Transformacja falowego widma częstotliwościowego w strefie brzegowej w okolicy Morskiego Laboratorium Brzegowego w Lubiatowie

Dr inż. Jan Schönhofer Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Falowanie w strefie brzegowej morza ma charakter silnie losowy, a procesy hydrodynamiczne stają się w tym obszarze bardzo nieliniowe. Rozwiązanie równania falowego w rzeczywistej strefie brzegowej nie jest jak dotąd w pełni możliwe. Celem tej pracy jest znalezienie modelu numerycznego, który możliwie wiernie odwzorowywać będzie ewolucję widma falowania w strefie brzegowej morza. Scharakteryzowanie stanu falowania zazwyczaj ogranicza się do wyznaczenia trzech liczb - wysokości, okresu oraz kierunku fali. W warunkach rzeczywistych, na morzu, zazwyczaj mamy do czynienia z losowo pofałdowana powierzchnią wody, na której kształt składają się fale o różnych wysokościach, okresach i kierunkach. Taki stan dodatkowo komplikuje sytuację, ponieważ jego opis wymaga wielu uproszczeń. Dlatego też większość modeli weryfikowana jest wstępnie w laboratoriach falowych, takich jak kanały lub baseny falowe. Można tam z góry narzucić warunki początkowe falowania na generatorze (fale monochromatyczne, widmo JONSWAP, widmo dwupikowe itp.) oraz warunki brzegowe, jak na przykład batymetria basenu falowego. Dopiero tak zweryfikowane algorytmy można poddać próbie w prawdziwej strefie brzegowej.

W poniższej pracy przedstawiono wielokrotnie zweryfikowany [2, 3] model ewolucji falowania. Pokazano również narzędzia analizy spektralnej pomocne w przetwarzaniu danych falowych. Dane z ekspedycji pomiarowej w Lubiatowie w 2006 roku posłużyły weryfikacji użyteczności tych narzędzi w rzeczywistej strefie brzegowej.

Modele falowe dzielą się na dwie podstawowe grupy:

- phase-averaged są to modele oparte na równaniu zachowania działania falowego będącego równaniem zachowania energii, które odwzorowując propagację fali, gubią informacje o jej fazie (położenie szczytów i dolin), dając wyniki stacjonarne amplitudy, kąta podchodzenia oraz okresu fali. Do najbardziej znanych modeli tego rodzaju należy WAM (WAve prediction Model) [6] służący do przewidywania fal powodowanych polem wiatrowym na głębokiej wodzie.
- 2) phase-resolving są to modele oparte na równaniach zachowania masy i pędu, które dają w wyniku informację o amplitudzie, kącie podchodzenia, okresie oraz dokładnym położeniu fali w danej chwili. Modele tego rodzaju dobrze odwzorowują takie procesy jak dyfrakcja czy oddziaływania międzyfalowe. Do najbardziej znanych modeli tego rodzaju należą modele wykorzystujące równanie Hamiltona, równanie Boussinesqa czy równanie *mild slope*.

Przytoczone modele nie nadają się jednak do modelowania strefy brzegowej. Model WAM nie obejmuje procesu załamania fali powodowanego głębokością, a zatem i refrakcji. Nie zawiera również innych procesów zachodzących na płytkiej wodzie oraz tych odpowiedzialnych za zmianę rozkładu spektralnego fali. Jego schemat numeryczny jest efektywny, ale wraz ze wzrostem rozdzielczości poziomej siatki oraz ze zmniejszaniem głębokości kryterium Couranta znacząco go pogarsza.

Jedynym fizycznym mankamentem metod *phase-resolving* jest brak generacji fal wiatrem. Oczywiście nie jest to co prawda niezbędne, ale koszt numeryczny również nie przemawia na ich korzyść. Rozdzielczość przestrzenna takich metod jest rzędu ułamków długości fal, co w przypadku rozważanych obszarów stanowi zbyt dużą liczbę informacji.

Opracowany dwadzieścia lat temu model SWAN [1] wydaje się być najlepszy do zadanego celu. Jako model typu *phase-averaged* i następca modelu WAM, czerpie on z dobrych wzorców poprzednika następujące walory:

- generacja wiatrowa według mechanizmów Milesa [4] i Philipsa [5],
- załamanie fali powodowane zbyt dużą stromością fali tzw. whitecapping,
- tarcie o dno,
- oddziaływania miedzyfalowe na głębokiej wodzie, tzw. quadruplet.

Dodatkowo opracowano model załamania powodowanego głębokością, oraz model odziaływań międzyfalowych na płytkiej wodzie, tzw. *triad*. Wprowadzono zupełnie nowy, niejawny schemat numeryczny, bezwarunkowo stabilny, nie oparty na kryterium Couranta.

Model falowania przybrzeżnego SWAN to jeden z najpopularniejszych algorytmów typu *phase-averaged* na świecie. Przeszedł pozytywną weryfikację w oparciu o pomiary wykonywane bojami falowymi ustawionymi w różnych punktach Morza Północnego u wybrzeży Holandii.

MODEL FALOWY

Model SWAN opiera się na równaniu zachowania działania falowego

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_{x}N + \frac{\partial}{\partial y}c_{y}N + \frac{\partial}{\partial\sigma}c_{\sigma}N + \frac{\partial}{\partial\theta}c_{\theta}N = \frac{S}{\sigma}$$
(1)

gdzie:

 $N(t,x,y,\sigma,\theta) = E(t,x,y,\sigma,\theta)/\sigma -$ gęstość działania falowego,

E – widmowy rozkład gęstości energii uzależniony od częstotliwości fali σ oraz kąta jej podchodzenia θ .

