

Waldemar Magda

BUDOWNICTWO MORSKIE

Wybrane zagadnienia
wraz z przykładami obliczeniowymi





Dr hab. inż. Waldemar Magda zajmuje stanowisko profesora nadzwyczajnego na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Prowadzi wykłady z przedmiotów: budownictwo morskie, oceanotechnika, dynamika morza, teoria konstrukcji morskich, a także *Marine and Civil Engineering*, *Submarine Pipelines* oraz *Mooring and Fendering*.

W roku 1987 odbył staż naukowy w Laboratorium Mechaniki Gruntów na Wydziale Budownictwa Uniwersytetu w Aalborgu (Dania). W latach 1989–1994 brał udział w programie badawczym SFB-205 „Küsteningenieurwesen” (Inżynieria Brzegowa) realizowanym na Uniwersytecie w Hanowerze (Niemcy). W latach 1995–1996 odbywał staż naukowy w Instytucie Franziusa (Hanover, Niemcy) prowadząc badania rurociągu podmorskiego w dużym kanale falowym. Uczestniczył (1999–2000) w pracach projektowych nad pierwszym polskim rurociągiem podmorskim łączącym platformę wydobywczą firmy LOTOS Petrobaltic z bazą lądową we Władystawowie. Obecnie współpracuje z zagranicznymi ośrodkami naukowymi, takimi jak: Uniwersytet w Okayamie (Japonia), Duński Uniwersytet Techniczny w Lyngby w dziedzinie oddziaływania podłoża morskiego, falowania i konstrukcji morskich, ze szczególnym uwzględnieniem rurociągów podmorskich.

Dr hab. inż. Waldemar Magda jest autorem kilku monografii, a w tym przede wszystkim pracy pt. „Rurociągi podmorskie. Zasady projektowania” opublikowanej w Wydawnictwie Naukowym PWN (Warszawa, 2018). Poza tym jest także autorem kilkudziesięciu artykułów naukowych opublikowanych w krajowych i zagranicznych czasopismach, takich jak: *Journal of Port, Waterway, Coastal, and Ocean Engineering*, *Ocean Engineering*, *Coastal Engineering*, *Computers and Geotechnics*, a także *Polish Maritime Research* oraz *Inżynieria Morska i Geotechnika*. Wyniki swoich prac badawczych przedstawił m.in. na Międzynarodowych Konferencjach Inżynierii Brzegowej (ICCE) i Międzynarodowych Konferencjach Inżynierii Pełnomorskiej i Arktycznej (ISOPE). Jest członkiem *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, a także Polskiego Komitetu Geotechniki (PKG) oraz Gdańskiego Towarzystwa Naukowego (GTN).

Prezentowana książka dotyczy wybranych zagadnień związanych z inżynierią morską. Na przykładzie trzech typowych budowli morskich (falochronu pionowościennego, falochronu narzutowego oraz rurociągu podmorskiego) przedstawiono metody umożliwiające określenie obciążenia tych budowli, i to zarówno w postaci obciążenia hydrostatycznego, jak i obciążenia hydrodynamicznego powstałego w wyniku oddziaływania falowania morskiego. Podstawowym zadaniem, jakie postawił sobie Autor książki, było przedstawienie Czytelnikowi krok po kroku szczegółowych rozwiązań licznych zadań rachunkowych, w których uwzględniono typowe schematy obciążeń, możliwe do zaistnienia w warunkach rzeczywistej pracy budowli morskiej. Doskonalenie wykonywania ręcznych obliczeń rachunkowych na poziomie akademickim, odpowiadającym późniejszej praktyce projektowej, ma służyć ćwiczeniu umiejętności logicznego myślenia i przedstawiania rzeczywistych zjawisk sfery inżynierii morskiej w sposób jak najbardziej prosty i zrozumiały. Praca własna Czytelnika, polegająca na samodzielnym rozwiązywaniu rozmaitych zagadnień z zakresu inżynierii morskiej, sformułowanych w książce w postaci zadań rachunkowych, może bez wątpienia stanowić cenny element kształtowania wyobraźni, jako nieodzownej cechy nowoczesnego inżyniera-projektanta. Aby ułatwić Czytelnikowi do maksimum osiągnięcie pozytywnych wyników samokształcenia na bazie prezentowanej książki, Autor daje Czytelnikowi możliwość skorzystania z darmowej wersji wykonawczej autorskiego programu komputerowego, przygotowanego specjalnie jako uzupełnienie materiału przedstawionego w książce.

