej Organizacji Meteorologicznej (*WMO*) przedstawia definicję fal fenomenalnych (*Freak Waves*)

   „Fala fenomenalna może być zdefiniowana jako fala wyjątkowej wysokości, gdzie na jej czole wytwarza się głęboka bruzda. Posiada niezwykłą stromość, co stwarza niebezpieczeństwo dla żeglugi. Dotychczasowe doniesienia sugerują, że takie fale zwykle pojawiają się w rejonie silnego strumienia prądu o przeciwnym kierunku do działania wysokiej fali" [8, 23].
3. Główne właściwości fali fenomenalnej są następujące:
   - fala powstaje na wzburzonym morzu;
   - wartość wysokości jest równa $H_f \approx 2{,}4\ H_S$ (2,2 – 2,4);
   - wartość wysokości grzbietu $h_f > 0{,}65\ H_f$,

     gdzie:

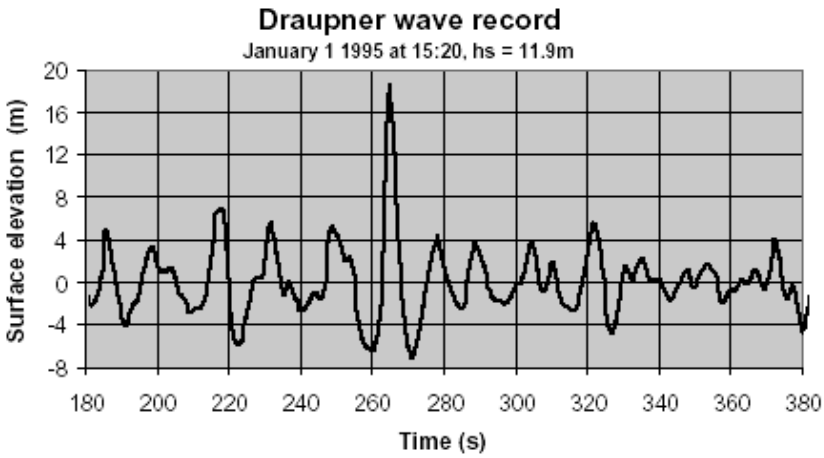
     H_f – wysokość fali fenomenalnej [m],
     H_S – wysokość fali znaczącej [m],
     h_f – wysokość grzbietu fali fenomenalnej [m],
     λ_F – długość fali fenomenalnej [m];

- przed i za falą fenomenalną są fale małe (H_S) o okresie kilku sekund [9]. Przedstawiają to rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Przebieg falowania przy powstaniu fali fenomenalnej

Fig. 2. *An example of the freak waves generation*



Rys. 3. Przebieg fali fenomenalnej na platformie wydobywczej Draupner

Fig. 3. *Record of freak waves parameters on Draupner oil platform*

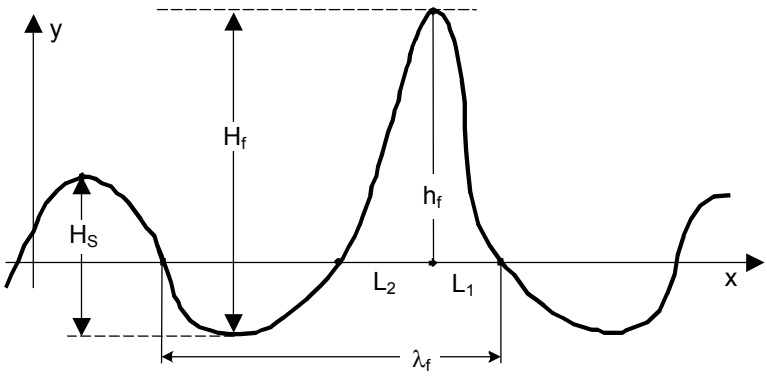
Nie wszystkie fale są falami fenomenalnymi. Silne sztormy, jak cyklony tropikalne, mogą wytwarzać duże gabaryty falowania, ale te mają charakter fal regularnych, liniowych i przewidywalnych.

