

Metodyka badań doświadczalnych oddziaływania fal morskich z falochronem pneumatycznym

Dr inż. Maciej Paprota

Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Zakład Mechaniki Falowania i Dynamiki Budowli

Ochrona akwenów portowych przed przenikaniem w ich obszar falowania odbywa się poprzez budowę falochronów. W większości przypadków falochrony projektowane są jako budowle ciężkie, wymagające ogromnych nakładów inwestycyjnych. Zasadne jest zatem poszukiwanie alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych, które pozwolą zmniejszyć koszt budowy, koszty utrzymania oraz bieżących napraw budowli chroniących przed falowaniem. Atrakcyjną alternatywę dla falochronów tradycyjnych stanowią falochrony pneumatyczne (powietrzne). Zasada działania falochronu pneumatycznego opiera się na wytworzeniu pionowej przegrody składającej się z pęcherzyków powietrza, wydobywających się z perforowanego rurociągu posadowionego na dnie morza. Unoszące się pęcherzyki powietrza zaburzają ruch falowy cząsteczek wody, co prowadzi do dysypacji energii fal przechodzących przez przegrodę powietrzną. Do największych zalet falochronu pneumatycznego można zaliczyć prostotę konstrukcji oraz niskie nakłady finansowe w okresie budowy [12]. Istotne jest, że falochron pneumatyczny nie stanowi przeszkody nawigacyjnej dla jednostek pływających. Dodatkową zaletą działania falochronu jest generacja prądów powierzchniowych i przydennych, które mogą poprawiać jakość wód w obszarach przyległych. Przegroda powietrzna jest także

wykorzystywana jako zabezpieczenie przed rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń na powierzchni wody oraz jako ochrona przeciwpożarowa w basenach paliw płynnych [6, 7]. Niechęć do stosowania tego rodzaju rozwiązań w przeszłości wynikała głównie z istotnych wymagań technicznych kompresorów powietrza oraz wysokich nakładów finansowych potrzebnych do wytworzenia podwodnej przegrody powietrznej jako falochronu w trybie ciągłym. Problem stanowi także ograniczona liczba badań naukowych, zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych, poświęconych oddziaływaniu falowania z przegrodami powietrznymi. Dzisiejsze możliwości techniczne i pomiarowe, postęp w badaniach ośrodków dwufazowych i ruchu turbulentnego oraz możliwość stosowania metod numerycznych w opisie skomplikowanych zjawisk hydrodynamiki skłoniły badaczy w ostatniej dekadzie do ponownego zajęcia się tematem falochronów pneumatycznych.

Idea falochronu pneumatycznego sięga początków XX wieku. W roku 1907 amerykański inżynier Philip Brasher opatentował innowacyjną metodę ochrony przed działaniem falowania, polegającą na wytworzeniu pionowej przegrody powietrznej, którą zastosowano do ochrony pirsu firmy Standard Oil w porcie El Segundo, USA [4]. Od tego czasu były prowadzone badania

teoretyczne i eksperymentalne, których celem było wyjaśnienie zasady działania falochronów pneumatycznych oraz identyfikacja mechanizmów odpowiedzialnych za zmniejszenie energii fal przechodzących przez falochron pneumatyczny. Wyniki prac eksperymentalnych wskazywały, że tłumienie falowania jest związane głównie z generacją prądów przypowierzchniowych, które płyną w przeciwnych kierunkach, zawsze w stronę od przegrody [4]. Pomiary laboratoryjne współoddziaływania fal i prądów wytworzonych przez unoszące się pęcherzyki powietrza posłużyły do opracowania teoretycznego modelu transmisji falowania przez falochron pneumatyczny [2]. Model ten był oparty na teorii fal propagujących w obecności prądu [9, 14], przy uwzględnieniu zjawiska załamania fali. Kolejne rozwiązania teoretyczne bazowały na zastosowaniu metod numerycznych, takich jak metoda objętości płynu (ang. *Volume of Fluid* – VOF) [15] i metoda pseudo-spektralna [12]. Należy w tym miejscu podkreślić, że modelowanie oddziaływania falowania z przegrodą powietrzną jest zadaniem trudnym. Wynika to ze złożoności systemu procesów zachodzących w obszarze działania falochronu pneumatycznego. Dlatego też niezmiernie ważnym elementem badań nad falochronami pneumatycznymi są pomiary doświadczalne w laboratorium hydraulicznym wyposażonym w kanał lub basen falowy.