*Pamięci przedwcześnie zmarłego
Prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Sikory
– nieodżałowanie dobrego człowieka i przyjaciela*

Tempus fugit, aeternitas manet

BUDOWNICTWO MORSKIE

Waldemar Magda

BUDOWNICTWO MORSKIE

Wybrane zagadnienia
wraz z przykładami obliczeniowymi

Projekt okładki: Przemysław Spiechowski

Ilustracja na okładce: George Robertson/123RF

Wydawca: Karol Zawadzki

Koordinator ds. redakcji: Adam Kowalski

Redaktor: Maria Kasperska

Produkcja: Mariola Grzywacka

Łamanie: ScanSystem.pl Ewa Selatyńska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Dembicki, PG
dr hab. inż. Marek Szmytkiewicz, prof. IBW PAN

Publikacja dofinansowana przez Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechniki Gdańskiej

Zdjęcie na okładce przedstawia słynny falochron portowy *The Blocks*, nazywany także falochronem zygzakowatym (*Zigzag Pier*) ze względu na wielokrotnie łamaną oś podłużną konstrukcji, zbudowany w drugiej połowie XIX w. w St. Monans u wejścia do *Firth of Forth* – zatoki Morza Północnego w Szkocji; zaprojektowany przez rodzinne przedsiębiorstwo *D&T Stevenson*, najprawdopodobniej osobiście przez Thomasa Stevensona – ojca znanego na całym świecie powieściopisarza Roberta Louisa Stevensona.

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w Internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2020

ISBN: 978-83-01-21020-5

Wydanie I Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288; infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: ????????????

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	1
2. FAŁA PROGRESYWNA REGULARNA	8
2.1. Wprowadzenie	8
2.2. Definicje podstawowych elementów i parametrów fali	9
2.3. Zakresy stosowalności wzorów dla fal regularnych	12
2.4. Fała progresywna sinusoidalna	14
2.4.1. Prędkość propagacji fali	14
2.4.2. Długość i okres fali	14
2.4.3. Rzędna profilu fali	31
2.4.4. Kinematyka ruchu orbitalnego cząstek wody	35
2.4.5. Ciśnienie wody w ruchu falowym	44
2.4.6. Energia fali	53
3. FAŁOWANIE WIATROWE	60
3.1. Wprowadzenie	60
3.2. Fałowanie wiatrowe jako proces stochastyczny stacjonarny	61
3.3. Statystyczne parametry fali wiatrowej	63
3.3.1. Rozkłady prawdopodobieństwa Gaussa i Rayleigha	64
3.3.2. Analiza statystyczna w dziedzinie czasu	80
3.4. Widmowe właściwości fal wiatrowych	87
3.4.1. Analiza widmowa w dziedzinie częstotliwości	87
3.4.2. Funkcja widmowej gęstości energii fałowania	90
3.4.3. Widmo Piersona-Moskowitza	94
3.4.4. Widmo JONSWAP	96
3.5. Prognoza długoterminowa wysokości fali projektowej	103
3.5.1. Okres trwałości budowli, okres powtarzalności sztormu projektowego, wysokość fali projektowej	103
3.5.2. Rozkłady prawdopodobieństwa ekstremalnych wysokości fali	113
4. FAŁOCHRON PIONOWOŚCIENNY	136
4.1. Wprowadzenie	136
4.2. Fała stojąca sinusoidalna – zjawisko odbicia fali regularnej	145
4.2.1. Rzędna profilu fali	147
4.2.2. Wzniesienie poziomu fałowania	150
4.2.3. Położenie swobodnej powierzchni fali przed fałochronem	154
4.2.4. Ciśnienie wody w ruchu falowym	158
4.3. Obciążenie fałochronu pionowościennego fałą stojącą sinusoidalną	160
4.3.1. Obciążenie budowli wysokiej siłą poziomą	161
4.3.2. Obciążenie budowli posadowionej na fundamencie narzutowym	204
4.3.3. Siła wyporu działająca na fałochron	214

4.4.	Obciążenie falochronu pionowościennego falą załamującą się	231
4.4.1.	Transformacja fali w strefie brzegowej	231
4.4.2.	Koncepcja równoważnej fali głębokowodnej	234
4.4.3.	Warunki załamania fali	237
4.4.4.	Załamanie fali przed morską budowlą hydrotechniczną	255
4.4.5.	Uderzenie fali w pionowościenny element konstrukcji falochronu	260
4.4.6.	Metoda Minikina	267
4.4.7.	Metoda Gody	280
4.4.8.	Metoda Gody-Takahashiego	293
4.4.9.	Inne metody obliczeniowe	296
4.5.	Warunki stateczności skrzyni falochronu	303
4.5.1.	Stateczność skrzyni falochronu na przesunięcie i obrót	305
4.5.2.	Nośność podłoża fundamentowego	309
5.	FALOCHRON NARZUTOWY	313
5.1.	Wprowadzenie	313
5.2.	Wyznaczanie ciężaru elementów narzutu ochronnego	319
5.2.1.	Narzut ochronny z bloków skalnych lub kamienia łamanego	319
5.2.2.	Narzut ochronny z betonowych bloków kształtowych	325
5.2.3.	Współczynnik stateczności K_D we wzorze Hudsona	330
5.2.4.	Współczynnik stateczności N_s we wzorze van der Meera	333
5.2.5.	Wpływ zmiany ciężaru właściwego betonu bloku kształtowego	338
5.3.	Podstawowe parametry geometryczne falochronu narzutowego	340
5.3.1.	Załamanie fali	340
5.3.2.	Optymalne nachylenie skarpy	344
5.3.3.	Rzędna korony falochronu – wysokość nabiegania fali na skarpe	347
5.3.4.	Szerokość korony	356
5.3.5.	Grubość warstwy ochronnej	357
5.3.6.	Wielkość narzutu kamiennego w warstwach pośrednich i w rdzeniu	358
6.	RUROCIĄG PODMORSKI	361
6.1.	Wprowadzenie	361
6.2.	Elementy składowe konstrukcji rurociągu podmorskiego	365
6.3.	Układ sił działających na rurociąg podmorski	366
6.3.1.	Ciężar rurociągu podmorskiego	368
6.3.2.	Ciężar nadkładu gruntowego	370
6.3.3.	Wypór hydrostatyczny działający na rurociąg podmorski	371
6.3.4.	Wypór hydrostatyczny działający na nadkład gruntowy	377
6.3.5.	Ciężar efektywny	377
6.3.6.	Warunek równowagi sił pionowych w układzie rurociągu podmorskiego	378
7.	CIEŻAR WŁAŚCIWY WODY MORSKIEJ	398
7.1.	Zasolenie mórz i oceanów	398
7.2.	Gęstość i ciężar właściwy wody morskiej	400
	Bibliografia	402
	Dodatek – tablice współczynnika długości fali λ_h	414