Pierwszy człon po lewej oznacza ewolucję widma w czasie, drugi i trzeci to zmiany w przestrzeni z odpowiednimi prędkościami fazowymi. Wyraz czwarty odpowiada za zmiany wzdłuż osi częstotliwości, natomiast ostatni wyraz oznacza zmianę kierunku falowania spowodowaną refrakcją. Stałe c_{σ} i c_{θ} to współczynniki pełniące rolę prędkości fazowych odpowiednio dla wymiarów częstotliwości i kąta podchodzenia. Prawa strona reprezentuje źródła i upusty energii. W tym przypadku możemy wyróżnić trzy czynniki dodatnie – źródła i trzy ujemne – upusty:



Rys. 1. Ilustracja przykładowego widma częstotliwościowo-kierunkowego będącego zestawem danych wejściowych do modelu SWAN (źródło: SWAN. Scientific and technical documentation. SWAN Cycle III version 41.20)

$$S = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$
(2)

 S_{wind} – źródło w postaci wymuszeń wiatrowych,

 S_{nl3}, S_{nl4} – źródła nieliniowych interakcji międzyfalowych, potrójnych i poczwórnych,

 $S_{ds,w} - {\rm dyssypacja}$ związana z utratą stabilności fal głębokowodnych "whitecapping",

 $S_{ds,b}$ – dyssypacja związana z tarciem o dno,

 $S_{ds,br}^{--}$ – dyssypacja związana z załamaniem fal na płytkiej wodzie.

Przystępując do obliczeń opisanym modelem, należy przygotować prostokątną lub krzywoliniową siatkę węzłów w płaszczyźnie 0XY, w których model bedzie wyznaczał wartości parametrów fali. Z siatką związana jest mapa batymetryczna, która określa głębokość w każdym węźle siatki. Do tego należy na brzegu siatki od strony otwartego morza (lub generatora dla basenu falowego) zdefiniować falowanie. Można to zrobić za pomocą trzech podstawowych parametrów fali (wysokość, okres i kierunek). Wówczas algorytm utworzy na ich podstawie dwuwymiarowe widmo falowania na płaszczyźnie częstotliwościowo-kierunkowej. Przykład takiego widma przedstawiono na rys. 1. Do wyboru są trzy modele częstotliwościowego widma falowania: widmo JONSWAP, widmo Piersona-Moskowitza, rozkład Gaussa oraz dwa modele określające widmo kierunkowe falowania: cosinus do naturalnej potęgi lub rozkład Gaussa. Można również zamiast trzech parametrów falowania podać plik z przygotowanym dwuwymiarowym widmem falowym odpowiadającym zmierzonemu falowaniu.

Dla takich warunków brzegowo-początkowych oraz dla zestawu parametrów określających procesy odpowiedzialne za źródła i dyssypację, a także dla parametrów numerycznych model odwzorowuje propagację zadanego widma falowego na całą siatkę. W wyniku uzyskuje widmo częstotliwościowo-kierunkowe dla każdego węzła siatki na płaszczyźnie 0XY. Dla lepszego zobrazowania wyników model w każdym węźle siatki oblicza z otrzymanych widm również trzy podstawowe parametry – wysokość fali znacznej, częstotliwość piku energii (okres piku) oraz kierunek piku energii falowania. Jednak można również obejrzeć szczegółowe widmo w każdym punkcie obszaru.

Metody numeryczne użyte do rozwiązania równania zachowania działania falowego mają istotne znaczenie i są również częścią modelu. Są one dopasowane do tego równania oraz do siatki krzywoliniowej, na jakiej modele są osadzane. Subtelność i prostota użytych metod powoduje, że model jest mało kosztowny numerycznie, a zatem wygodny w użyciu.

Wspomniana wygoda, szybkość i stosunkowo duża dokładność wyników (mniejsza niż w przypadku modeli *phase-resolving*) zagwarantowała dużą popularność modelowi SWAN.

ANALIZA SPEKTRALNA

Spektralna analiza falowania opiera się na założeniu, zaczerpniętym z liniowej teorii falowej, że fala jest sinusoidą. Przy takim założeniu dowolny szereg czasowy pomiaru swobodnej powierzchni wody można przedstawić jako sumę funkcji trygonometrycznych (sinus i cosinus) o różnych częstotliwościach przy pomocy dyskretnej transformaty Fouriera. Najogólniejsza postać tej transformaty:

$$A_{k} = \sum_{n=0}^{N-1} a_{n} \omega_{N}^{-kn}, \quad 0 \le k \le N-1$$
(3)

$$\omega_N = e^{i\frac{2\pi}{N}} \tag{4}$$

jest sumą eksponentów w ciele liczb zespolonych. Jednak przy pomocy wzoru Eulera:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \tag{5}$$

można łatwo przejść na funkcje trygonometryczne, a z podstawowych przekształceń wynika, że w kontekście falowania część urojona zeruje się, choć współczynniki dotyczące części urojonej są równie istotne jak te rzeczywiste.