Badania eksperymentalne falochronów pneumatycznych polegają na oszacowaniu współczynnika transmisji i odbicia fal propagujących przez przegrodę powietrzną oraz wyznaczeniu pola prędkości w sąsiedztwie falochronu i określenia jego struktury falowo-prądowej. Zastosowanie nowoczesnych technik pomiarowych opartych na anemometrii obrazowej PIV (*Particle Image Velocimetry*) [1], przy użyciu zestawu składającego się z kamery i lasera, umożliwia dokładne pomiary całych pól prędkości pęcherzyków powietrza tworzących falochron oraz ich zmienności w czasie. Uzupełniające pomiary prędkości przepływu wody w bezpośrednim sąsiedztwie kurtyny powietrznej można wykonać za pomocą prędkościomierza ADV (*Acoustic Doppler Velocimetry*). Do oceny efektywności tłumienia falowania przez falochron pneumatyczny wykorzystuje się pomiary zmian powierzchni swobodnej przed i za falochronem za pomocą zestawu sond oporowych.

FALOCHRON PNEUMATYCZNY

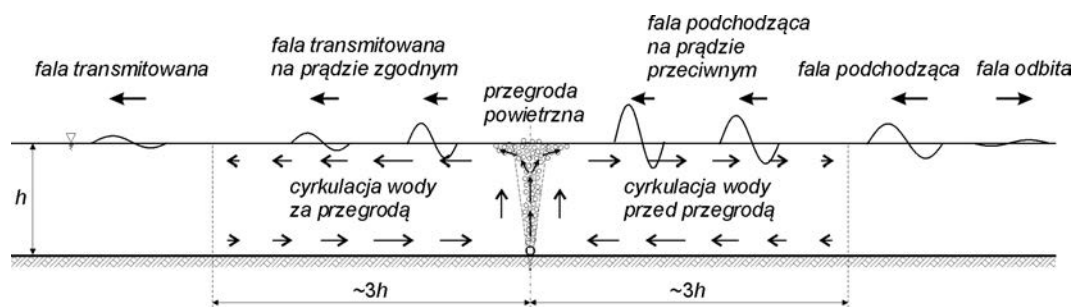
W celu prawidłowego zaprojektowania i instalacji modelu fizycznego falochronu pneumatycznego w kanale falowym oraz odpowiedniego ustawienia urządzeń pomiarowych przydatna jest wiedza o procesach fizycznych zachodzących w obszarze działania falochronu. Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy działającego falochronu pneumatycznego.

Przegroda powietrzna jest wytworzona przez pionowy przepływ powietrza, które wydobywa się z perforowanych rur ułożonych na dnie zbiornika wypełnionego wodą do określonej głębokości (rys. 1). Poruszające się ku górze pęcherzyki powietrza przekazują pęd cząsteczkom wody i generują jej pionowy przepływ. W miarę zbliżania się do powierzchni swobodnej pionowy prąd wyhamowuje, generując jednocześnie lokalne wzniesienie poziomu wody w osi przegrody. Nadmiar masy zostaje odprowadzony w kierunku od przegrody w postaci prądów powierzchniowych i przypowierzchniowych. W efekcie, generowany jest ruch cyrkulacyjny wody po obu stronach przegrody powietrznej na obszarze o poziomym zasięgu równym około trzech głębokości wody od osi przegrody. Wytworzony w ten sposób system hydrodynamiczny o ustalonej strukturze prądowej, rozumiany jako obszar działania falochronu pneumatycznego, stanowi przeszkodę dla propagujących fal wodnych.