Rozdział 1

WSTĘP

Budownictwo morskie (nazywane także inżynierią morską, morskim budownictwem hydrotechnicznym lub hydrotechniką morską) to – według definicji profesora Bolesława Mazurkiewicza zawartej w jego dziele pt. „Encyklopedia inżynierii morskiej” [99] – *dział inżynierii zajmujący się projektowaniem, wykonawstwem, remontem i konserwacją budowli morskich lokalizowanych na morzu lub na lądzie, lecz w rejonie bezpośredniego kontaktu z morzem (na brzegu i przybrzeżu), albo z innymi akwenami dostępnymi dla żeglugi morskiej, jak np. kanał morski*. W tej samej pracy profesor Bolesław Mazurkiewicz definiuje budowlę morską, nazywaną także morską budowlą hydrotechniczną, jako *budowlę nawodną, nadwodną lub podwodną posadowioną na morzu, albo na lądzie, lecz w rejonie bezpośredniego kontaktu z morzem lub z innymi akwenami dostępnymi dla żeglugi morskiej, która wraz z instalacjami i urządzeniami technicznymi stanowi całość techniczno-użytkową*. Budowle morskie można podzielić na kilka zasadniczych grup [99]:

- budowle portowe,
- budowle przystani morskich,
- budowle ochrony brzegów morskich,
- konstrukcje stałych morskich znaków nawigacyjnych,
- kanały i śluzy morskie,
- budowle związane z komunikacją lądową,
- budowle związane z ujęciami morskich wód powierzchniowych,
- budowle związane ze zrzutem wód do morza,
- budowle służące rekreacji plażowej,
- budowle lądowe bezpośrednio związane z żeglugą morską oraz utrzymaniem ruchu i transportu morskiego,
- obiekty powstałe wskutek wykonywania robót czerpalnych i robót refulacyjnych, albo związane z wykonywaniem tych robót,
- budowle związane z eksploatacją podmorskich złóż minerałów oraz zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego.

Zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 1998 r. [170] (Dział I: Przepisy ogólne, §2) przez morską budowlę hydrotechniczną, zwaną w skrócie budowlą morską, rozumie się *budowlę nawodną lub podwodną, wznoszoną:*

- (a) *na morzu terytorialnym,*
- (b) *na morskich wodach wewnętrznych,*
- (c) *na lądzie, lecz w rejonie bezpośredniego kontaktu z akwenami morskimi, czyli w pasie technicznym nadbrzeżnego pasa wybrzeża morskiego,*
- (d) *w portach i przystaniach morskich,*

która wraz z instalacjami, urządzeniami budowlanymi związanymi z tą budowlą, urządzeniami technicznymi oraz innym celowym wyposażeniem niezbędnym do spełniania przez przeznaczoną jej funkcję stanowi całość techniczno-użytkową.

Według innego również obowiązującego dokumentu prawnego w postaci Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej z 2006 r. [171] (Dział I: Przepisy ogólne, §2) przez budowlę morską rozumie się *budowlę nawodną lub podwodną, która wraz z instalacjami i urządzeniami technicznymi oraz innym wyposażeniem stanowi całość techniczno-użytkową, usytuowaną:*