Relacja (3) pokazuje jak z szeregu czasowego a_n uzyskać współczynniki transformaty Fouriera A_k . Współczynniki A_k są liczbami zespolonymi, czyli składają się z części rzeczywistej i urojonej. Aby z powrotem uzyskać szereg czasowy, należy skorzystać z odwrotnej transformaty Fouriera:

$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} A_k \omega_N^{kn}, \quad 0 \le n \le N-1$$
(6)

korzystając z (5):

$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} A_k \left(\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + i\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right), 0 \le n \le N-1 \quad (7)$$

Współczynniki A_k są zespolone, dlatego można je zapisać w postaci:

$$A_k = B_k + iC_k \tag{8}$$

gdzie współczynniki B_k i C_k są liczbami rzeczywistymi. Podstawiając (8) do (7), otrzymujemy:

$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} (B_k + iC_k) \left(\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + i\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right), 0 \le n \le N - 1$$
(9)

Po przekształceniach:

$$a_{n} = \sum_{k=0}^{N-1} \left(B_{k} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - C_{k} \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right) + i \sum_{k=0}^{N-1} \left(C_{k} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + B_{k} \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right)$$
(10)

Widać, że część rzeczywista oryginalnej próbki a_n składa się z cosinusów, przed którymi stoją współczynniki będące częściami rzeczywistymi transformaty oraz sinusów, przed którymi stoją współczynniki będące ujemnymi częściami urojonymi transformaty.

Co w takim razie dzieje się z częścią urojoną oryginalnej próbki czyli drugą sumą wyniku (10)? Okazuje się, że gdy do transformaty podano sygnał rzeczywisty $(a_1, a_2, a_3, ...)$, to część urojona zeruje się, dając w wyniku również sygnał rzeczywisty. W praktyce numerycznej sygnał ten będzie miał wartość niezerową, ale o znikomym znaczeniu, nieistotnym w stosunku do sygnału rzeczywistego, stąd:

$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} \left(B_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - C_k \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right)$$
(11)

Współczynnik C_k można zastąpić współczynnikiem $-C_k$; i wówczas (11) staje się transformatą Fouriera dla liczb rzeczywistych. Dla:

$$D_{k} = \sqrt{B_{k}^{2} + (-C_{k})^{2}}$$
(12)

można pokazać, że:

$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} D_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N} + \gamma\right)$$
(13)

gdzie:

$$\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{tg}\left(\frac{-C_k}{B_k}\right) = \operatorname{arc} \operatorname{tg}\left(\frac{C_k}{B_k}\right)$$
 (14)

Dla szeregu (13) amplituda D_k oznacza wagę, jaką ma falowanie o częstości $\omega_k = 2\pi k/N$ w całym sygnale falowania.

Przystępując do analizy pomiarów falowania, można mieć do czynienia z urządzeniami mierzącymi tylko pionowe wychylenie zwierciadła wody w danym punkcie. Do takich urządzeń należą zaprojektowane, zbudowane i stosowane od wielu lat w Instytucie Budownictwa Wodnego PAN strunowe sondy falowe. Podobne pomiary można uzyskać za pomocą boi falowych mierzących tylko składową pionową. Drugą grupą urządzeń są kierunkowe boje falowe, które oprócz pionowych wychyleń mierzą również wychylenia poziome w kierunku północnym i w kierunku zachodnim (trzy szeregi czasowe w tej samej dziedzinie czasu).

O ile pionowe wychylenie zarówno z sond strunowych, jak i z kierunkowej boi falowej, analizuje się stosunkowo łatwo transformatą Fouriera, o tyle do analizy kierunkowej należy zastosować już bardziej skomplikowane krzyżowe periodogramy (ang. *cross-periodogram*). Periodogramem nazwano tu wynik transformaty Fouriera.

Z kierunkowej boi falowej można otrzymać ciągi trzech zmiennych w czasie h_i , n_i , w_i , to jest odpowiednio: wychylenie pionowe, wychylenie w kierunku północnym i wychylenie w kierunku zachodnim, a zatem i trzy periodogramy:

$$H_{k} = \sum_{j=0}^{N-1} h_{j} e^{2\pi i k j / N}, 0 \le k \le N - 1$$
(15)

$$N_{k} = \sum_{j=0}^{N-1} n_{j} e^{2\pi i k j / N}, 0 \le k \le N - 1$$
(16)

$$W_{k} = \sum_{j=0}^{N-1} w_{j} e^{2\pi i k j / N}, \ 0 \le k \le N - 1$$
(17)

gdzie każdy z periodogramów H_k , N_k , W_k jest liczbą zespoloną. Wówczas można uzyskać dziewięć periodogramów krzyżowych według następującego schematu:

$$P_{XY} = \bar{X} \cdot Y = C_{XY} + iQ_{XY}, X, Y \in \{H, N, W\}$$
(18)

gdzie pozioma kreska nad wielkością oznacza jej sprzężenie zespolone. Wartości C oznaczane są jako co-spektrum, a Q jako quad-spektrum. Można pokazać, że:

$$C_{XY} = C_{YX} \tag{19}$$

$$Q_{XY} = -Q_{YX} \tag{20}$$

$$Q_{XX} = 0 \tag{21}$$

Do dalszych analiz przydatne są tylko następujące elementy: $C_{HH}, C_{NN}, C_{WW}, C_{NW}, Q_{HN}, Q_{HW}$ z których można otrzymać:

- częstotliwościowe widmo falowe:

$$S(f_k) = \frac{C_{HH}(f_k)}{\Delta f}$$
(22)

