

Ochrona akwenów portów morskich przez konstrukcję falochronu pionowego o niepełnym profilu

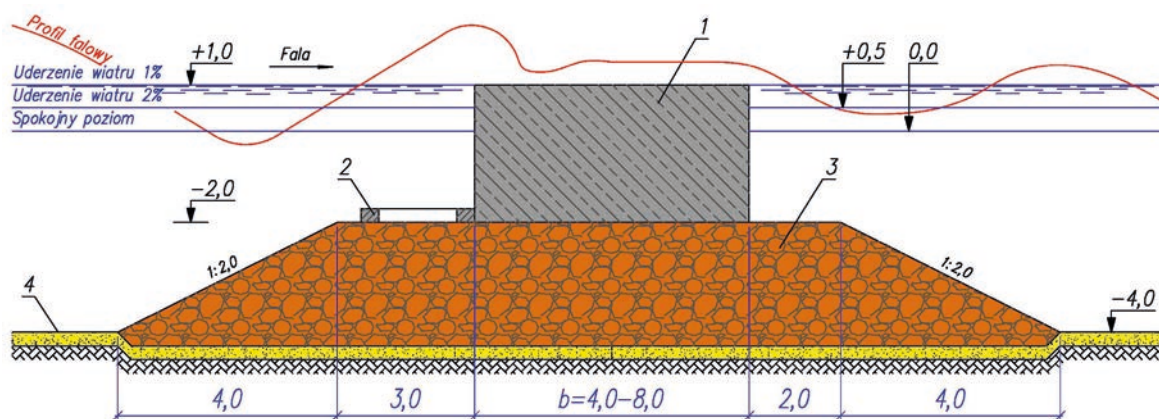
Mgr inż. Roman Sinitsa, dr inż. Vladimir Osadchiy, doc. Konstantin Anisimov, doc. Sergey Kolomic
Państwowa Akademia Budownictwa i Architektury w Odessie

W praktyce budowy falochronów stosowane są konstrukcje o niepełnym profilu pionowym, przez koronę którego dopuszczane jest przelewanie się fal z dalszą zmianą ich podstawowych parametrów. Jednak w przepisach wielu krajów dotyczących projektowania falochronów (OGH) brakuje praktycznych zaleceń dotyczących określenia siły tłumienia fal po ich przechodzeniu nad tego rodzaju konstrukcją.

Wyniki badań tego zagadnienia opublikowano w obszernej literaturze [1 ÷ 13]. W praktyce dopuszczalne wysokości fal w chronionych akwenach portów morskich są określane parametrami wyporności obliczeniowego statku oraz sposobem jego ustawienia względem frontu fali. Zasady te określają warunki niezbędne do cumowania i zapewniające – w momencie kontaktu

statku z urządzeniami linii odbojowej – dopuszczalną prędkość jego podejścia. Dopuszczalne wysokości fal oczekiwanych na obszarach chronionej infrastruktury miejskiej są uwarunkowane zachowaniem linii brzegowej oraz materiału plażowego i niedopuszczeniem powstania powodzi obszarów przybrzeżnych z powodu skutków wystąpienia sztormów o rzadkiej powtarzalności.

Pracownicy Katedry Budownictwa Hydrotechnicznego Państwowej Akademii Budownictwa i Architektury w Odessie (PABAO) przeprowadzili prace badawcze [17] dające możliwość uzasadnienia realizacji projektu budowy falochronów w celu ochrony terenów zakładu produkcji maszyn rolniczych przyległych do akwenu zatoki przed oddziaływaniem fal sztormowych. W ramach tych prac zbadano skuteczność gaszenia fal przez



Rys. 1. Przekrój poprzeczny konstrukcji falochronu
1 – betonowy korpus falochronu; 2 – półka narzutu (z płytą szczelinową); 3 – narzut kamienny