Na przykład: Na 100 fal pojawi się wysokość fali $H = 1{,}67\ H_S$ [m]

gdzie H_S – wysokość znacząca [m].

Podobnie na 1000 fal pojawi się fala o wysokości $H = 1{,}83\ H_S$ [m] [5]

4. Fale fenomenalne nie są opisane rozkładem Gaussowskim, lecz opisane zależnościami, jak na rysunku 2 [10, 22].



Rys. 4. Parametry fali fenomenalnej [13]
Fig. 4. *The freak waves parameters [13]*

Wartość: $H_f > H_S \cdot 2{,}0$ lub $(2{,}2 - 2{,}4)$ (1)

$h_f > H_S \cdot 1{,}2$ $h_f = 0{,}65 \cdot H_f$ (2)

$H_f / \lambda_f = 1{,}7$ (stromość) (3)

$L_2 > L_1 > 2{,}0$ (asymetria pionowa) (4)

$A_i = \dfrac{H_f}{H_S}$ (indeks anomalii)

3.2. Rejony występowania fal fenomenalnych

Tylko w ciągu trzech tygodni obserwacji przez satelity ziemskich mórz i oceanów zarejestrowano 10 przypadków wystąpienia fal fenomenalnych o wysokości powyżej 25 m [5]. Natomiast statystyki podają, że w ciągu dwóch ostatnich dekad zaginęło na morzach i oceanach świata około 200 dużych statków. Prawdopodobna przyczyna to ekstremalne warunki hydrometeorologiczne.

Fale fenomenalne mogą wystąpić na planowanej trasie statku w określonych rejonach i określonym czasie. W historii żeglugi odnotowano wiele zjawisk potwierdzających istnienie fal gigantycznych, o różnych wysokościach (od 20–30 m), które spowodowały awarie statków, a także ich zaginięcia.

W tabeli 1 pokazano wybrane przypadki awarii powstałych w wyniku działania fal fenomenalnych.

Informacje tego typu powinny wyczulić kapitanów na zjawisko występowania fal fenomenalnych i na konieczność uwzględniania niebezpiecznych rejonów w planach podróży.

Tabela 1. Wybrane wypadki awarii lub utraty statku spowodowane działaniem fal fenomenalnych [1]

Table 1. *Selected casualties and total losses of ships coast by freak waves*

Lp.	Nazwa i typ statku	Data	Wyjaśnienie przyczyn awarii
1	USS RAMAPO tankowiec wojenny	1933	Północny Pacyfik, napotkał falę o wysokości 34 m
2	m/s QUEEN MARY	1942	W rejonie Szkocji napotkał falę 28 m, ocalał z dużym przechyłem
3	s/s MICHELANGELO liniowiec	1966	Na Atlantyku, w drodze do Nowego Jorku fala o wysokości 24 m wybiła szyby, śmierć 3 osób
4	m/s MŰNCHEN	1978	Zatonięcie na środku Atlantyku po uderzeniu 20 m fali
5	m/s DERBYSHIRE	1980	Zatonął podczas tajfunu, bardzo wysokie fale – do 36 m
6	DRAUPNER (wieża wiertnicza)	1995	Na Morzu Północnym zanotowano wysokość fali – 25,6 m
7	m/s QUEEN ELIZABETH 2 pasażerski	1955	Północny Atlantyk, w Hurricane Luis zanotowano falę o wysokości 29 m
8	m/s DISCOVERY oceanograf	2000	Atlantyk, w rejonie Szkocji zanotowano falę o wysokości 29,1 m
9	m/s BREMEN m/s CALEDONIAN STAR	2001	Na Południowym Atlantyku uderzenie fali o wysokości 30 m, wybite szyby na mostku, utrata urządzeń nawigacyjnych
10	Laboratorium Badawcze Oceanograficzne	2004	Zatoka Meksykańska, zmierzono fale o wysokości 27,7 m i długości 7 m
11	m/s PONT-AVEN (ferry)	2006	Zatoka Biskajska, w sztormie o sile 9°B, uderzenie fal o wysokości 15 m
12	m/s PRINSENDAM (wycieczkowiec)	2007	Cape Horn, uderzenie fali o wysokości 12 m, (40 osób rannych wymagających hospitalizacji)

Niżej zamieszczono geograficzny spis głównych rejonów występowania fal fenomenalnych. Są to potencjalnie niebezpieczne obszary wodne, gdzie w określonych, sprzyjających warunkach mogą pojawić się fale fenomenalne [11].