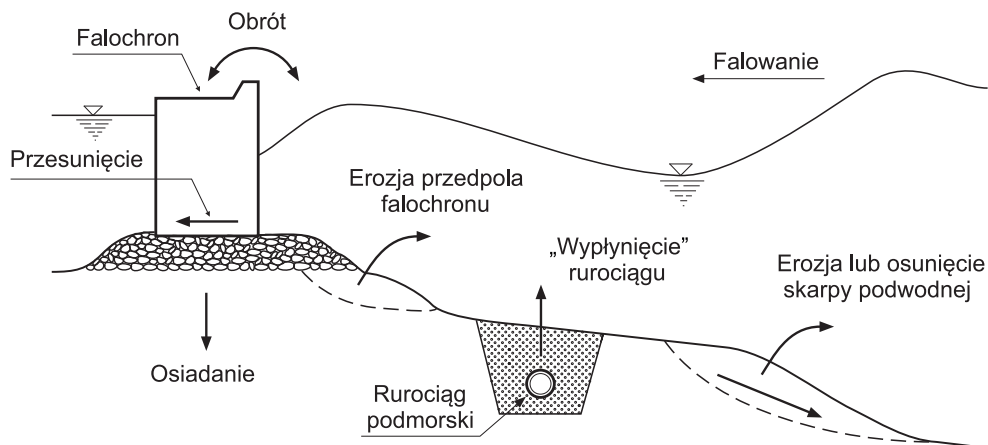
- (a) *na obszarach morskich,*
- (b) *w rejonie bezpośredniego kontaktu z akwenami morskimi:*
 - *w pasie technicznym wybrzeża morskiego określonym zgodnie z ustawą z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej (Dz. U. z 2006 r. nr 206, poz. 1502, z późn. zm.),*
 - *w portach i przystaniach morskich.*

Drugie z przytoczonych rozporządzeń ministerialnych wydaje się być bardziej uogólnione, jeśli chodzi o określenie lokalizacji budowli morskich. Termin „obszary morskie” [171] ma znacznie szersze znaczenie niż tylko „morze terytorialne” i „morskie wody wewnętrzne” [170]. Wydawałoby się, że użycie terminu „obszary morskie” powinno pociągnąć za sobą również uwzględnienie istnienia konstrukcji pełnomorskich (np. rurociągów podmorskich, morskich platform wydobywczych). Niestety w przytoczonej ustawie z 2006 r., podobnie zresztą jak i w ustawie z 1998 r., brak jest jakiegokolwiek wzmianki na temat konstrukcji pełnomorskich.

Ponadto, o ile nazwanie falochronu czy nabrzeża portowego budowlą morską nie budzi żadnych zastrzeżeń, o tyle warto byłoby zastanowić się nad poprawnością pojęcia „budowla” w odniesieniu do budowli inżynierskich zlokalizowanych na pełnym morzu. Chociaż w pracy [99] mowa jest o „budowlach związanych z eksploatacją podmorskich złóż minerałów oraz zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego”, to w tym przypadku użycie określenia „konstrukcje pełnomorskie”, zamiast „budowle morskie” czy też „budowle pełnomorskie” wydaje się być znacznie lepszym rozwiązaniem. Trzeba jednocześnie zauważyć, że ten sam autor w tytule swojej znanej i powszechnie cenionej wcześniejszej pracy [97] użył właśnie terminu „konstrukcje”, a nie „budowle”. Do dzisiaj ta kwestia nazewnictwa nie została ostatecznie rozwiązana i nadal pozostaje dyskusyjna. Autor niniejszej pracy stoi jednak na stanowisku, że nazwanie np. morskiej platformy półzanurzonej budowlą morską należy uznać po prostu za językowe nieporozumienie. Czy samochód można nazwać budowlą? Chyba nie. Na tej samej

zasadzie morska platforma półzanurzana, ale także i rurociąg podmorski, powinny być raczej nazywane konstrukcjami morskimi, a nie budowlami morskimi.

Szeroko rozumiana inżynieria morska od niepamiętnych czasów stanowiła zawsze dynamicznie rozwijającą się gałąź gospodarki szczególnie w krajach mający nieograniczony dostęp do morza. Budowle morskie położone w strefie brzegowej (np. falochrony) oraz konstrukcje pełnomorskie znajdujące się na obszarze pełnomorskim (np. rurociągi podmorskie) są narażone na intensywne oddziaływanie czynników środowiska morskiego, w tym przede wszystkim: falowania, prądów morskich, wiatru, zjawisk lodowych oraz zjawisk sejsmicznych (rys. 1.1). Jednym z głównych zadań projektanta budowli morskiej jest: (a) poprawne uwzględnienie możliwych do jednoczesnego zaistnienia kombinacji oddziaływań wspomnianych czynników na budowlę morską (zebranie obciążeń statycznych i dynamicznych), a także (b) zagwarantowanie spełnienia warunków stateczności budowli poprzez umiejętną analizę oddziaływania środowiska morskiego i budowli morskiej (modelowanie fizyczne i numeryczne z wykorzystaniem istniejących sprawdzonych rozwiązań praktycznych i teoretycznych) z jednoczesnym interaktywnym projektowaniem geometrii budowli oraz doбором właściwych parametrów materiałowych.