Rys. 2. Plan sytuacyjny budowli oraz chronionego terenu

konstrukcję pionowego falochronu o niepełnym profilu znajdującego się w odległości około 200 m od linii brzegowej (rys. 1). Plan sytuacyjny budowli pokazano na rys. 2. W rozpatrywanym rozwiązaniu zaproponowano posadowienie falochronu na głębokości $d = 4,0$ m. Na skutek działania wiatru o 1% prawdopodobieństwie głębokość wody przy falochronie może sięgać $d = 5,0$ m. Kreśląc promienie refrakcji oraz transformacji fal od wiatrów z kierunków południowych i południowo-wschodnich, wyznaczono parametry fal obliczeniowego prawdopodobieństwa wystąpienia w miejscu rozpatrywanego posadowienia falochronu. Wysokość fali przy głębokości $d = 4,0$ m wyniesie $h = 2,4$ m przy długości równej $\lambda = 24,5$ m. Przy wietrze o 1% prawdopodobieństwie wysokość fali wyniesie $h = 2,55$ m, a jej długość $\lambda = 30,0$ m. Z drugiej strony, z obliczeń wynika, że aby uniknąć zalania obszaru chronionego maksymalna wysokość fali o 1% prawdopodobieństwie na obszarze chronionym nie powinna przekraczać wartości $h = 1,5$ m.

Wyniki podobnych eksperymentalnych badań laboratoryjnych z frontalnym podejściem fal do falochronu o niepełnym pionowym profilu przedstawiono w publikacji O.Y. Birskaia [13], według której w celu określenia współczynnika gaszenia (tłumienia) fal zaleca się stosowanie wzoru (1):

$$k_{\text{tłumienia}} = \frac{h-h_0}{h} = \sqrt{\frac{h}{\lambda}} \cdot \left(0,23 \frac{B}{h} + 2,3 \frac{\Delta H}{h} + 1,6 \right) \quad (1)$$

gdzie:

- h – wysokość podchodzącej fali przed falochronem [m],
- h_0 – wysokość zgaszonej fali między falochronem a brzegiem [m],
- λ – długość podchodzącej fali [m],
- ΔH – podniesienie korony konstrukcji w stosunku do szacowanego poziomu wody [m],
- B – szerokość korony konstrukcji falochronu [m].

Po przeanalizowaniu oraz porównaniu wyników podobnych eksperymentalnych badań parametrów gaszenia fal, opublikowanych przez różnych autorów Allsop, 1983 [1]; Battjes, 2000 [2]; Briganti, 2003 [4]; Calabrese, 2002 [5]; Daemen, 1991 [6]; Daemrich, 2002 [7]; Kobayashi, 1989 [9]; Koohestani, 2006 [10]; Thesis, 2005 [11]; Meer, 1991 [12]; d'Angremond i in., 1996), zob. [2], w celu określenia parametrów transformacji fal przechodzących przez falochron (czyli transmisji fal przez falochron) o niepełnym pionowym profilu zaproponowano stosowanie następującej formuły (d'Angremond i in., 1996) na współczynnik transmisji (2):

$$k_t = -0,4 \frac{R_s}{H_i} + 0,80 \cdot \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0,31} \cdot (1 - e^{-0,5\zeta}) \quad (2)$$

gdzie:

- R_s – przewyższenie korony falochronu nad szacowanym poziomem wody [m],
- H_i – wysokość podchodzącej fali [m],
- B – szerokość korony konstrukcji falochronu [m],
- ζ – współczynnik uwzględniający wpływ położenia falochronu w stosunku do profilu fali, określony wzorem (3);

$$\zeta = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_i / L_0}} \quad (3)$$

gdzie:

- α – kąt kierunku podejścia fali w stosunku do osi wzdłużnej falochronu,
- L_0 – długość fali.