Zasada działania falochronu pneumatycznego opiera się na oddziaływaniu falowania i prądów, które są efektem pionowego ruchu pęcherzyków powietrza tworzących przegrodę. Fale poruszające się w kierunku przegrody powietrznej wchodzi w obszar działania przypowierzchniowego prądu skierowanego przeciwnie do kierunku ich propagacji. Długość fali poruszającej się w obecności prądu przeciwnego ulega zmniejszeniu, a wysokość fali rośnie. Wskutek transformacji fali na prądzie przeciwnym, do przegrody powietrznej dochodzą fale krótsze o zwiększonej stromości. Jeżeli stromość graniczna zostanie przekroczona, fale ulegną załamaniu. W obszarze bezpośredniego oddziaływania przegrody, w którym dominuje pionowy ruch mieszaniny wodno-powietrznej, dochodzi do dyssypacji energii falowania. Nieznaczna część energii falowej jest odprowadzana w postaci fali odbitej od przegrody, a pozostała część przechodzi za przegrodę. Fala transmitowana o zmniejszonej wysokości porusza się na prądzie zgodnym z kierunkiem jej propagacji i ulega odwrotnej transformacji do tej, która jest udziałem fali podchodzącej. Wysokość fali transmitowanej maleje, a jej długość rośnie, aż do wartości odpowiadającej fali podchodzącej przed transformacją. Omówione procesy fizyczne, determinujące transformację fali na drodze jej propagacji przez obszar działania falochronu pneumatycznego, stanowią punkt wyjścia do odpowiedniego przygotowania stanowiska pomiarowego do badań doświadczalnych w kanale falowym.

STANOWISKO BADAWCZE

W ramach badań transmisji falowania przez falochron pneumatyczny w kanale falowym Instytutu Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk (IBW PAN) przeprowadzono pomia-



Rys. 1. Transmisja falowania przez falochron pneumatyczny

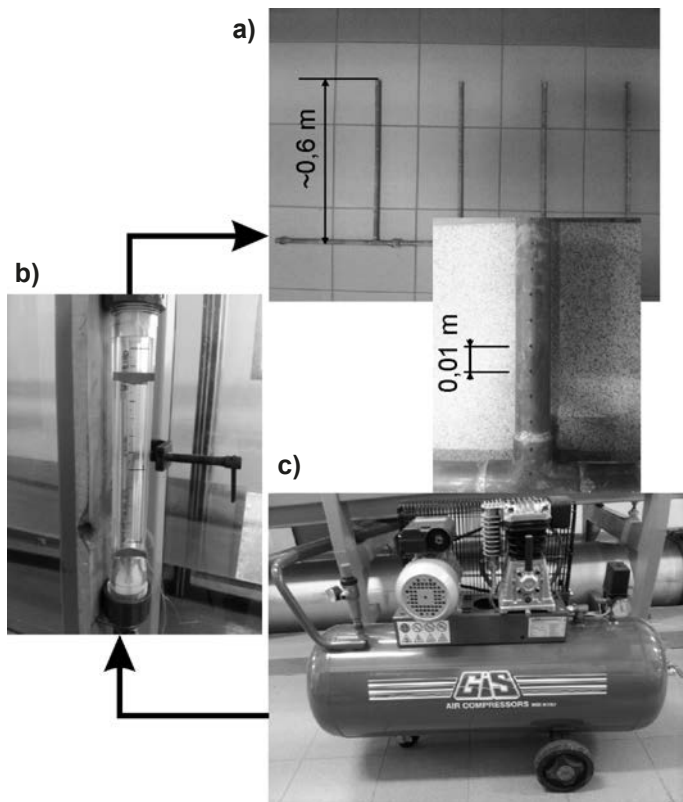
ry struktury falowo-prądowej oraz efektywności przegrody powietrznej w tłumieniu falowania [10, 11, 12]. Na podstawie tych badań będą przedstawione wskazówki do przygotowania stanowiska badawczego i przebiegu badań eksperymentalnych przegrody powietrznej jako przeszkody dla fal morskich.