- kierunek falowania (skąd faluje):

$$\Theta(f_k) = \pi - \operatorname{arc} \operatorname{tg}\left(\frac{b_1(f_k)}{a_1(f_k)}\right)$$
(23)

rozmycie kierunkowe falowania:

$$\sigma(f_k) = \sqrt{2(1 - m_1(f_k))}$$
(24)

gdzie:

$$a_{1}(f_{k}) = \frac{Q_{HN}}{\sqrt{C_{HH}(C_{NN} + C_{WW})}}$$
(25)

$$b_1(f_k) = \frac{Q_{HW}}{\sqrt{C_{HH}(C_{NN} + C_{WW})}}$$
(26)

$$m_{\rm I}(f_k) = \sqrt{a_{\rm I}(f_k)^2 + b_{\rm I}(f_k)^2}$$
(27)

Z powyższych wielkości można następnie obliczyć:

ł

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \tag{28}$$

$$m_0 = \sum_{k=0}^{N-1} S(f_k) \Delta f = \sum_{k=0}^{N-1} C_{HH}(f_k)$$
(29)

$$T_p = \frac{1}{f_p} \tag{30}$$

$$S(f_p) = \max(S(f_k)) \tag{31}$$

$$\Theta_p = \Theta(f_p) \tag{32}$$

$$\sigma_p = \sigma(f_p) \tag{33}$$

Ostatnia wartość σ_p oznacza szerokość piku widma na osi kierunkowej. W przypadku modelu Gaussa widma kierunkowego jest to odchylenie standardowe, natomiast w przypadku dużo popularniejszego modelu cosinusa do potęgi należy wyznaczyć potęgę:

$$n = \frac{2}{\sigma_p^2} - 1 \tag{34}$$

i zaokrąglić do liczby naturalnej.

Wyniki powyższej analizy można zadać jako warunek początkowy do modelu SWAN jako:

- a) cztery liczby H_s, T_p, Θ_p, n (wysokość fali znacznej, okres piku, kierunek piku, potęga cosinusa) oraz określić jakie modele ma użyć algorytm do stworzenia widma częstotliwościowo-kierunkowego (na przykład JONSWAP i cosinus do potęgi) – wówczas algorytm sam wygeneruje macierz widma falowego,
- b) plik z macierzą widma falowego, który zostanie stworzony w oparciu o modele widma (na przykład JONSWAP i kosinus do potęgi) – to samo co w punkcie a), ale w postaci macierzy,
- c) plik z macierzą widma falowego, w której na osi częstotliwościowej będzie rzeczywiste widmo S(f_k), natomiast wzdłuż osi kierunkowej będzie ono rozmyte na przykład cosinusem do potęgi (ten wariant był stosowany do obliczeń w strefie brzegowej),
- d) plik z macierzą widma falowego, w której na osi częstotliwościowej będzie rzeczywiste widmo $S(f_k)$, natomiast wzdłuż osi kierunkowej będzie podane rzeczywiste widmo kierunkowe, ponieważ znając $\Theta(f_k)$ oraz $S(f_k)$, można utworzyć $S(\Theta_k)$ (autor nie sprawdził tego wariantu).

Natomiast wynikiem obliczeń modelu może być zarówno macierz widma falowego w danym punkcie lub już obliczone parametry falowania (H_s, T_p, Θ_p) w tym punkcie.

Istotnym elementem przygotowania danych do modelu SWAN jest podział na osi częstotliwości. Bezpośrednio z transformaty Fouriera otrzymuje się rozkład ze stałym krokiem Δf . Z pewnych względów podział na osi częstotliwości w modelu SWAN jest geometryczny, taki że:

$$\frac{\Delta f_{k+1}}{\Delta f_k} = \text{const.}$$
(35)

To powoduje, że należy przeliczyć funkcję gęstości widmowej z jednej dziedziny na drugą. Jest to operacja zaliczana do trywialnych, ale należy jej poświęcić chwilę, bo zwykła interpolacja liniowa może dawać mało precyzyjne wyniki. Należy pamiętać, że zarówno nowa gęstość widmowa musi możliwie dobrze pokrywać się ze starą, jak i całka po *df* nowej i starej gęstości musi dawać zbliżone wartości, ponieważ całka ta jest podstawą do wyznaczenia statystyki H_s .

EKSPEDYCJA POMIAROWA LUBIATOWO 2006

Jesienią 2006 roku w Morskim Laboratorium Brzegowym (MLB) w Lubiatowie odbyła się ekspedycja pomiarowa, podczas której w okresie około półtora miesiąca jednocześnie mierzone było falowanie w pięciu punktach strefy brzegowej. Na granicy obszaru od strony otwartego morza, 1 800 m od brzegu, na głębokości około 15 m zacumowana była kierunkowa boja falowa. Ponadto w jednym profilu zainstalowano trzy strunowe sondy falowe mierzące pionowe wychylenie zwierciadła wody w odległości około 195 m (dalba 2), 105 m (dalba 1) i 25 m (dalba 01) od brzegu na głębokościach odpowiednio 4 m, 2 m i 0,5 m. Piąta sonda posadowiona była na głębokości 0,5 m w profilu oddalonym o 200 m wzdłuż brzegu od profilu pozostałych sond. W okresie pomiarowym udało się wykonać dwa sondaże tachymetryczno-batymetryczne na początku (19.09.2006) i na końcu okresu (28.11.2006). Poza tym mierzono wówczas również prądy morskie, poziom wody oraz podstawowe parametry meteorologiczne. Schemat rozmieszczenia aparatury pomiarowej przedstawiono na rys. 2.