Po opracowaniu licznych danych eksperymentalnych dotyczących wpływu fal na falochron o niepełnym pionowym profilu (zob. Briganti i in., 2003 [4]) zaproponowano empiryczną zależność (4):

$$k_t = -0,35 \cdot \frac{R_s}{H_i} + 0,51 \cdot \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0,65} \cdot (1 - e^{-0,41\zeta}) \quad (4)$$

gdzie:

- h_s – przewyższenie górnej części konstrukcji w stosunku do szacowanego poziomu wody [m],
- H_i – wysokość podchodzącej fali [m],
- B – szerokość korony konstrukcji falochronu [m].

Podobne obliczenia morskich budowli hydrotechnicznych były również wykonywane przez innych badaczy [3; 13].

Zgodnie z wzorami (1), (2) i (4) dokonano obliczeń parametrów gaszenia fali przez konstrukcję falochronu o niepełnym pionowym profilu, których wyniki przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Parametry gaszenia fali przez konstrukcję falochronu o niepełnym pionowym profilu

№	Wysokość fali przed falochronem [m]	Szerokość korony konstrukcji [m]	Wysokość fali za falochronem [m]		
			Formuła 1	Formuła 2	Formuła 4
Fala przy 1% prawdopodobieństwie wystąpienia i rzędnej korony falochronu 0,00m					
1	2,55 (A)	8,0	0,82	0,46	0,18
		7,5	0,86	0,47	0,19
		7,0	0,89	0,48	0,20
		6,5	0,93	0,49	0,21
		6,0	0,96	0,50	0,22
		5,5	0,99	0,52	0,23
		5,0	1,03	0,53	0,25
		4,5	1,06	0,55	0,27
		4,0	1,09	0,57	0,29
Fala przy 1% prawdopodobieństwie wystąpienia i rzędnej korony falochronu +0,50 m					
2	2,50 (B)	8,0	0,43	0,37	0,11
		7,5	0,47	0,38	0,12
		7,0	0,50	0,39	0,13
		6,5	0,53	0,41	0,14
		6,0	0,57	0,42	0,15
		5,5	0,60	0,43	0,16
		5,0	0,64	0,45	0,17
		4,5	0,68	0,46	0,19
		4,0	0,70	0,48	0,21
Fala przy 1% prawdopodobieństwie wystąpienia i rzędnej korony falochronu +1,0 m					
3	2,40 (C)	8,0	-0,10	0,27	0,02
		7,5	-0,06	0,28	0,03
		7,0	-0,03	0,29	0,04
		6,5	0,01	0,30	0,05
		6,0	0,05	0,31	0,06
		5,5	0,08	0,33	0,07
		5,0	0,12	0,34	0,09
		4,5	0,15	0,36	0,10
		4,0	0,19	0,38	0,12



Rys. 3. Widok kanału falowego z modelem falochronu o niepełnym profilu pionowym

Analiza wyników prowadzonych obliczeń wskazuje na istotne różnice w wysokościach zgaszonych fal określanych przez różnych badaczy. W celu weryfikacji obliczeń teoretycznych przeprowadzono badania eksperymentalne w kanale falowym Katedry Budownictwa Hydrotechnicznego PABAO na modelu konstrukcji falochronu o niepełnym pionowym profilu w skali 1:15 (rys. 3). Celem doświadczeń było otrzymanie danych dotyczących rzeczywistego gaszenia nadchodzącej fali przez falochron, pozwalających na wybór jego najbardziej optymalnych parametrów.

Wpływ tarcia, kapilarności oraz sprężystości wody przy powstaniu powierzchniowych fal grawitacyjnych jest znikomy [14, 18], dlatego parametry te w trakcie doświadczenia nie były uwzględniane. Pozwoliło to na symulację interakcji fal grawitacyjnych z falochronem zgodnie z prawem mechanicznego podobieństwa, a w szczególności z prawem podobieństwa grawitacyjnego Froude'a [16].

W celu rejestracji parametrów fal w badaniach wykorzystano cztery czujniki do pomiarów wysokości fal w czterech punktach kanału falowego w tym samym czasie. Szczegółowy opis urządzenia wykorzystywanego przy pomiarach podano w [19].