Długość i szerokość kanału falowego IBW PAN wynoszą odpowiednio 64 m i 0,6 m. Głębokości wody, podczas większości doświadczeń prowadzonych w kanale, zawierają się w przedziale od 0,2 m do 0,8 m. Kanał jest wyposażony w szklane ściany przepuszczające światło, co pozwala na stosowanie technik anemometrii obrazowej [13]. Na jednym z końców kanału falowego zainstalowano wywołувacz falowy typu tłokowego. Płyta wywołувacza jest w kształcie prostokąta o wymiarach

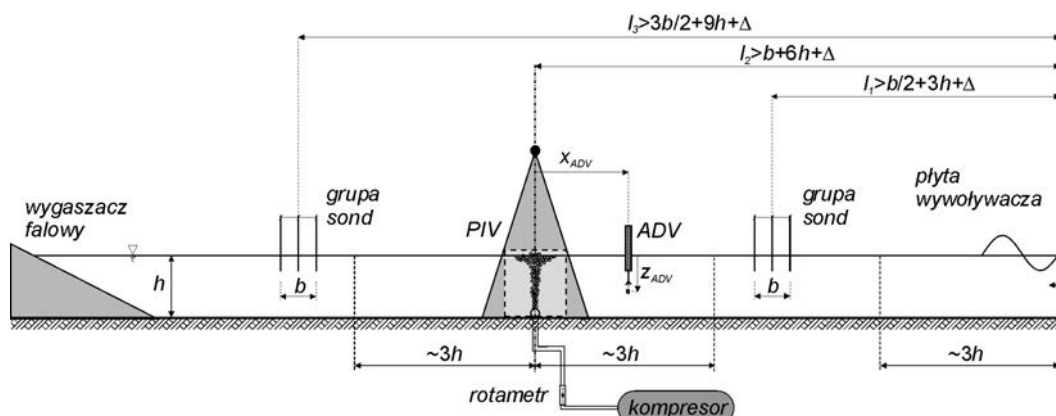
0,6 m × 1,4 m. Maksymalna prędkość i zakres wychylenia płyty wywołувacza wynoszą odpowiednio 0,9 m/s i 0,8 m. Najwyższe generowane fale mogą osiągać 0,5 m przy głębokości wody z przedziału od 0,6 m do 0,8 m. Na drugim końcu kanału falowego ustawiony jest wygaszacz falowy o strukturze porowatej, który zapobiega odbiciu fali od końcowej ściany kanału. Do redukcji fali odbitej od płyty wywołувacza wykorzystuje się system aktywnej absorpcji falowania (AWACS). Do pomiaru zmian wzniesienia powierzchni swobodnej wody służy zestaw sond oporowych rejestrujących dane z częstotliwością próbkowania 100 Hz. Pomiary prędkości wody są realizowane przy użyciu systemu PIV o częstotliwości próbkowania 15 Hz oraz prędkościomierzy ADV rejestrujących z częstotliwością 25 Hz.

Model falochronu pneumatycznego składa się z kompresora powietrza, przepływomierza (rotametr), przewodów doprowadzających powietrze oraz zestawu rur perforowanych o długości zbliżonej do szerokości kanału falowego (rys. 2). Metalowe rury, w których nawierca się otwory o określonej średnicy (0,5 mm) w odpowiednim rozstawie (1 cm), układa się na dnie kanału prostopadle do jego ścian. Następnie, rury podłączane są do kompresora powietrza za pomocą miękkich przewodów gumowych doprowadzających powietrze. Pomiędzy kompresorem i zestawem rur jest instalowany rotametr, który służy do kontroli wydatku dostarczanego powietrza. Po wypełnieniu kanału wodą do określonej głębokości i uruchomieniu kompresora, utworzona zostaje ciągła przegroda powietrzna na całej szerokości kanału. Parametry techniczne kompresora powietrza, potrzebne do wytworzenia przegrody powietrznej działającej jako falochron pneumatyczny dla głębokości wody około 0,3 m i na szerokości 0,6 m, zapewnia urządzenie o mocy 1,5 kW i o maksymalnym wydatku powietrza 15 m³/h. Kompresor ten jest wyposażony w 100 litrowy zbiornik sprężonego powietrza, co pozwala na utrzymanie ciągłości przegrody przez okres potrzebny do przeprowadzenia pomiarów transmisji falowania przez falochron pneumatyczny dla szerokiego zakresu warunków falowych. Na rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego wraz z lokalizacją modelu i urządzeń pomiarowych do badania transmisji falowania przez falochron pneumatyczny.