1. Płycizna Nowofundlandzka
2. Południowe wody Grenlandii
3. Wody przybrzeżne Irlandii
4. Obszary Wysp Owczych
5. Wody Norwegii
6. Morze Północne
7. Morze Bałtyckie
8. Zatoka Biskajska
9. Wody Golfsztromu wybrzeży USA
10. Zatoka Meksykańska
11. Zachodnie wody Kolumbii Brytyjskiej
12. Rejon Przylądka Horn
13. Południowo-wschodnie wybrzeże Afryki (na prądzie Agulhas)
14. Morze Bengalskie
15. Morze Południowochińskie
16. Morze Japońskie
17. Pacyfik na wschód od Japonii
18. Wybrzeże Australii
19. Na południe od 40° szer. południ.
20. Morze Śródziemne
21. Wielkie Jeziora Kanadyjskie
22. Zachodnia Australia
23. Południowy Pacyfik powyżej 50° szer.

3.3. Przyczyny powstawania fal fenomenalnych

Przyczyny pojawiania się fal fenomenalnych na wzburzonym morzu można podzielić na:

- zewnętrzne – środowiskowe;
- wewnętrzne – związane z właściwościami propagacji fal morskich.

Wyniki przeprowadzonych licznych badań zjawiska fal fenomenalnych [13] wskazują, że przyczyny zewnętrzne stanowią:

- działania wiatru przeciwnie do kierunku ruchu prądu morskiego;
- ustawienie grupowe i wzajemne oddziaływanie na siebie fal;
- oddziaływanie dna – tarcie o dno powoduje zmianę profilu fali, wpływając na asymetrię;
- dyfrakcja – fale wywołane ugięciem się linii brzegowej lub wokół wyspy;
- zmiana stromości przy wzroście prędkości wiatru;
- krzyżujące się systemy fal oraz przy przecinających się kierunkach ruchu falowania martwego;
- tzw. fala stojąca.

Przyczyny wewnętrzne powstawania fal fenomenalnych są następujące:

- modulacja częstotliwości w warunkach propagacji przypadkowej;
- zmienność warunków modulacji częstotliwościowej fal wiatrowych. Modulacja częstotliwości prowadzi do większego wzmocnienia fal niż modulacja amplitud;
- efekt wzajemnego współdziałania fal;
- nieliniowość propagacji fal (powyżej trzeciego rzędu), wpływająca na niestabilność falowania;
- fazowość i kierunkowość swobodnej propagacji elementów falowania, a także duża liczba grzbietów fal powstających w jednym punkcie. Kierunkowość propagacji pola falowania odgrywa tu kluczową rolę.

Stąd duże fale oceaniczne pojawiają się jako oddzielne zdarzenia.

Reasumując, powstawanie fal fenomenalnych na wzburzonym morzu spowodowane jest:

- kombinacją fazową elementów fal;
- wzrastającą stromością (efekt Stokesa);
- wzrostem nieliniowości w propagacji;
- efektem wielokierunkowości;
- efektem dna (ograniczenia głębokości, jej zmiany, refrakcja);
- efektem działania prądu;
- wpływem działania wiatru;
- czasem trwania sztormu (ruchem cyklonów tropikalnych).

W wodzie głębokiej własna, nieliniowa modulacja jest uznana za najbardziej prawdopodobną przyczynę powstawania zjawiska fal fenomenalnych.