Rys. 1.1. Przykłady typowych zagrożeń wynikających z hydrodynamicznego oddziaływania falowania powierzchniowego w strefie brzegowej [82]

Literatura fachowa związana z inżynierią morską, zarówno ta krajowa, jak i zagraniczna, jest dość bogata, chociaż trzeba przyznać, że nie do końca satysfakcjonująca. Za podstawową pracę polskojęzyczną należy uznać legendarne już czterotomowe dzieło profesora Stanisława Hueckela [43–46]. Chociaż od wydania tej ogromnej pracy minęło już wiele lat, to w opinii wielu znawców tematu większość materiału w niej zawartego pozostaje nadal aktualna, szczególnie jeśli chodzi o prezentowane tam rozwiązania teoretyczne. Obok wspomnianej pozycji książkowej, uważanej za przysłowiową „biblię budownictwa morskiego”, należy wspomnieć także o czasopiśmie naukowo-technicznym

pt. „Inżynieria Morska i Geotechnika”¹, dzięki któremu od początku lat osiemdziesiątych XX wieku aż do dnia dzisiejszego Czytelnik zapoznawany jest sukcesywnie z najnowszym stanem wiedzy na temat zagadnień i rozwiązań teoretycznych oraz z aktualnymi trendami występującymi w praktyce inżynierskiej, dotyczącymi m.in. takich dziedzin, jak (wg stanu obecnego): zagadnienia ogólne i ochrona środowiska, inżynieria brzegowa i pełnomorska, geotechnika, budowle morskie i portowe, technika portów oraz kronika i aktualności.

W prezentowanej Czytelnikowi najnowszej książce, dotyczącej wybranych zagadnień budownictwa morskiego, zebrano, przedstawiono i przeanalizowano wiele istotnych informacji pozyskanych z polskiej i zagranicznej literatury fachowej, w tym przede wszystkim z pozycji książkowych i publikacji konferencyjnych oraz artykułów ukazanych w czasopismach traktujących bardziej szczegółowo o poruszanych w książce zagadnieniach. Liczne cytowania występujące w treści książki ułatwią Czytelnikowi dotarcie do odpowiedniej literatury w celu dalszego pogłębienia wiedzy.

Pierwszy z rozdziałów tematycznych książki (**rozdział 2**) poświęcono opisowi podstawowych parametrów progresywnego falowania regularnego w postaci tzw. fali sinusoidalnej, wynikających z teorii liniowej falowania. W następnym rozdziale (**rozdział 3**) przedstawiono sposoby wyznaczania parametrów falowania wiatrowego, wykorzystując w tym celu metody statystyczne oraz metody analizy widmowej falowania. Podano także sposoby określania tzw. fali projektowej, bazując na prognozie długoterminowej falowania morskiego.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono zagadnienia związane z oddziaływaniem hydrostatycznym akwenu wodnego oraz oddziaływaniem hydrodynamicznym falowania morskiego na trzy typowe budowle (konstrukcje) morskie, jakimi są:

- falochron pionowościenny lub falochron mieszany (**rozdział 4**),
- falochron narzutowy (**rozdział 5**),
- rurociąg podmorski (**rozdział 6**).

Ostatni rozdział (**rozdział 7**) poświęcono kwestii precyzyjnego określania bardzo ważnego parametru, jakim jest ciężar właściwy wody morskiej, w zależności od podstawowej cechy środowiska morskiego w postaci zasolenia wody morskiej.

Do pracy dołączono także **Dodatek**, w którym Czytelnik znajdzie niezbędne tablice z wartościami współczynnika wymaganego przy obliczaniu długości fali sinusoidalnej w jednej z metod obliczeniowych prezentowanych w rozdziale 2.

Jak łatwo zauważyć, powyższy wybór budowli (konstrukcji) morskich jest dość wąski i dotyczy zaledwie małego wycinka inżynierii morskiej; falochron pionowościenny

¹ „Inżynieria Morska i Geotechnika” – czasopismo naukowo-techniczne, wydawane od początku 1980 r. jako miesięcznik pt. „Inżynieria Morska”, a od 1982 r. jako dwumiesięcznik, powstałe na bazie działu „Hydrotechnika morska” miesięcznika „Technika i Gospodarka Morska”. Kontynuacją „Inżynierii Morskiej” jest od 1991 r. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, dwumiesięcznik naukowo-techniczny, poszerzony o tematykę geotechniczną i do 2011 r. wydawany jako organ Naczelnej Organizacji Technicznej (NOT) — Komitetu Gospodarki Morskiej oraz Polskiego Komitetu Geotechniki, od numeru 4/2011 do numeru 5/2012 publikowany przy współpracy Politechniki Gdańskiej (PG), a od numeru 6/2012 do dziś jako organ PG oraz NOT — Komitetu Gospodarki Morskiej.

i falochron narzutowy są przedstawicielami grupy morskich budowli portowych, natomiast rurociąg podmorski to przede wszystkim konstrukcja pełnomorska (ale także częściowo położona w strefie brzegowej) związana z eksploatacją podmorskich zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego. Wybrane trzy typowe budowle (konstrukcje) morskie stanowiły bazę dla przedstawienia podstawowych zależności opisujących możliwe schematy obciążenia hydrostatycznego i hydrodynamicznego tych budowli (konstrukcji). Trzeba w tym miejscu wyraźnie podkreślić, że zamiarem Autora nie było przytaczanie istniejących teorii wraz z ich założeniami i niekiedy dość skomplikowanymi wyprowadzeniami ostatecznych rozwiązań, a wyłącznie zaprezentowanie i omówienie podstawowych parametrów i wzorów do ich ewentualnego wykorzystania w praktyce projektowej. Jednak podstawowym zadaniem, jakie postawił sobie Autor książki, było przedstawienie Czytelnikowi krok po kroku szczegółowych rozwiązań wielu istotnych zagadnień sformułowanych dla typowych schematów obciążeń, możliwych do zaistnienia w warunkach rzeczywistych pracy budowli (konstrukcji) morskiej. W książce zawarto aż 40 przykładów obliczeniowych.