Model fizyczny falochronu instaluje się na dnie kanału falowego w odpowiedniej odległości (l_2) od płyty wywołувacza falowego (rys. 3). Przy ustalaniu lokalizacji modelu należy brać



Rys. 2. Elementy składowe modelu falochronu pneumatycznego
a) perforowane rury, b) rotametr, c) kompresor powietrza



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego i lokalizacja urządzeń pomiarowych

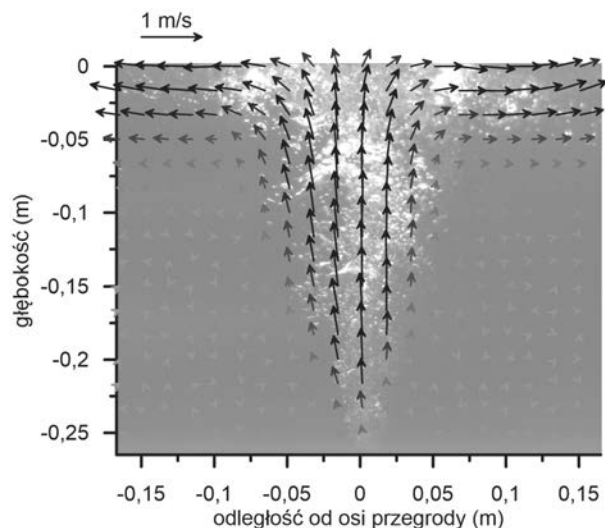
pod uwagę długość obszaru działania falochronu pneumatycznego ($\sim 6h$), rozstaw sond oporowych (b) oraz długość obszaru, w którym dominują uboczne efekty hydrodynamiczne ruchu płyty wywoływacza ($\sim 3h$). Przy wyłączonej opcji aktywnego pochłaniania fali odbitej systemu generacji falowania model falochronu powinien być odsunięty od płyty o dodatkową odległość (Δ), aby fala odbita od falochronu nie wróciła do obszaru pomiarowego wskutek ponownego odbicia od płyty. W celu poprawnego użycia systemu pomiarowego przedstawionego na rys. 3 pierwsza i druga grupa sond oporowych powinna być ustawiona w odległościach odpowiednio l_1 i l_3 (patrz rys. 3). Rozpiętość grupy sond zależy od ich liczby i rozstawu pomiędzy nimi. W typowych badaniach doświadczalnych w laboratorium falowym, do określenia parametrów fali podchodzącej, odbitej i transmitowanej, stosuje się grupy dwóch lub trzech sond rozstawionych co 0,15 m lub 0,20 m. Zestaw urządzeń pomiarowych uzupełnia system PIV (do określenia prędkości pęcherzyków powietrza tworzących przegrodę) oraz sonda ADV (do pomiaru prędkości wody w obszarze przyległym do kurtyny powietrznej).