W żegludze morskiej fale fenomenalne występują jako fale indywidualne, o szczególnych parametrach, wyjątkowych kształtach i wysokościach. Pojawiają się w różnych obszarach, nagle, bez możliwości ich prognozowania. Są to ściany wody gwałtownie się poruszające (30 węzłów) i spadające z ogromną siłą, zdolne do uszkodzenia lub zatopienia nawet supertankowca [21, 24].

W tabeli 2 pokazano zbadane zjawiska fal fenomenalnych.

Tabela 2. Wybrane zbadane zjawiska fal fenomenalnych na oceanach świata [21]

Table 2. *Selected information on freak waves on the oceans*

Lp.	Opis, pozycja i data zjawiska			Wysokość fal	
				H_S [m]	H_F [m]
1	Sydney–Hobart		(1998)	12–18	43 (P)
2	Informacje ze statków – Atlantyk, – Pacyfik		(1980)	 13–23 11–20	 40 (O) 36 (O)
3	Platformy wiertnicze			–	34 (O)
4	USS RAMAPO	Północny Pacyfik	(1933)	–	34 (O)
5	DALEWOOD E.	Północny Pacyfik	(1933)	12	31 (P)
6	v/s OCEAN TANGER	Północny Atlantyk	(1982)	–	31 (K)
7	s/s BREMEN	Południowy Atlantyk		–	30 (K)
8	Łódź podwodna GROUPER	Atlantyk		Morze Spokojne	30 (P)
9	m/s CALEDONIAN S/D	Południowy Atlantyk	(2001)	–	30 (K)
10	m/s ATHENE	Ocean Indyjski	(1977)	–	30 (K)
11	m/s QUEEN ELIZABETH 2	Południowy Atlantyk	(1995)	–	29 (K)
12	Cyklon tropikalny IVAN	Atlantyk	(2004)	–	28 (P)
13	s/s QUEEN ELIZABETH	Południowy Atlantyk	(1943)	–	27 (K)
14	Platforma wiertnicza DRAUPNER	Morze Północne	(1995)	12	26 (P)
15	s/s ESSO Nederland	Połudn.-wsch. Afryka, przy prądzie Agulhas		–	25 (K)
16	Maksymalna fala (obserwacje satelitarne całego globu)		(2001)	–	24 (P)
Metody oceny: **P – pomiar O – obliczanie K – kalkulacja**					

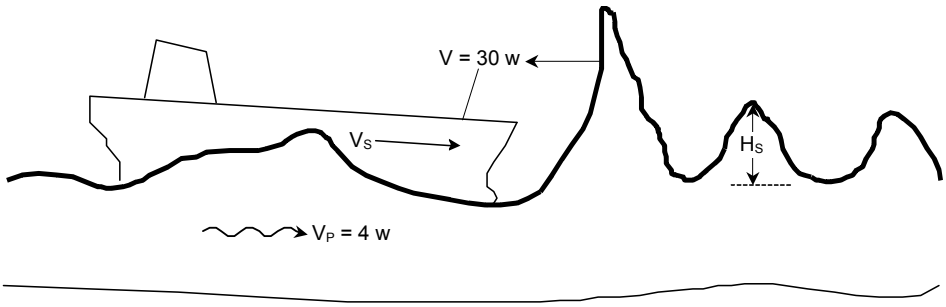
W systemie propagacji nieliniowej istnieje możliwość interakcji wzajemnej fal. Polega ona na zjawisku wzajemnego „pożyczania energii" przez sąsiednie fale, co może powodować ich silny wzrost. Podobne zjawisko powstaje w rejonach cyklonów tropikalnych, kiedy oko cyklonu przemieszcza się z dużą prędkością, zmieniając kierunek ruchu i falowanie. Powstaje zespół fal aktywnych i martwych, które rozchodzą się w różnych kierunkach. Następuje interferencja fal i tworzą się fale fenomenalne.

Inna z teorii powstawania fal fenomenalnych zakłada, że pojawiają się one na obszarach morskich, gdzie występuje układ stały prądów morskich oraz fale sztormowe o kierunkach przeciwnych do prądów przy odpowiedniej batymetrii (profilu dna) [14].