Różnorodność czynników konstrukcyjnych falochronu (rys. 1), mających istotny wpływ na efektywność gaszenia fal, określiła liczba niezbędnych badań laboratoryjnych na modelach. W tym przypadku z góry ustalono konieczność zastosowania matematycznej teorii planowania eksperymentów (MTPE), która pozwala na uzyskanie nowych informacji przy obliczeniu wielu interakcji pomiędzy zestawem badanych parametrów. W efekcie skutkuje to zmniejszeniem liczby badań doświadczalnych [15].

Zgodnie z ustalonym celem zastosowano 27-punktowy kompozycyjny trójpoziomowy plan badań w postaci „kostki”, z trzema zmieniającymi się w tym samym czasie niezależnymi czynnikami. Dwa parametry – wysokość korony w stosunku do poziomu spokojnej wody (badane w zakresie $\Delta H = 0 \div 1,0$ m oraz szerokość korony $B = 4,0 \div 6,0$ m – odnoszą się do geometrycznych parametrów falochronu. Trzecim parametrem jest wysokość odpowiedniej fali, która zmienia się w granicach $h = 0,6 \div 3,0$ m. Dla każdego punktu planu badań przeprowadzono trzy doświadczenia z różną liczbą badanych parametrów. Przyjęte wartości badanych niezależnych parametrów, jak również poziomy ich zmian przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2 Wartości badanych niezależnych parametrów i poziomy ich zmian

Kod	Badane parametry	Poziomy zmienności			Interwał zmian [m]
		-1	0	+1	
X_1	Wysokość fali h , [m]	0,6	1,8	3,0	1,2
X_2	Rzędna korony konstrukcji ΔH [m]	0	0,5	1,0	0,5
X_3	Szerokość korony B [m]	4,0	6,0	8,0	2,0

Statystyczne opracowanie wyników badań przeprowadzono za pomocą programu „*Statistica*”. Zastosowanie tego programu pozwoliło ocenić stopień wpływu każdego czynnika na wyniki badań, jak również ich interakcje pomiędzy sobą. Ocena ta polegała na obliczeniu trójskładnikowego eksperymentalno-statystycznego modelu badań wykorzystującego metodę najmniejszych kwadratów.

Tabl. 3. Wyniki analizy wariancji wpływu falochronu o oznaczonej konstrukcji na parametry zgaszonej fali.

Parametry	Ocena wyników; współczynnik determinacji $R^2 = 0,9629$					
	Współczynnik regresji	Błąd statystyczny	t	p	-95%	+95%
Środkowy wolny składnik	0,717	0,024	30,218	0,000	0,667	0,767
Wysokość fali h_i [m]	1,020	0,058	17,541	0,000	0,897	1,143
Wysokość fali h_i^2 [m ²]	0,011	0,050	0,220	0,829	-0,095	0,117
Przewyższenie korony ΔH [m]	-0,469	0,058	-8,074	0,000	-0,592	-0,347
Przewyższenie korony ΔH^2 [m ²]	0,106	0,050	2,100	0,051	-0,001	0,212
Szerokość korony B [m]	-0,279	0,058	-4,800	0,000	-0,402	-0,156
Szerokość korony B^2 [m ²]	-0,082	0,050	-1,624	0,123	-0,188	0,025
h_i na ΔH	-0,359	0,071	-5,046	0,000	-0,510	-0,209
h_i na B	-0,221	0,071	-3,101	0,007	-0,371	-0,071
ΔH na B	0,119	0,071	1,664	0,114	-0,032	0,269