Tak szczegółowe przedstawienie rozwiązań licznych przykładów obliczeniowych, ilustrujących praktycznie każde omawiane w książce zagadnienie, wydaje się jak najbardziej celowe i ma, zdaniem Autora, swoje istotne uzasadnienie. Otóż oznaką dzisiejszych czasów jest stopniowy (niektórzy twierdzą nawet, że pogłębiający się w zaskarżającym tempie) zanik podstawowych umiejętności wykonywania ręcznych obliczeń rachunkowych na poziomie akademickim, odpowiadającym późniejszej praktyce projektowej. Na podstawie dużego doświadczenia dydaktycznego zdobytego na wyższej uczelni technicznej Autor książki stoi na stanowisku, że jest to związane przede wszystkim z: (a) brakiem odpowiedniej wiedzy, a raczej z brakiem odpowiedniej literatury, mogącej tę wiedzę w sposób prawidłowy i zadawalający kreować i uzupełniać, a także (b) brakiem podstawowych praktycznych umiejętności wykonywania obliczeń inżynierskich z zastosowaniem różnych funkcji matematycznych, występujących w matematycznych zależnościach wynikających z nawet najprostszych istniejących rozwiązań teoretycznych lub praktycznych. Wydaje się, że szczególnie brak odpowiedniej literatury jest najbardziej dotkliwy, gdyż nie ułatwia ćwiczenia logicznego myślenia i przedstawiania rzeczywistych zjawisk sfery inżynierii morskiej w sposób jak najbardziej prosty i jednocześnie zrozumiały. Ponadto praca własna, polegająca na samodzielnym rozwiązywaniu rozmaitych zagadnień inżynierskich, sformułowanych w książce w postaci przykładów obliczeniowych, może bez wątpienia stanowić cenny element kształtowania wyobraźni (tak przestrzennej, jak i w wymiarze płaskim), jako nieodzownej cechy nowoczesnego inżyniera-projektanta.

Dodatkową motywacją, która nakłoniła Autora do napisania książki, jest znaczna liczba błędów w publikacjach już istniejących i uważanych często za podstawową literaturę fachową z dziedziny budownictwa morskiego. Błędy te dotyczą zarówno opisowej, jak i graficznej interpretacji omawianych zagadnień. Rysunki ilustrujące omawiane zjawiska powinny być przecież równie precyzyjne, jak wzory matematyczne, nawet jeżeli pokazują tylko pewne zależności w sposób jakościowy. Niestety praktycznie niezliczona liczba błędów występuje także w wielu ilustracyjnych przykładach

obliczeniowych, co powoduje znaczne zaniżenie wartości naukowo-dydaktycznych tego rodzaju publikacji.

Aby ułatwić Czytelnikowi do maksimum osiągnięcie pozytywnych wyników samokształcenia na bazie prezentowanej książki, jej Autor pragnie zachęcić Czytelnika do skorzystania z darmowej wersji wykonawczej autorskiego programu komputerowego, napisanego w języku programowania FORTRAN i przygotowanego specjalnie jako uzupełnienie materiału przedstawionego w książce. Wszystkie przykłady obliczeniowe zawarte w rozdziałach od 2 do 6 są sygnowane następującym znakiem graficznym:

Bud-Mor.exe

mającym przypominać zainteresowanemu Czytelnikowi o możliwości pobrania pliku z programem komputerowym ze strony internetowej Wydawnictwa Naukowego PWN (<https://dopobrania.pwn.pl/category/nauki-matematyczno-przyrodnicze/budownictwo>) i jego wykorzystania w celu sprawdzenia wyników własnoręcznych obliczeń wykonanych na bazie wszystkich 40 przykładów obliczeniowych prezentowanych w książce. W celu prawidłowego działania programu należy zainstalować go na komputerze z systemem operacyjnym Microsoft Windows 7 lub 10 i z monitorem pracującym w rozdzielczości 1920 × 1080 pikseli, określanej często jako „Full HD”. Program **Bud-Mor.exe** należy obsługiwać wyłącznie za pomocą klawiatury (bez użycia myszki). Wyniki obliczeń przedstawiane są bezpośrednio na ekranie monitora, a wyniki obliczeń z wszystkich przykładów w danej sesji obliczeniowej zapisywane są dodatkowo w zbiorze **Bud-Mor_wyniki.txt**. Wykonując obliczenia z wykorzystaniem programu komputerowego należy zdawać sobie sprawę z faktu, że uzyskane w ten sposób wyniki mogą nieznacznie różnić się od wyników otrzymanych na drodze obliczeń wyłącznie z użyciem kalkulatora, tak jak to zrobiono we wszystkich przykładach obliczeniowych przedstawionych w treści książki. obliczeń z użyciem programu komputerowego oraz na kalkulatorze, nie mają jednak żadnego istotnego znaczenia z punktu widzenia jakości obliczeń inżynierskich.