Większość obszarów występowania fal fenomenalnych leży na trasach stałych prądów, gdzie przebiegają trasy statków handlowych. Istnieje zatem konieczność uwzględniania zjawiska fal fenomenalnych w procesie planowania i realizacji nawigacji morskiej [9].

Podstawą bezpiecznej nawigacji morskiej jest prognoza hydrometeorologiczna o dużym prawdopodobieństwie sprawdzalności, pozwalająca uniknąć niebezpieczeństwa dla statku i awaryjności.

Proces planowania trasy statku w rejonach występowania fal fenomenalnych musi być realizowany z pełną znajomością stopnia bezpieczeństwa. Kontakt statku z falą fenomenalną stanowi wielkie zagrożenie.



Rys. 5. Zjawisko działania fali fenomenalnej na statek

Fig. 5. *Occurrence of freak waves input on the ship AT sea*

3.4. Prognozowanie fal fenomenalnych w żegludze morskiej

Fale fenomenalne stanowią nieliniowe spektrum falowania na głębokich wodach mórz i oceanów. Prognozowanie ich wystąpienia na trasie żeglugi stanowi bardzo trudny problem w procesie planowania i realizacji podróży.

Prognozowanie pojawienia się fal fenomenalnych na otwartych akwenach mórz oceanów opiera się na wzorach Beniamina Febra oraz na nieliniowych równaniach Schrodingera. W procesie badawczym stworzono Indeks (BFI), który może być miarą poziomu nieliniowości propagacji fal, pomocną w przewidywaniu powstawania fali fenomenalnej. Wyższa wartość współczynnika BFI (powyżej 1) może wskazywać na prawdopodobieństwo powstawania fali fenomenalnej.

Wartość współczynnika BFI można opisać funkcją:

$$\mathrm{BFI} = f(\in, \Delta w, w_0) \tag{6}$$

gdzie:

$\in$ – miara stromości fal,

Δw – szerokość widma częstotliwości fal,

w_0 – częstość kołowa fal.

4. PROCESY BADAWCZE FAL FENOMENALNYCH

Nowa era badań rozpoczęła się w dniu 1 stycznia 1995 roku, gdy na Morzu Północnym na platformie wiertniczej DRAUPNER zaobserwowano falę o wysokości 25,6 m (wysokość grzbietu 18,5 m). Cały proces był obserwowany i został opisany. Druga faza badań fal fenomenalnych rozpoczęła się dzięki włączeniu w 2001 roku satelitów do obserwacji powierzchni mórz i oceanów. Satelity ESA w ciągu trzech tygodni obserwacji oceanów zarejestrowały pojawienie się 10 potężnych fal na oceanach o wysokości 25 m [19]. Potwierdziło to przypuszczenia, że fale fenomenalne są zjawiskiem istniejącym w przyrodzie od dawna i pojawiającym się na morzach i oceanach świata jako zjawisko w modelu przypadkowym. Badania prowadzono, w bardzo szerokim zakresie, w wielu instytutach naukowych na świecie. Dotyczyły one następujących zagadnień [28]:

- modelowania numerycznego powstawania fal fenomenalnych na oceanach świata;
- statystycznego modelowania występowania fal fenomenalnych;
- zbierania informacji o zjawiskach towarzyszących falom fenomenalnym;
- prognozowania pojawienia się fal fenomenalnych.

Europejski program badań MA-X WALE (2003). Analiza badań wykazała szereg zjawisk fizycznych związanych z istnieniem gigantycznych fal oceanicznych. W programie wykorzystano obserwacje satelitarne i radarowe z zainstalowanych na stałe obiektów na morzu oraz z pław hydrometeorologicznych.

W skład zespołu badawczego wchodziło 11 naukowych ośrodków badawczych (w tym Polska Akademia Nauk).