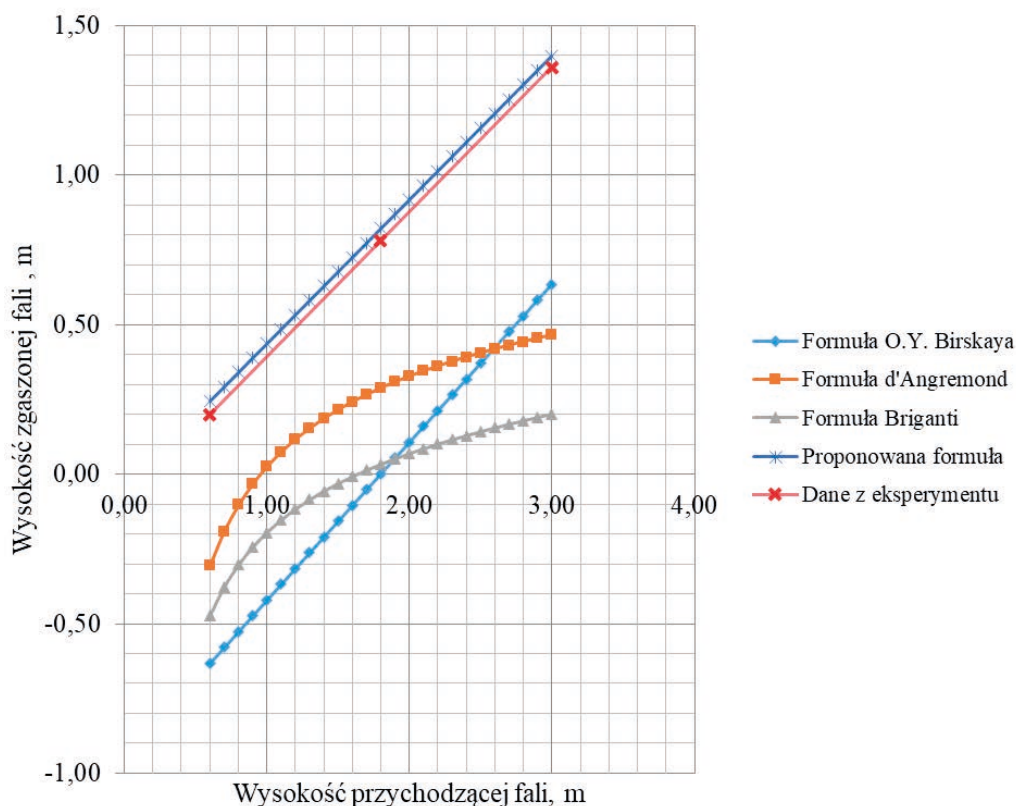
Utworzenie eksperymentalno-statystycznego (ES) modelu od k -parametrów budowane jest w postaci wielomianu kwadratowego:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (5)$$

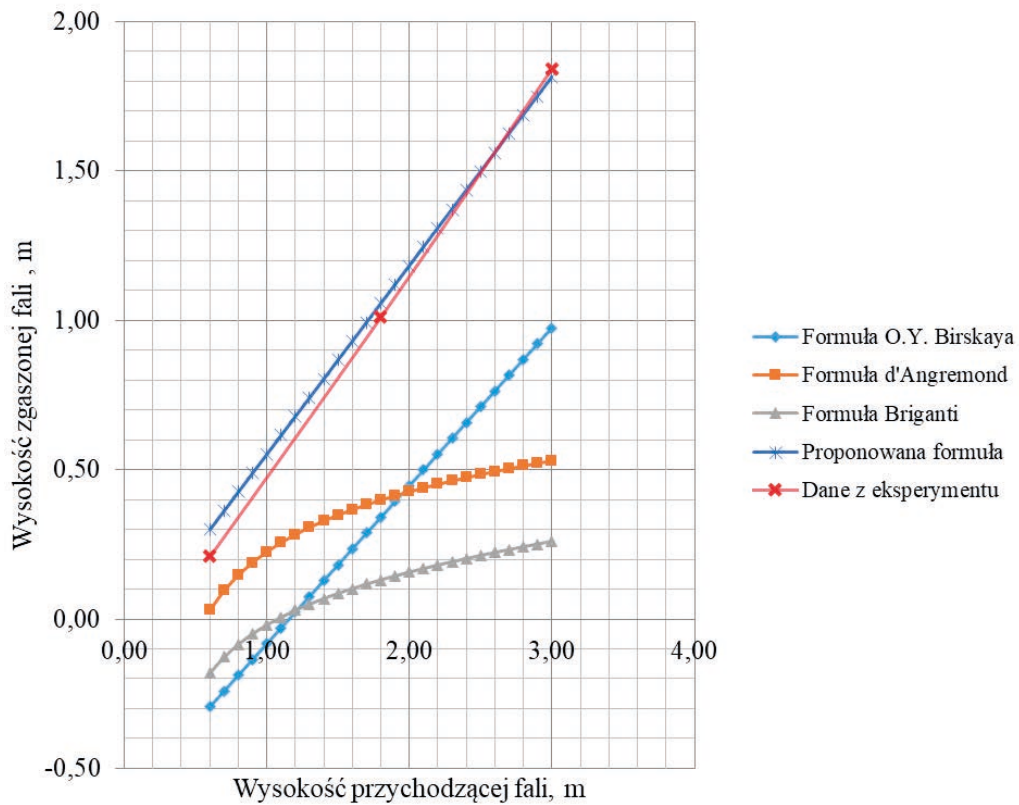
Po utworzeniu ES modelu przeprowadzono analizę wpływu każdego z prezentowanych w tabl. 2 czynników na badane parametry w obszarach maksymalnych i minimalnych wartości.