POMIARY

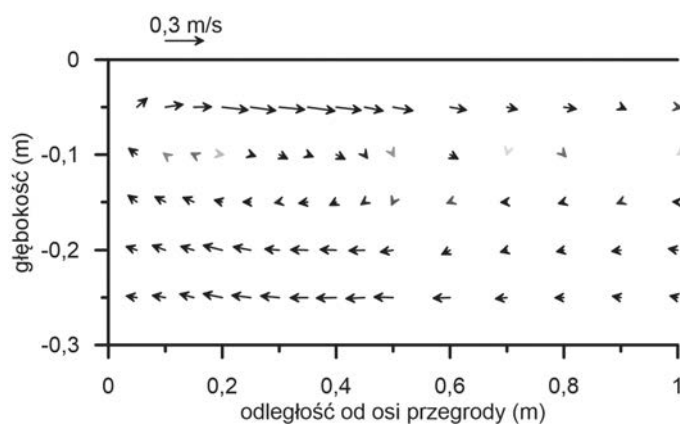
Pomiary laboratoryjne falochronu pneumatycznego oraz fal oddziałujących z przegrodą powietrzną można podzielić na dwa podstawowe etapy. Pierwsza część prac doświadczalnych polega na określeniu parametrów przegrody powietrznej bez falowania. W kanale generuje się przegrodę powietrzną przy różnych ustawieniach kompresora. Na rotametrze ustawia się określony wydatek powietrza (Q), który jest utrzymywany przez cały okres pomiarów. Po uformowaniu i stabilizacji przegrody powietrznej uruchomiony zostaje system PIV w celu dokonania pomiaru prędkości przepływu pęcherzyków powietrza oraz struktury przestrzennej przegrody. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów przegrody powietrznej dla wydatku powietrza $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ i głębokości wody $h = 0,3 \text{ m}$.

Kolejnego pomiaru prędkości dokonuje się za pomocą sondy ADV, która podaje wartości trzech składowych wektora prędkości w punkcie. Pomiar przeprowadza się w określonej liczbie lokalizacji (x_{ADV} , z_{ADV}) w celu uzyskania przestrzennego obrazu przepływu wody w obszarze działania falochronu pneumatycznego (rys. 3). Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów pola prędkości w obszarze sąsiadującym z przegrodą powietrzną dla wydatku powietrza $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ i głębokości wody $h = 0,3 \text{ m}$.

Uzyskany obraz struktury pola prędkości wody, odpowiadający obszarowi działania falochronu pneumatycznego, pozwala na określenie zasięgu działania falochronu i determinuje późniejszą instalację sond falowych w odpowiedniej odległości od przegrody. Pomiary pola prędkości pęcherzyków powietrza i przepływu wody w obszarze działania falochronu pneumatycznego są zalecane, jeśli dostępny jest zestaw urządzeń pomiarowych oraz zapewniona odpowiednia infrastruktura laboratoryjna. Jeżeli możliwości pomiarowe są ograniczone, do określenia kinematyki obszaru działania falochronu pneumatycznego można wykorzystać wzory teoretyczne. Wyczerpujący opis osiowo-symetrycznych przegród powietrznych oraz zestaw wzorów do



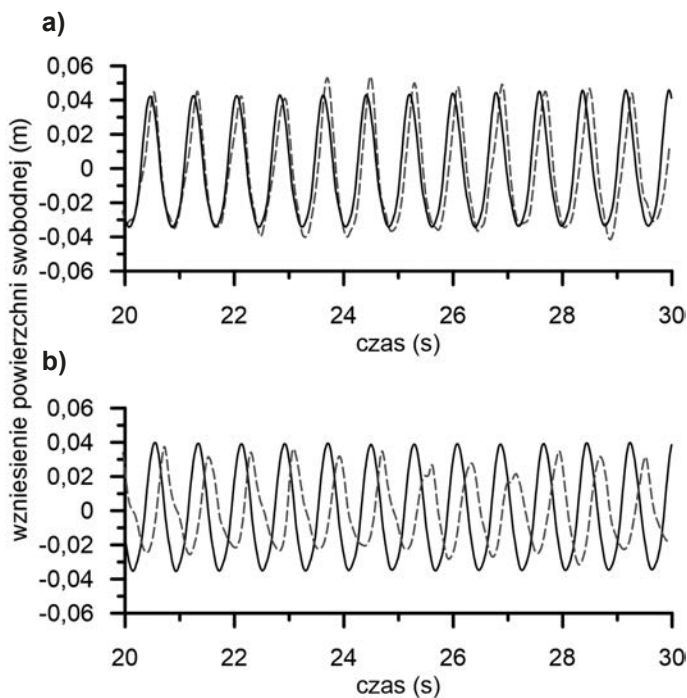
Rys. 4. Pole prędkości w przegrodzie powietrznej pomierzone przy użyciu systemu PIV; $h = 0,3 \text{ m}$; $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$



Rys. 5. Pole prędkości wody w obszarze działania przegrody powietrznej pomierzone sondą ADV; $h = 0,3 \text{ m}$; $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$

obliczeń podstawowych parametrów falochronu pneumatycznego można znaleźć między innymi w pracy Brevika i Kristiansena [3].