Celem projektu było [19]:

1. Potwierdzenie istnienia fal fenomenalnych i związanego z nimi ryzyka. Ocena parametrów i kształtów w celu możliwości ich modelowania. Zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych, rozpoznanie rejonów ich występowania wraz z rozkładem prawdopodobieństwa.
2. Zastosowanie informacji o działaniu fal na statki morskie w celu udoskonalenia konstrukcji jednostek nowo budowanych.
3. Zbudowanie systemów prognozowania wystąpienia fal fenomenalnych z zastosowaniem metod statystycznych oraz deterministycznych modeli w celu ich stosowania dla bezpieczeństwa życia ludzkiego.
4. Korzystając z *Lloyds Lists*, przebadano 650 wypadków na statkach, które w czasie eksploatacji napotkały złą pogodę.
5. Zaproponowano rozpowszechnienie wyników projektu meteorologicznego wśród marynarzy oraz budowniczych statków morskich [28].

Analiza badań wykazała wiele zjawisk fizycznych, jakie przeprowadzono eksperymentalnie w basenach doświadczalnych. Zastosowano metody symulacji w celu rozpoznania modelu fal fenomenalnych.

STREP PROJECT TST5-2006. Drugi program badawczy w Unii Europejskiej dotyczył wpływu gigantycznych fal na statki morskie. Celem programu były taktyczne opracowania podejmowania decyzji w zakresie manewrowania statkami na fali, szczególnie w warunkach sztormowych.

Projekt składał się z sześciu części i uczestniczyły w nim grupy robocze z całego świata. Główne tematy projektu były następujące:

- warunki prowadzące do utraty stateczności w przypadku niespodziewanego kołysania przy dużych kątach przechyłu;
- analiza i modelowanie powstawania wysokich fal;
- wywracanie kadłuba różnych statków na wysokich falach;
- siła działania dużych fal na kadłuby różnych statków;
- numeryczna ocena odpowiedzi kadłubów na bardzo wysokie falowanie;
- wspomaganie decyzji kapitana w procesie manewrowania na wzburzonym morzu.

Project MULTIWAVE (ERC). Dotyczył nieliniowości w propagacji i turbulencji dużych zjawisk wodnych, www.ercmultiwave.eu./project.

Projekt ELLIOTTWAVE (2013). Zajmował się problemem liniowości falowania morza. Stwierdzono, że fale fenomenalne są nieliniowe, www.elliottwave.com> Home>Stocks.

Projekt EXTREME SEAS. Badania dotyczyły prawdopodobieństwa pojawiania się fal fenomenalnych oraz ich wpływu na statki morskie, a także wykorzystania informacji do budowy statków odpornych na działanie fal, www.mar.ist.utl.pt. (extremeseas)2012.

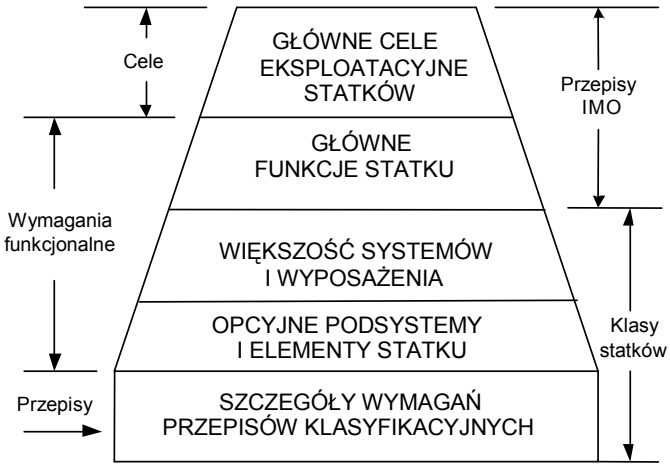
5. PROJEKTOWANIE STATKÓW W ŚWIETLE ZAGROŻENIA FALAMI FENOMENALNYMI

Ostatnie badania zjawisk związanych z działalnością fal fenomenalnych zmuszają do uwzględniania w szczegółowych przepisach klasyfikacyjnych odpowiednich zmian, dotyczących wytrzymałości kadłubów statków morskich. Główne zasady kwalifikacji statków zależne są i opierają się na przepisach (rys. 6).