W książce nie zamieszczono spisu symboli i oznaczeń stosowanych w tekście. Dla ułatwienia operowania parametrami fizycznymi, występującymi w matematycznych opisach zagadnień oraz w przykładach obliczeniowych, większość wzorów opatrzono legendą z jednoczesną propozycją Autora, co do stosowania jednostek miar. Zdaniem Autora, ze względu na stosunkowo dużą liczbę wzorów prezentowanych w książce, takie rozwiązanie przyniesie Czytelnikowi największe korzyści. Na rynku krajowym i zagranicznym istnieje wiele publikacji w postaci artykułów i książek naukowych, których autorzy często bagatelizują kwestie związane z jednostkami miar, np. ich stosowaniem, poprawną pisownią, zamianą w różnych układach itp. Niestety wynika to często po prostu z niewiedzy oraz braku wystarczającego czasu na stworzenie pożytecznej dla Czytelnika książki, kiedy to czynność zapisywania wzorów odbywa się na zasadzie „skopiuj i wklej” bez jakiegokolwiek refleksji i sprawdzenia poprawności tak samego wzoru jak i stosowanych tam jednostek miar (o ile są one w ogóle przedstawione). Takie „dzieła” są często zupełnie nieprzydatne, szczególnie jeśli idzie o ich

wykorzystanie, czy to w pracy naukowej, czy też w praktycznych zagadnieniach inżyniersko-projektowych. Mając na uwadze bezwzględnie wymaganą poprawność zapisu wzorów matematycznych oraz spójność tych wzorów pod względem stosowanych jednostek miar, Autor niniejszej książki starał się dołożyć wszelkich starań, aby książka ta nie stała się „odfajkowanym dziełem”.

Aby usprawnić praktyczne korzystanie z materiału zawartego w książce, wszystkie wzory opatrzone numeracją zgodną z numeracją rozdziałów. Do wzorów oraz operacji matematycznych występujących w poszczególnych przykładach obliczeniowych przypisano oddzielną numerację według schematu (Px-y-z), gdzie „P” oznacza przykład obliczeniowy, x – numer rozdziału, y – numer przykładu obliczeniowego w danym rozdziale, z – numer wzoru w danym przykładzie obliczeniowym.

Wszelkie uwagi na temat zawartości merytorycznej książki oraz działania programu komputerowego należy kierować pod następujący adres poczty elektronicznej Autora:

waldemar.magda@pg.edu.pl

Rozdział 2

FALA PROGRESYWNA REGULARNA

*Największym wrogiem wiedzy nie jest ignorancja,
tylko złudzenie wiedzy.*

Stephen Hawking

2.1. Wprowadzenie

Budowla (konstrukcja) morska [morska budowla (konstrukcja) hydrotechniczna], eks-ploatowana w warunkach środowiska morskiego, jest w sposób ciągły narażona na działanie takich czynników, jak: falowanie powierzchniowe, prąd morski, wiatr, zjawiska lodowe i aktywność sejsmiczna. Falowanie powierzchniowe uznawane jest często za czynnik podstawowy, mający dominujące znaczenie dla zachowania się budowli (konstrukcji) inżynierskiej na akwenu morskim. Wielkość fal morskich przekłada się bezpośrednio na skalę obciążenia budowli (konstrukcji) morskiej, a tym samym na warunki jej stateczności i bezpiecznej pracy.

Głównym czynnikiem generującym falowanie powierzchniowe na akwenu morskim jest wiatr, a dokładniej naprężenia styczne i normalne, działające na powierzchnię wody ze strony mas powietrza będących w ruchu. Tego rodzaju rzeczywiste falowanie nosi nazwę falowania wiatrowego, losowego (wiatr jest czynnikiem losowym; prędkość chwilowa i kierunek wiatru mają charakter losowy, przyczyniając się do losowości parametrów generowanych fal), chaotycznego lub nieregularnego (zmienność w czasie i przestrzeni takich parametrów fali, jak wysokość, długość, czy okres). Falowanie wiatrowe jest falowaniem złożonym. Na danym obszarze akwenu morskiego obserwuje się ciągłą zmienność w czasie wielu fal o różnych parametrach i poruszających się (propagujących) w różnych kierunkach. Dokładny pełny opis właściwości falowania wiatrowego wymaga zastosowania metod analizy wykorzystujących teorię procesów stochastycznych i rachunek prawdopodobieństwa (problem ten został przedstawiony w rozdziale 3).

W wielu praktycznych sytuacjach skomplikowane w swojej naturze rzeczywiste falowanie wiatrowe, oddziałujące na budowle (konstrukcje) morskie, jest często aproksymowane falowaniem regularnym o parametrach wyznaczonych na podstawie odpowiednich analiz falowania wiatrowego. Wśród kilku istotnych modeli fali regularnej duże znaczenie praktyczne w inżynierii morskiej i brzegowej ma najprostszy model falowania, jakim jest model powierzchniowej progresywnej fali sinusoidalnej (rys. 2.1).