Druga część doświadczeń w laboratorium falowym polega na badaniach oddziaływania przegrody powietrznej i propagujących fal wodnych generowanych w kanale. Należy pamiętać, że kanał falowy, jak każde urządzenie badawcze, ma swoje ograniczenia i wnosi niepożądane efekty. Istotny wpływ na wyniki modelowania fizycznego transmisji falowania przez falochron pneumatyczny mają efekty początku ruchu (przed rozpoczęciem doświadczenia woda jest nieruchoma), prąd powrotny, tłumienie na długości kanału, powtórne odbicie fal od płyty wywoływacza, generacja dodatkowej fali wolnej oraz wspomniany, zanikający wraz z odległością od płyty wywoływacza, wpływ jej ruchu. Trudności nasilają się, jeżeli badania wymagają uwzględnienia silnych warunków sztormowych, gdzie istotne znaczenie ma nieliniowy charakter fal wodnych. Aby zminimalizować wpływ niepożądanych skutków ubocznych mechanicznej generacji falowania oraz tłumienia fal na długości kanału, model falochronu i urządzenia pomiarowe są instalowane w odpowiedniej odległości od płyty wywoływacza. Czas trwania po-



Rys. 6. Zapis zmian powierzchni swobodnej wody w czasie przed (a) i za (b) falochronem pneumatycznym, dla fal regularnych $T = 0,79$ s; $H = 0,076$ m; $Q = 0$ (linia ciągła), $Q = 4$ m³/h (linia przerywana)

szczególnych badań falowych przyjmuje się odpowiednio długi, aby uzyskać ustalone parametry skończonego ciągu falowego. Po określeniu zakresu parametrów falowania do badań, takich jak: wysokość fali (H), okres fali (T) i odpowiadająca okresowi długość fali (L), w pierwszej kolejności przeprowadza się doświadczenia bez wytworzonej przegrody powietrznej ($Q = 0$). Zmiany wzniesienia powierzchni swobodnej są rejestrowane za pomocą zestawu sond oporowych w dwóch lokalizacjach przed i za falochronem pneumatycznym. Sondy grupuje się w niewielkich i równych odstępach, co pozwala na późniejszą analizę fal podchodzących i odbitych od przegrody. Następnie, pomiary falowania są powtarzane dla określonych ustawień kompresora – ustalonego wydatku powietrza. Przyjęty sposób postępowania pozwala na dokonanie porównania charakterystyki fal oddziałujących z falochronem pneumatycznym i analogicznych warunków falowych w przypadku braku przegrody. Taka procedura ułatwia określenie wpływu przegrody na propagujące fale oraz oszacowanie efektywności działania przegrody powietrznej jako falochronu pneumatycznego. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe wyniki zmian profilu fal zarejestrowanych przez sondy falowe przed i za falochronem pneumatycznym w odniesieniu do sytuacji czystej propagacji fal bez przegrody.

Na podstawie danych z sond oporowych można oszacować współczynniki transmisji (K_T), odbicia fali (K_R) oraz dyssypacji energii falowej w obszarze bezpośredniego oddziaływania przegrody pneumatycznej i propagujących fal (K_D). Współczynniki te wyznacza się na podstawie wysokości fali podchodzącej (H_I), fali odbitej (H_R), którą uzyskujemy, stosując metody oparte na zapisie z dwóch lub więcej sond w grupie [5, 8] oraz fali transmitowanej (H_T), którą obliczamy, wykorzystując analizę Fouriera ciągu fal regularnych propagujących bez i w obecności przegrody pneumatycznej. Współczynniki te można wykorzystać

do oceny efektywności i zasadności stosowania falochronów pneumatycznych w strefie brzegowej morza. Wyniki pomiarów laboratoryjnych stanowią cenne dane, które mogą posłużyć do opracowania, weryfikacji i rozbudowy modeli teoretycznych transmisji fal przez falochron pneumatyczny.