Każdy statek projektowany jest i budowany według określonych przepisów klasyfikacyjnych. Obecnie obowiązujące kryteria dotyczące budowy statku zakładają, że statek powinien wytrzymać uderzenie fali znaczącej o wysokości $H_S = 11$ m. Z tego wynika, że w ciągu (średnio) 25-letniej eksploatacji, statek powinien wytrzymać uderzenia fal o wysokości 22 m ($H_f = 2 \cdot H_S$).

Z obserwacji prowadzonych przez załogi statków i obsady platform wiertniczych wynika, że coraz częściej falowanie przekracza wysokość 20,0 m.

Statystyki podają, że tylko w roku 2006 w wyniku działania złej pogody na morzu zginęło na statkach handlowych 2600 osób [21].



Rys. 6. Główne zasady klasyfikacji statków [24]

Fig. 6. *Global Base Standard and Lass Rules [24]*

Jak wcześniej wspomniano, obecnie obowiązujące przepisy klasyfikacyjne, odnośnie do budowy statków przewidują, że statek powinien wytrzymać uderzenia fali wchodzącej na pokład o wysokości $H_S = 11$ m.

Bezpieczna wysokość takiej fali obliczana jest zależnością:

$$H = K\,(L)^{0,5}\ [\mathrm{m}] \tag{7}$$

gdzie:

H – bezpieczna wysokość fali [m],
L – długość statku [m],
K – współczynnik.

Rekomendacje Towarzystwa Klasyfikacyjnego IACS wskazują kryterium wysokości fali znaczącej $H_S = 16$ m [17].

Według badań prawdopodobieństwo pojawienia się maksymalnej wysokości fali jako co 100. wynosi P_1 ($H = 1{,}67\ H_S$), dla co 1000. fali zaś – P_2 ($H = 1{,}83\ H_S$).

Jeżeli $H_S = 12$ m, to według P_2 $H_f = 21{,}96$ m (22,0 m). Dla zwiększonego kryterium IACS $H = 16 \cdot 1{,}67 = 26{,}7$ m. Podobnie, gdy $H_f = 2 \cdot H_S$, to wysokość fali $H = 32$ m.

WNIOSKI

1. Administracje i urzędy hydrograficzne państw morskich powinny prowadzić obserwacje hydrometeorologiczne na podległych im obszarach morskich pod kątem powstawania fal fenomenalnych.
2. Należy wykorzystać do tego celu wszystkie dostępne środki: satelity, zwiad lotniczy, platformy wiertnicze, odpowiednio przystosowane pławy i okręty. Zaangażowanie tak dużych sił ułatwi prognozowanie powstawania fal fenomenalnych.

3. Trzeba prowadzić dalsze badania teoretyczne poprzez tworzenie modeli powstawania i pojawiania się fal fenomenalnych w określonych warunkach lokalnych.
4. Lokalne ośrodki hydrometeorologiczne powinny przekazywać dane, uzyskane z prowadzonych obserwacji, a dotyczące zjawisk fal fenomenalnych, do światowego centrum meteorologicznego WMO, jako centralnego banku danych – są do tego standardowo zobowiązane.
5. Zwiększyć jakość i częstotliwość przekazywania prognoz hydrometeorologicznych w rejonach, w których pojawiają się fale fenomenalne.
6. Informacje o powstawaniu fal fenomenalnych (prognozy) włączyć do ostrzeżeń nawigacyjnych.
7. Wprowadzić informacje o zjawiskach fal fenomenalnych do archiwalnych informacji nawigacyjnych, jak Locje (*Sailing Direction*), Oceaniczne drogi świata (*Ocean Passages*), itp.
8. Wprowadzić do programu nauczania w uczelniach morskich informacje o niebezpiecznych zjawiskach fal fenomenalnych w żegludze morskiej.