Do analizy przyjęto szeregi czasowe z boi falowej oraz z sond D2 i D1. Boja falowa znajdowała się na tyle daleko od brzegu i na tak dużej głębokości, że pomimo tego, że nie była ona umieszczona dokładnie na profilu pozostałych sond, to z dużą dokładnością można założyć, że falowanie mierzone przez boję było takie samo jak falowanie na profilu sond falowych. Urządzenie mierzyło wychylenia w trzech kierunkach z częstotliwością 1,28 Hz. Pomiary były dzielone na 20 minutowe szeregi czasowe (1535 wektorów po trzy wychylenia). W każdej połowie godziny zapisywany był 20 minutowy plik wychyleń, a przez kolejne 10 minut dane były przetwarzane i wysyłane drogą radiową do komputera w laboratorium.

Sondy D2 i D1 na dalbach posadowionych w dolinach miedzy brzegiem, pierwszą i drugą rewą mierzyły tylko wysokość falowania z częstotliwością 10 Hz, a ich pomiary zapisywane w dwudziestominutowe pliki przesyłane były na bieżąco do komputera (12 000 elementów z każdej z sond).

Dane z sond D01 i D02 na konstrukcjach posadowionych na bardzo płytkiej wodzie odrzucono, ponieważ podczas silnego falowania sondy te były często zasypywane przez piasek i ulegały awariom. Poza tym należy pamiętać, że na tak płytkiej wodzie



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia aparatury pomiarowej oraz pomierzone profile tachymetryczno-batymetryczne podczas ekspedycji pomiarowej Lubiatowo 2006

profil batymetryczny zmienia się bardzo dynamicznie i nie jest do tego potrzebny silny sztorm. To powoduje, że w przypadku tych sond bardzo trudno określić rzeczywistą głębokość.

Należy tu wspomnieć o najsłabszym ogniwie pomiarów prowadzonych w strefie brzegowej, mianowicie o batymetrii. Jest ona najtrudniejsza do wykonania, bo wymaga przepłynięcia małą łodzią w warunkach spokoju (falowanie głębokowodne $H_s < 0,3$ m) po profilu prostopadłym do brzegu. Podczas ekspedycji pomiarowych, które z założenia prowadzone są jesienią – w okresach występowania największych sztormów, bardzo trudno o warunki sprzyjające pomiarom batymetrycznym. Co więcej, nawet jeśli takie pomiary uda się przeprowadzić ,to obrazują one rzeźbę dna w danym momencie, w okresie spokoju. Natomiast już podczas narastania sztormu dno jest bardzo intensywnie przebudowywane. W rezultacie nie sposób określić kształt profilu podczas okresów sztormowych i bezpośrednio po tych okresach.

Co więcej standardowo batymetria w Morskim Laboratorium Brzegowym wykonywana jest na 2,6 km odcinku brzegu w profilach prostopadłych do brzegu oddalonych od siebie o 100 m (27 profili pomiarowych). To powoduje, że znamy głębokości strefy brzegowej w przekrojach co 100 m. Falowanie podchodzące do brzegu ukośnie porusza się po trajektorii przechodzącej w poprzek pomierzonych profili.

Wspomniane trudności w precyzyjnym określeniu batymetrii profilu maleją wraz z oddalaniem się od brzegu i wraz ze wzrostem głębokości. Im głębiej, tym dynamika przebudowy profilu jest mniejsza. Również sąsiednie profile stają się do siebie coraz bardziej podobne. Z tego powodu nie analizowano pomiarów z sond najbliżej brzegu. Dlatego też badania w basenach falowych, gdzie batymetria jest ściśle określona, są tak atrakcyjne z punktu widzenia weryfikacji teorii.

Podczas ekspedycji pomiarowej zebrano ponad 2 000 pełnych dwudziestominutowych szeregów danych z boi falowej, jednak ze względu na losowe awarie, jak na przykład zaniki prądu w laboratorium, udało się zebrać tylko około 1 000 zestawów pełnych dwudziestominutowych szeregów, gdzie falowanie było jednocześnie zarejestrowane przez boję i przez sondy strunowe. Następnie, chcąc symulować falowanie podchodzące do brzegu po zmierzonym profilu, należało ograniczyć zbiór warunków tylko do falowania prostopadłego do brzegu. Założono a priori, że falowanie jest prostopadłe, gdy kierunek na boi był odchylony od prostopadłego co najwyżej o 10° i takie zakwalifikowano do analizy. Tym sposobem wyselekcjonowano 15 dwu-

 Tabl. 1. Wybrane do analizy sytuacje falowe, w których falowanie było

 prostopadłe do brzegu

Data i godzina	$H_{s}[m]$	$T_p[\mathbf{s}]$	$\Phi_p[^\circ]$	Widmo
30.09.2006 17:18	0,15	5,88	345	wielopikowe
14.10.2006 23:18	0,90	4,76	339	JONSWAP ($\gamma = 2,25$)
15.10.2006 00:18	0,97	4,76	332	JONSWAP ($\gamma = 2,25$)
15.10.2006 01:18	0,88	4,76	333	JONSWAP ($\gamma = 3,30$)
15.10.2006 02:18	0,89	4,76	332	JONSWAP ($\gamma = 3,30$)
15.10.2006 03:18	0,85	5,00	331	JONSWAP ($\gamma = 3,30$)
15.10.2006 08:18	0,93	4,76	347	JONSWAP ($\gamma = 3,30$)
15.10.2006 09:18	0,97	4,55	346	dwupikowe
01.11.2006 14:18	2,13	7,69	333	JONSWAP ($\gamma = 1,75$)
01.11.2006 14:48	2,43	7,69	339	JONSWAP ($\gamma = 1,50$)
01.11.2006 15:18	2,81	8,33	343	JONSWAP ($\gamma = 1,50$)
01.11.2006 15:48	2,95	7,69	343	JONSWAP ($\gamma = 1,75$)
01.11.2006 16:48	3,17	9,09	347	JONSWAP ($\gamma = 1,75$)
03.11.2006 23:18	2,05	5,56	346	dwupikowe
04.11.2006 11:48	1,56	6,67	333	dwupikowe