W celu oceny ES modelu konstrukcji falochronu wykorzystano wyniki analizy wariancji. W tabl. 3 przedstawiono wyniki analizy wariancji wpływu falochronu o oznaczonej konstrukcji na parametry zgaszonej fali.

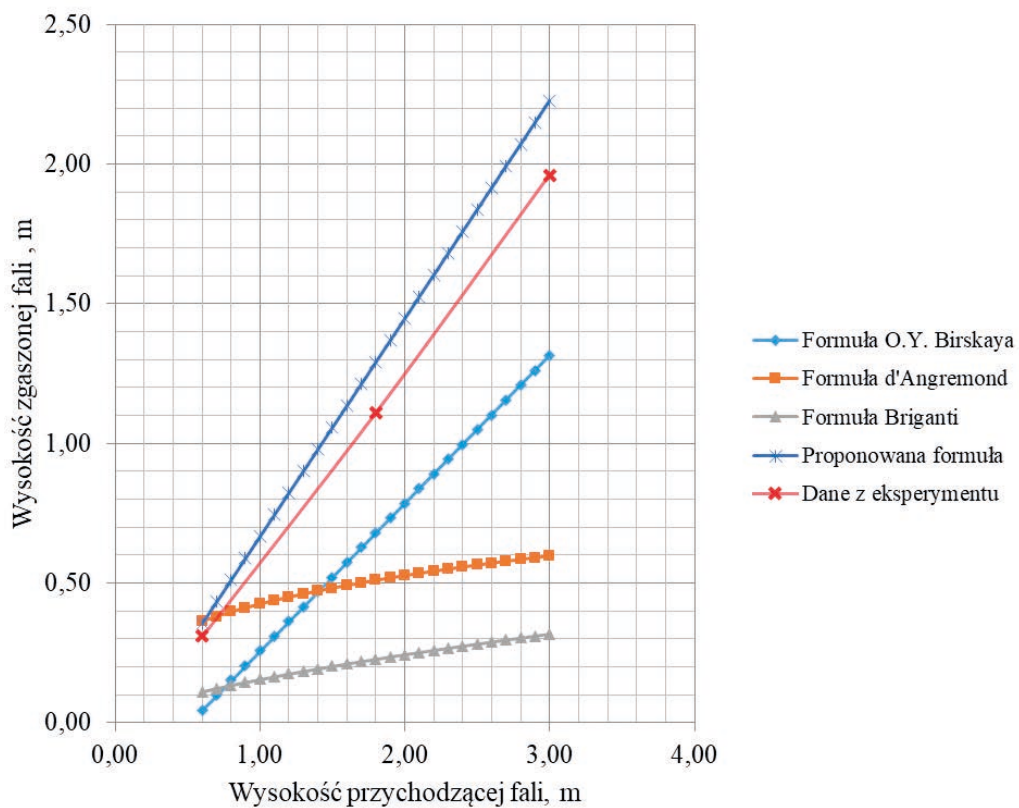
Po otrzymaniu wyników analizy wariancji określono czynniki mające nieznaczne współczynniki regresji oraz ich interakcje. Odrzucenie statystycznie nieistotnych elementów pozwoliło na otrzymanie prostej zależności, bez znaczących zmian w ES modelu. W efekcie otrzymano równanie regresji (6):