LITERATURA

1. Birdsey R., *Rogue Waves*, http://nswkc.wordpress.com.
2. Britt R., *Ship devouring waves, once legendary common sight on satellite*, www.usatoday30.usatoday.com.
3. Chen H., *Weather Routeing: A New Approach,* www.ocean-system.com.
4. Cooper C., *What is the Science behind Gods Fist – Research on Rogue Waves,* www.brighthubengingineering.com.
5. *Design and Construction of Oil Tankers,* Report No. 2012 – 020 –1, www.nab-one.gr.ca.
6. *Draupner wave record*, http://cdn.damninteresting.com.
7. Gil – Yong Han, *Ship Design Rules and Regulation: An overview of Major Themes*, www.ifremerfr./web-com/stw2004/culpapers/han.
8. Haver S., *Evidence of Existence of Freak Waves*, www.sfremarsfr./web.com.
9. Jurdziński M., *Fale fenomenalne przy południowo-wschodnim wybrzeżu Afryki,* Technika i Gospodarka Morska, Vol. 1, 1975.
10. Kharif C., Pelinowsky E., *Rogue Waves in the Ocean*, Springer-Verlag, Berlin 2009.
11. Kjeldsen P.A., *Sudden Disaster – in Extreme Waves*, Trondheim Maritime Academy, Norway, 2000, www.peter.kjeldsen@c2i.net.
12. Kobyliński L., *Niektóre zagadnienia bezpieczeństwa morskich operacji górniczych*, Górnictwo i Geoinżynieria, R. 35, 2011, z. 4/1, s. 185–194.
13. Lopatoukhin L. et al., *Freak Waves Generation and their Probability*, 8th International Conference on the Stability of Ship and Ocean Vehicles, Madrid 2003, s. 551–562, www.shipstab.org/files/.../STAB/.../Paper202047.pdf .
14. Mallory J., *Abnormal waves on south – east of South Africa,* International Hydrographic Review, Vol. 51, 1974, s. 89–129.
15. Mori N., *Freak (Rogue) Wave Prediction,* www.oceanwave.jp/index.phpResearch/Freak/ Rogue/5/service/software/product/navigator-bus.

16. Mori N. et al., *On the extreme statistics of long crested deep water waves*, Journal of Geophysical Research, Vol. 112, 2007, No. C9.
17. Mori N., Janssen P.A.E.M., *On kurtosis and occurrence probability of freak waves*, Journal of Physical Oceanography, American Meteorogical Society, Vol. 36, 2006, No. 7, s. 1471–1483.
18. Nikolkina I., Didenkulowa I., *Rogue Waves in 2006 – 2010,* Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 11, 2011, No. 11, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/2913/2011.
19. Rosenthal W., *Results of MAXWAVE project*, www.soest.havaii.edu/Pubservices/2005pdfs/Rosenthal.pdf.
20. Rosenthal W. et al., *Rogue Waves Forecast and Impact on Marine Structure,* GKSS Research Center, Greeshact, Germany, 2003.
21. Smith C.B., *Extreme Waves and Ship Design,* 10th International Symposium, Houston, Texas, USA, 2007, www.shipstructure.org.
22. Temarel P., Hadgon D., *Load Induced on Ship Structure by Rogue Waves,* School of Engineering Science, Southampton.
23. World Meteorological Organization, ftp://ftp.wmo.int.

Źródła internetowe

24. https://en.wikipedia.org/wiki/Rogue_wave.
25. www.core.edu/geology/woods/WAVES.ltms.
26. www.cstars.miami.edu/cstars/ocean-waves/ www.ires.org.uk.
27. www.dnvgl.com/service/software/product/navigator-bus.
28. www.w3g.gkss.de/projects/maxwave.

FREAK WAVES IN MARITIME NAVIGATION

Summary

In this paper the passage process have been described in the areas where freak waves occur. The freak wave's definition has been given and the evidence distributes and generation of the freak waves in different sea areas has shown. Some research programs focused on freak waves propagation occurrence and forecast have been presented. Finally some notes on the new ship design to increase the ship structure in the light of freak wave existence in shipping have been mentioned.

Keywords: *passage planning, wave propagation, freak waves.*