dziestominutowych szeregów. Parametry falowe wybranych sytuacji falowych przedstawiono w tabl. 1. Należy zauważyć, że brzeg w okolicy MLB w Lubiatowie jest odchylony od linii wschód – zachód i za falowanie prostopadłe uznaje się falowanie z kierunku 345° (~NNW).

Analizę widma falowego przeprowadzono według metody opisanej w instrukcji obsługi boi falowej. Otóż każdy z dwudziestominutowych szeregów był dzielony na 6 okresów po 200 sekund (dla boi falowej 256 elementów, dla sondy 2 000 elementów) i z każdego takiego okresu wyznaczane były odpowiednie rozkłady w dziedzinie częstotliwości (dla boi rozkład gęstości energii S, rozkład kata podchodzenia fali i rozkład rozmycia kierunkowego, dla sondy tylko rozkład gestości widmowej). Następnie uzyskane rozkłady z danego urządzenia uśredniało się arytmetycznie, aby uzyskać widmo wynikowe. Ta procedura powodowała, że rozkłady były bardziej "wygładzone", ponieważ rozdzielczość analizy malała z 1/1200 na 1/200 dla boi oraz z 1/12000 na 1/2000 dla sondy, ale także samo uśrednianie wpływało na przejrzystość wyniku. Z analizy cząstkowych danych można było wnioskować, czy falowanie rosło czy malało, bo występujące po sobie kolejno okresy dwustusekundowe, należące do jednego pliku, potrafiły dawać odrobinę inne wyniki, zmienne monotonicznie.

Następnie odbywało się przeliczenie danych z dziedziny stałego kroku częstotliwości Δf na krok geometryczny używany w modelu.

Tak przygotowane dane z boi były "rozrzucane" na osi kierunku według funkcji cosinus do potęgi według otrzymanego odchylenia σ_p , z wartością środkową równą kierunkowi piku falowania Φ_p . Taka macierz widma falowego była podawana do modelu.

W celu weryfikacji, widma z sond falowych były "przycinane" do przedziału częstotliwości z boi falowej i również prezentowane w dziedzinie częstotliwości z krokiem geometrycznym. Natomiast wyniki z modelu były całkowane po wymiarze kierunkowym, aby były łatwo porównywalne z widmami z sond strunowych, które nie określały wymiaru kierunkowego.

WYNIKI SYMULACJI

Wiele parametrów wymaganych do obliczeń modelem SWAN jest domyślnie określonych w modelu. Jeśli użytkownik ich nie zmieni, model liczy na wartościach domyślnych. Są to wartości przeciętne, dobrane przez twórców tak, aby w większości sytuacji dawały możliwie poprawne wyniki, ponieważ użytkownicy zazwyczaj, jeśli nie mają pogłębionej wiedzy na temat jakiegoś procesu, używają wartości domyślnych.

Tak jest również z zakresem oraz rozdzielczością widma na osiach częstotliwościowej i kierunkowej. O ile oś kierunkowa dzieląca "domyślnie" dziedzinę kierunków na 36 kroków po 10° jest w zupełności wystarczająca, o tyle "domyślny" podział częstotliwości z zakresu od 0,05 do 0,6 Hz na 24 kroki jest niewystarczający. W takiej sytuacji dla najbardziej interesującego falowania o okresach od 5 do 10 sekund krok wynosi około 1 s. Aby zwiększyć tę rozdzielczość, autor zastosował podział na 72 kroki częstotliwościowe.

Porównanie wyników modelowych z pomiarami rozpoczęto od porównania widm falowych na granicy głębokiej wody. Większość z piętnastu zadawanych widm można wystarczająco dokładnie przybliżyć widmem JONSWAP z odpowiednim parametrem γ (patrz tabl. 1). Oznacza to, że zadanie macierzy widma falowego daje zbliżone wyniki do falowania zadanego przy pomocy czterech parametrów falowych i parametru określającego kształt widma. Ciekawe jest to, że parametry fali H i T zgadzają się nawet wtedy, gdy widma wyglądają inaczej. Było to widać zarówno w przypadku widm, których nie udało się dopasować (widma dwu i wielopikowe), jak również w przypadku pozostałych sytuacji jeszcze przed uzyskaniem dobrych zgodności dla widm. Widma mają w pewnym sensie znaczenie drugorzędne względem parametrów falowych. Najpierw należy zadbać, aby zgadzały się wielkości H_s i T_p , a następnie spróbować dobrać parametry widma. Przykład widma dwupikowego, które nie pokrywa się z widmem JONSWAP przedstawiono na rys. 3. Na rysunku można zauważyć, że widmo konsekwentnie nie pasuje do widma modelowego, a wysokość fali znacznej różni się



Rys. 3. Przykład sytuacji falowej, w której nie udało się dobrać poprawnego widma jako warunku brzegowego (04.11.2006 11:48, $H_z = 1,56, T_p = 6,67$); linia ciągła (H_{z1}, T_{p1}) – obliczenia w oparciu o parametry fali; linia przerywana (H_{z2}, T_{p2}) – obliczenia w oparciu o macierz widma falowego

mało, zaś okres piku jest obarczony większym błędem. Należy wnioskować, że nie zagłębiając się w szczegóły widma, można dobrze wykalibrować w oparciu o statystyki H_s i T_p model, który konsekwentnie będzie przekształcał zupełnie inne widmo. W celu porównania na rys. 4. przedstawiono sytuację falową dla widma dobrze dopasowanego do modelu.