Rys. 4. Wysokość zgaszonej fali przy szerokości korony $b = 4,0$ m i $\Delta H = 1,0$ m według formuł (1), (2), (4) i (7) oraz doświadczenia



Rys. 5. Wysokość zgaszonej fali przy szerokości korony $b = 4,0$ m i $\Delta H = 0,5$ m według formuł (1), (2), (4) i (7) oraz doświadczenia



Rys. 6. Wysokość zgaszonej fali przy szerokości korony $b = 4,0$ m i $\Delta H = 0$ m według formuł (1), (2), (4) i (7) oraz doświadczenia

$$h_r = 0,717 + 0,510 \cdot X_1 - 0,235 \cdot X_2 - 0,140 \cdot X_3 - 0,180 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,110 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (6)$$

W celu wygody ustalenia wielkości fal przechodzących przez koronę falochronu, zgodnie z wynikami zamiany wartości x_1, x_2, x_3 oraz wykonaniem uproszczenia matematycznego, wzór (6) przedstawiono w postaci (7):

$$h_r = 3 \cdot h_i \cdot h_b + 0,07 \cdot \Delta H + 0,013 \cdot b - 0,165 \quad (7)$$

$$h_b = (0,3 - 0,1 \cdot \Delta H - 0,01 \cdot b) \quad (8)$$

gdzie:

h_r – wysokość fali za falochronem [m],

h_i – wysokość podchodzącej fali [m],

ΔH – przewyższenie korony falochronu nad poziomem morza [m],

b – szerokość korony konstrukcji falochronu [m],

h_b – współczynnik pomocniczy określany według wzoru (8).

Obliczenia skuteczności gaszenia fal, wykonane zgodnie z proponowanymi wcześniej metodami, porównano z wynikami uzyskanymi podczas badań w kanale falowym. Wyniki porównania przedstawiono na rys. 4, 5, 6. Analiza wyników wskazuje na znaczące różnice otrzymanych wartości gaszenia wysokości fal przez falochron o niepełnym pionowym profilu. Uzyskane teoretyczne wartości wysokości zgaszonych fal we wszystkich przedstawionych metodach są mniejsze od wartości rzeczywistych otrzymanych z badań.

Parametry zgaszonych fal za falochronem, obliczone zgodnie z proponowaną przez Autorów aproksymacją (7), dobrze korespondują z wynikami badań przeprowadzonych w kanale falowym i dokładniej oddają rzeczywistą efektywność tłumienia fal o badanych parametrach.

Z wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- wykorzystanie falochronów pionowych o niepełnym profilu w celu ochrony portów morskich i miejskiej przybrzeżnej infrastruktury jest uzasadnione z technicznego punktu widzenia;
- obniżenie rzędnej korony falochronu pozwala zmniejszyć koszty budowy nowych konstrukcji;
- przejście fal o 1% prawdopodobieństwie przez koronę falochronu o szerokości $b = 4,0$ m i jej rzędnej $\Delta H = 0,5$ m nie doprowadzi do sytuacji awaryjnych na obszarach chronionych; przy innych kombinacjach badanych parametrów wysokość zgaszonej fali będzie przewyższać dopuszczalną wysokość $h = 1,5$ m.