PODSUMOWANIE

Prowadzone dotychczas badania efektywności falochronów pneumatycznych w tłumieniu falowania potwierdziły możliwość stosowania przegród powietrznych w inżynierii morskiej dla fal wodnych o ograniczonej długości w stosunku do głębokości wody. Tego rodzaju instalacje mogą działać samodzielnie lub mogą być stosowane jako systemy pomocnicze do tradycyjnych rozwiązań ochrony akwenów wodnych narażonych na działanie fal morskich. Przedstawione w pracy wskazówki do przygotowania badań doświadczalnych transmisji fal przez falochron pneumatyczny pozwolą w sposób efektywny zaplanować przyszłe działania laboratoryjne zmierzające do lepszego rozpoznania skomplikowanego systemu procesów hydrodynamicznych zachodzących podczas przejścia fali przez falochron pneumatyczny. Należy podkreślić, że szczególną wartość mają pomiary pól prędkości, które dostarczają wiele informacji na temat złożonej struktury falowo-prądowej i pozwalają na dokładniejszy wgląd w mechanizmy dyssypacji energii falowej przegród powietrznych. Informacje uzyskane podczas doświadczeń w kanale falowym mogą być wykorzystane do oceny efektywności i zasadności stosowania falochronów pneumatycznych w strefie brzegowej morza oraz pozwolą na dopracowanie modeli teoretycznych jako narzędzi wspomagających projektowanie falochronów pneumatycznych.

LITERATURA

1. Adrian R. J.: Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 39, 2005, 159-169.
2. Brevik I.: Partial wave damping in pneumatic breakwaters. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 102, 1976, 1167-1176.
3. Brevik I., Kristiansen O.: The flow in and around air-bubble plumes. *International Journal of Multiphase Flow*, 28, 2002, 617-634.
4. Evans J. T.: Pneumatic and similar breakwaters. *Proceedings of the Royal Society A*, 231, 1955, 457-466.
5. Goda Y., Suzuki Y.: Estimation of incident and reflected wave in random wave experiments. *Proceedings of the 15th Conference on Coastal Engineering*, Honolulu, Hawaii, 1976, 828-845.
6. Jasińska E.: Przegroda powietrzna w basenach paliw płynnych. *Rozprawy Hydrotechniczne*, 38, 1977, 139-152.
7. Jasińska E.: Przegroda powietrzna w basenie paliw płynnych portu Północnego. *Inżynieria Morska*, nr 9, 1981
8. Jolas P.: Contribution à l'étude des oscillations périodique des liquides pesants avec surface libre. *Houille Blanche* 16, 1962, 758-769.
9. Longuet-Higgins M. S., Stewart R. W.: The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 10, 1961, 529-549.

10. Paprota M.: Laboratory investigations of wave transmission through a submerged aerial barrier. Proceedings of the 6th International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Lizbona, Portugalia, 2013.

11. Paprota M.: PIV measurements of air bubble breakwater kinematics. Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress, IAHR, Porto, Portugalia, 2014.

12. Paprota M., Sulisz W.: Modelling of wave transmission through a pneumatic breakwater. Journal of Hydrodynamics, 29, 2017, 283-292.

13. Stachurska B.: Pomiary ruchu osadu dennego w kanale falowym przy użyciu technik Particle Image Velocimetry oraz Acoustic Doppler Velocimetry. Inżynieria Morska i Geotechnika, 1/2017, 12-21.

14. Taylor G. I.: The action of a surface current used as a breakwater, Proceedings of the Royal Society A. 231, 1955, 466-478.

15. Zhang C., Wang Y., Wang G., Yu L.: Wave dissipating performance of air bubble breakwaters with different layouts, J. Hydrodyn. 22, 2010, 671-680.

PODZIĘKOWANIE: Niniejszy artykuł został przygotowany na podstawie badań przeprowadzonych w ramach projektu pt. „Transmisja nieliniowych fal powierzchniowych przez falochron pneumatyczny”. Projekt sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST8/07508.