Z teoretycznego punktu widzenia takie procesy jak *quadruplets* czy *whitecapping* nie powinny mieć znaczenia dla symulacji, bo są to procesy dominujące na głębokiej wodzie. Pozostałe procesy, jak: wymuszenie wiatrowe, dyssypacja związana z tarciem o dno, dyssypacja na płytkiej wodzie oraz nieliniowe interakcje falowe na płytkiej wodzie (triad), powinny mieć istotne znaczenie.

Do modelowania wybrano ekspedycję, dla której autor nie miał wymuszeń wiatrowych. Wybór ten był jednak celowy, bo

uważano, że na tak krótkim odcinku (1,8 km) wiatr nie może mieć istotnego znaczenia w ewolucji falowania. Aby to potwierdzić, przeprowadzono analizę wrażliwości widm wynikowych na wiejący wiatr. Przyjęto dwa warianty, wiatr dobrzegowy o prędkości 15 m/s i taki sam wiatr odbrzegowy. Prędkość specjalnie dobrano bardzo dużą (rzadko występującą w polskich warunkach), aby jednoznacznie potwierdzić małe znaczenie wiatru. Serie symulacji dla obu wariantów zmieniły nieistotnie wykresy widm. Wpływ wiatru uznano za nieistotny.

Analiza wrażliwości modelu na nieliniowe oddziaływania falowe (triad) zakończyła się podobnie. Oba parametry określające to zjawisko były badane w całym dostępnym zakresie niezależnie od siebie i tylko nieznaczne zmiany widm zaobserwowano dla granicznego ustawienia jednego z parametrów. Uznano, że w dostępnym zakresie danych proces ten również nie ma istotnego znaczenia.



Rys. 4. Przykład sytuacji falowej, w której widmo JONSWAP dobrze odwzorowało rzeczywiste warunki falowe (14.10.2006 23:18, $H_s = 0.90$, $T_p = 4.76$); linia ciągła (H_{e1} , T_{p1}) – obliczenia w oparciu o parametry fali; linia przerywana (H_{e2} , T_{p2}) – obliczenia w oparciu o macierz widma falowego



Rys. 5. Porównanie widm częstotliwościowych pomierzonych (linia przerywana) z obliczonymi (linia ciągła) z dnia 30.09.2006 (1. grupa)

Największą wrażliwość wykazał model na parametry dyssypacji związanej z głębokością oraz w drugiej kolejności na parametry związane z tarciem fali o dno. Dlatego parametry odpowiedzialne za te dwa procesy podlegały kalibracji (γ – współczynnik załamania fali oraz C_{JON} – współczynnik tarcia o dno).

Wybrane sytuacje falowe można było podzielić na cztery grupy:

- falowanie w dniu 30.09.2006 (1 sytuacja, rys. 5) niska fala i stosunkowo wysoki okres piku wskazuje na falę rozkołysu, widmo wielopikowe wraz z małymi wartościami pików sugeruje, że jest to sytuacja, gdzie procesy losowe mogły zdominować propagację falową; podczas kalibracji ten przypadek nie odgrywał dużej wagi;
- falowanie w dniu 15.10.2006 (7 sytuacji, rys. 6) 7 dwudziestominutowych sytuacji falowych bardzo do siebie zbliżonych zarówno parametrami falowymi, jak i wyglądem widma; wśród tych 7 sytuacji jest przerwa czasowa wywołana odwróceniem kierunku falowania;
- falowanie w dniu 01.11.2006 (5 sytuacji, rys. 7) 5 dwudziestominutowych sytuacji falowych z jednego sztormu obrazujących narastanie sztormu wraz z najsilniejszą sztormowo sytuacją ze wszystkich rozważanych;
- falowanie w dniach 3 i 4.11.2006 (2 sytuacje, rys. 8) dwie średnio-silne sytuacje zarejestrowane prawdopodobnie podczas odwracania się sztormu.

Pierwsza sytuacja wydała się tak skomplikowana, że na tym etapie uznano ją za zbyt trudną do wykalibrowania.



Rys. 6. Przykładowe porównanie widm częstotliwościowych pomierzonych (linia przerywana) z obliczonymi (linia ciągła) z dnia 15.10.2006 (2. grupa)



Rys. 7. Przykładowe porównanie widm częstotliwościowych pomierzonych (linia przerywana) z obliczonymi (linia ciągła) z dnia 01.11.2006 (3. grupa)



Rys. 8. Przykładowe porównanie widm częstotliwościowych pomierzonych (linia przerywana) z obliczonymi (linia ciągła) z dnia 03.11.2006 (4. grupa)

Podczas kalibracji modelu w oparciu o pozostałe sytuacje zaistniał problem profilu batymetrycznego. Otóż podział na grupy zrobiono celowo, bo każdą z grup osobno można było "dobrze" wykalibrować. Za określenie "dobrze" uznaje się otrzymanie statystyki H, na dalbie D2 i D1 różniących się co najwyżej o 10% od rzeczywistej H. Jednak nie sposób, kierując się tymi kryteriami, dobrać parametry modelu dla wszystkich grup jednocześnie. Podejrzenie przyczyny pada na profil batymetryczny. Oba zmierzone profile są dla odcinka od głębokiej wody do dalby D1 bardzo zbliżone. Dlatego symulacje na obu profilach dają bardzo zbliżone rezultaty. Jednak profil zmierzony dużo wcześniej (17.06.2006, zob. rys. 2) pokazuje jak potencjalnie zmienia się batymetria w tym obszarze. Wyraźnie widać, że pierwsza rewa może się przemieścić w pobliże dalby D1, powodując dwukrotną zmianę głębokości w tym miejscu (z ponad 2 m do 1 m). Nic jednak nie było wiadomo o kształcie profilu pomiędzy 19 września a 28 listopada.