Analiza wyników wykonanych badań w kanale falowym przyczyniła się do ustalenia zależności empirycznej pozwalającej na wstępne określenie wielkości redukcji wysokości fal przechodzących przez pionowy falochron o niepełnym profilu.

LITERATURA

1. Allsop N.W.H.: Low-crest breakwaters, studies in random waves. Proc. Coastal Structures '83, Arlington, Virginia 1983, 94-107.
2. d'Angremond K., van der Meer J. W., de Jong R. J.: Wave transmission at low crested structures. Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 1996, 3305-3318.

3. Battjes J. A., Groenendijk H. W.: Wave height distributions on shallow foreshores. J. of CE, No. 40, 2000, 161-182.
4. Briganti R, Van der Meer J. W., Buccino M., Calabrese M.: Wave transmission behind low crested structures. Proc. 3rd Coastal Structures Conference, 2003.
5. Calabrese M., Vicinanza V., Buccino M.: Large scale experiments on the behavior of lowcrested and submerged breakwaters in presence of broken waves. Proc. 28th Int. Conf. On Coastal Engineering, ASCE, 2002, 1900-1912.
6. Daemen I. F. R.: Wave transmission at low crested structures. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1991.
7. Daemrich K. F., Mai, S., Ohle, N.: Wave transmission at rubble mound structures. Proc. of the 1st German – Chinese Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, Rostock, Germany, 2002, 299-310.
8. Delft Hydraulics: Berm breakwater study for Karwar, India: Model investigation with oblique and multi-directional seas. Report no. H524 (Confidential), 1990.
9. Kobayashi N., Wurjanto, A.: Wave Transmission Over Submerged Breakwaters. Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering 115, 1989, 662-680.
10. Koohestani A.: CRM-Change Management: The Role Of Training In Successful CRM Implementation. / A. Koohestani. Masters thesis, Multimedia University, 2006.
11. M. Sc. Thesis: Wave transmission at various types of low-crested structures using neural networks. / M. Sc. Thesis, R. P. van Oosten and J. Peixó Marco, 2005.
12. Van Der Meer J. W., D'Angremond K.: Wave Transmission at Low-Crested Structures. Proceedings of the Conference on Coastal Structures and Breakwaters, London, 1991.
13. Бирская О. Ю.: Исследование воздействия разбивающихся волн на сооружения неполного вертикального профиля. / О. Ю. Бирская, Г. Д. Натальшин. Гидротехническое строительство, Москва 1982, вып. №6. – Предм. указ.: с. 45 – 47. – 5219 экз. – УДК 627.522.001.57.
14. Киселев П. Г.: Справочник по гидравлическим расчетам. / П. Г. Киселев. Энергия, Москва 1972, – Предм. указ.: с. 300 – 301. – 25 000 экз. – УДК 627.8.04(031).
15. Любченко Е. А.: Планирование и организация эксперимента. Часть 1. / Е. А. Любченко, О. А. Чуднова. Изд-во ТГЭУ, Владивосток 2010, – УДК 519.242. 519.242.7.
16. Макаров В. А.: Моделирование океанологических процессов (гидравлическое и аналоговое). Учебное пособие. / В. А. Макаров, А. Б. Мензин. Ленинградский политехнический институт, Ленинград 1979. – 500 экз. – УДК 551.46.001.57.
17. Научно-исследовательская работа: Расчетное обоснование и проектирование конструкций гидротехнических сооружений для защиты от затопления морскими волнами территории завода по адресу: г. Одесса, ул. Черноморского Казачества, 72, ОГАСА, Одесса: 2016 – 138 с.
18. Седов Л. И.: Методы подобия и размерности в механике. / Л. И. Седов. Изд-во «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, Москва 1977, – УДК 531.001.362.
19. Столяров Л. С. Определение параметров волн в лабораторных условиях при помощи современной измерительной аппаратуры /Л. С. Столяров, А. В. Чернецкий, Р. В. Синица. Вестник ОГАСА, вып. 73 – Одесса 2018. стр. 127-134.