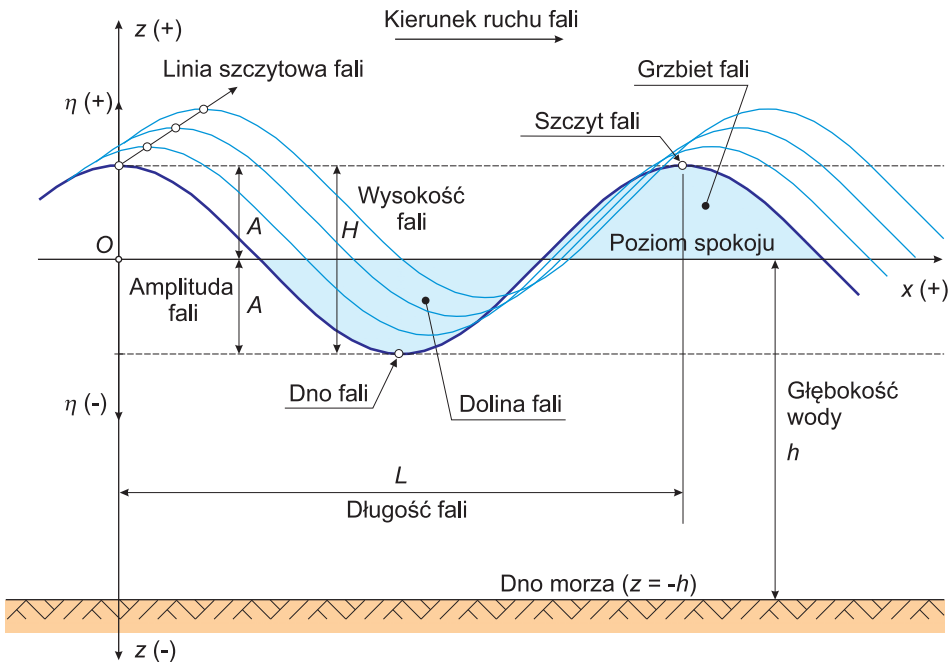


Rys. 2.1. Fala regularna generowana w laboratorium hydraulicznym, tzw. dużym kanale falowym (niem. *Grosser Wellen Kanal* (GWK)), na Uniwersytecie Leibniza w Hanowerze (Niemcy)

2.2. Definicje podstawowych elementów i parametrów fali

Ograniczając się w dalszej treści rozdziału wyłącznie do podstawowej formy falowania wodnego w postaci powierzchniowego falowania regularnego, a w szczególności odnosząc się do przypadku progresywnej fali sinusoidalnej (profil swobodnej powierzchni takiej fali jest opisany krzywą regularną w postaci sinusoidy), można podać kilka następujących określeń i definicji podstawowych elementów i parametrów charakteryzujących ten rodzaj fali. A zatem, będą to przede wszystkim (rys. 2.2):

- Poziom spokoju — poziom, jaki przyjąłaby swobodna powierzchnia morza w przypadku braku falowania na akwenie.
- Poziom falowania — miejsce geometryczne środków orbit cząstek powierzchniowych wody w trakcie ruchu falowego; w przypadku progresywnej fali sinusoidalnej poziom falowania jest identyczny z poziomem spokoju.
- Grzbiet fali — obszar zawarty pomiędzy poziomem spokoju a odcinkiem profilu fali znajdującym się powyżej poziomu spokoju.
- Dolina fali — obszar zawarty pomiędzy poziomem spokoju a odcinkiem profilu fali znajdującym się poniżej poziomu spokoju.



Rys. 2.2. Profil (przekrój poprzeczny) progresywnej fali sinusoidalnej oraz jej podstawowe elementy i parametry

- Szczyt fali — najwyższy punkt grzbietu fali w danym przekroju poprzecznym.
- Dno fali — najniższy punkt doliny fali w danym przekroju poprzecznym.
- Kierunek ruchu fali — kierunek, w którym pozornie porusza się (propaguje, postępuje, przesuwa się, rozprzestrzenia się) fala (profil fali) na powierzchni morza. W opisie matematycznym fali przedstawionej w układzie współrzędnych kierunek jej ruchu zwykle przyjmowany jest jako pokrywający się z kierunkiem dodatniej osi poziomej (Ox).
- Linia szczytowa fali — linia łącząca szczyty tego samego grzbietu fali. W przypadku fal regularnych długość linii szczytowej jest teoretycznie nieskończona.
- Linia denna fali — linia łącząca dna tej samej doliny fali. W przypadku fal regularnych długość linii dennej jest teoretycznie nieskończona.
- Wysokość fali (H) — odległość pomiędzy poziomami szczytu i dna fali; odległość mierzona w pionie pomiędzy szczytem i dnem fali.
- Amplituda fali (A) — odległość szczytu fali lub dna fali od poziomu spokoju.
- Głębokość wody (h) — odległość pomiędzy poziomem dna morskiego a poziomem spokoju.