Błędy w wyznaczaniu parametrów falowych mogły wynikać z braku informacji na temat batymetrii w momencie pomiaru falowania. Podczas kalibracji można było zauważyć, że w przypadku sytuacji falowych z dnia 15.10.2006 na dalbie D2 wyniki były przeszacowane przez model, a na dalbie D1 niedoszacowane. W przypadku sytuacji z dnia 01.11.2006 było inaczej, zarówno na D2, jak i na D1, model przeszacowywał. Takie zachowanie modelu można wytłumaczyć przez inną batymetrię w momencie pomiaru.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono weryfikację modelu, który możliwie dobrze poradzi sobie z ewolucją widma falowego nad dnem o zmiennej głębokości. "Na warsztat" wzięto popularny od kilkunastu lat algorytm SWAN, który jest jednym z najbardziej zaawansowanych wśród modeli tego rodzaju. Pozwala on analizować widma kierunkowo-częstotliwościowe. W celu rzetelnego przebadania zagadnienia poczyniono wiele uproszczeń, takich jak to, że wybrano tylko sytuacje falowe, podczas których fala podchodziła prostopadle do brzegu, a także analizując widmo częstotliwościowe, ograniczono się do zakresu pomiaru boi falowej (0,05 ÷ 0,64 Hz). Uproszczenia te mogły mieć wpływ na nieotrzymanie w pełni satysfakcjonujących wyników. Może należało wybrać sytuacje falowe niekoniecznie prostopadłe do brzegu z okresu bezpośrednio po wykonaniu batymetrii we wrześniu (batymetrię w listopadzie zrealizowano dopiero po zdjęciu sond strunowych). Przeprowadzone obliczenia pozwoliły wyciągnąć następujące wnioski.

Zmierzone na głębokiej wodzie widma falowe dużo lepiej można przybliżyć modelowym widmem JONSWAP, niż to wynikałoby z poprzednich badań autora. Wynika to głównie z faktu, że do modelu widmo to podaje się w dużo mniejszej rozdzielczości niż uzyskane z transformaty Fouriera. Zmiana rozdzielczości bardziej upodabnia widma zmierzone do modelowych.

Algorytm SWAN stosunkowo dobrze modeluje falowanie nad zmiennym dnem. Strefa brzegowa zawsze jest dużym wyzwaniem z powodu trudności w pomiarze batymetrii obszaru modelowanego. Szczególnie dotyczy to obszarów małych głębokości. Uzyskane parametry falowania H_s i T_p wyznaczono z błędem w przedziale $10 \div 40\%$.

Dobre, albo przynajmniej satysfakcjonujące, wyniki dla parametrów falowych nie przekładają się na odwzorowanie widm częstotliwościowych. Pod tym względem nie udało się osiągnąć satysfakcjonujących wyników. W przeprowadzonych symulacjach model nie poradził sobie z istotnymi składowymi widma po stronie zarówno bardzo małych, jak i bardzo dużych, częstotliwości fal. W rzeczywistości energia przenoszona przez to falowanie dochodziła do brzegu niemal w niezmienionej postaci. Natomiast model wygaszał je podobnie jak fale ze środka widma.

Po zrealizowaniu powyższej pracy autor ma wrażenie, że czasami nie warto zaglądać zbyt głęboko, symulując niektóre zjawiska, bo można dojść do wniosku, że model przewiduje je dobrze nie dlatego, że jest tak skomplikowany, tylko pomimo tego. Kolejnym krokiem w ramach kontynuacji analiz powinno być powtórzenie obliczeń modelem XBeach. Jest to model nowszy, stworzony przez ten sam zespół na uniwersytecie w Delft, który w równaniu zachowania działania falowego nie ma wymiaru częstotliwościowego ($N(t,x,y,\Phi)$). Operuje tylko na statystykach falowych. Jeśli model XBeach da rezultaty podobnej jakości co SWAN, można uznać, że modelowanie ewolucji widma częstotliwościowego nie jest konieczne do tego rodzaju obliczeń.

LITERATURA

1. Booij, N., Ris R.C. and Holthuijsen L. H.: A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph. Research , 104, C4, 7649-7666, 1999

2. Booij, N., Holthuijsen L.H. and Battjes J. A.: Ocean to near-shore wave modeling with SWAN, 4th International Conference on Coastal Dynamics 2001, Lund, Sweden, 335-344, 2001

3. De Jong, J. C. M.: Verification of the numerical wave model SWAN in the Petten coastal area. TUDelft Repository, 1997.

4. Miles, J. W.: On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, 185–204, 1957.

5. Phillips, O. M.: On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, 417–445, 1957.

6. WAMDI Group: The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr., 18, 1775–1810, 1988.