ISSN 0209-2069

ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

EXPLO-SHIP 2004

Monika Król

Porównanie metod wyznaczania energii cumowania statku na przykładzie nabrzeży portu Świnoujście

Przedstawiono porównanie metod (analitycznych i symulacyjnej) określania energii cumowania. W powyższym celu określono energię cumowania dla statków obsługiwanych przy wybranych nabrzeżach portu Świnoujście.

A Comparison between Analytical and Simulation Methods of Determining Mooring Energy

The paper presents a comparison between analytical and simulation method of the determination of mooring energy. To this end, the mooring energy for selected quays at the Port of Świnoujscie Harbour was determined.

Wstęp

Podczas doboru urządzeń odbojowych podstawowym parametrem branym pod uwagę jest energia, jaką może to urządzenie zaabsorbować. Znajomość energii kinetycznej cumującego statku jest także niezbędna podczas projektowania nabrzeża.

Do określania energii cumowania stosuje się metody [7]:

- analityczne.
- symulacyjne.

Celem pracy jest zbadanie dokładności i przydatności metod analitycznych do obliczania energii cumującego statku w aspekcie bezpieczeństwa poprzez porównania z metodami symulacyjnymi.

1. Metody obliczania energii cumującego statku

1.1. Metody analityczne obliczania energii cumującego statku

W metodach analitycznych model matematyczny jest tworzony z założeniem, że mogą zostać przyjęte pewne uproszczenia. Modele empiryczne są tworzone na podstawie syntezy wyników badań rzeczywistych i wiedzy praktycznej. Są również budowane na uogólnionych wynikach badań modelowych, uzupełnionych wynikami badań rzeczywistych.

Metody te służą do określenia wartości energii kinetycznej, powstającej podczas kontaktu statku z zespołem nabrzeże – urządzenie odbojowe.

W praktyce stosuje się dwie metody analityczne obliczania energii cumowania:

- metoda zalecana przez Komisję Międzynarodowego Komitetu Nawigacyjnego PIANC (1984) [5, 12],
- metoda zgodna z „Zaleceniami do projektowania morskich budowli hydrotechnicznych” [7].

Metody te różnią się od siebie zastosowanymi współczynnikami, sposobem uwzględnienia masy wody towarzyszącej oraz zalecanymi prędkościami, a co za tym idzie wyznaczone za ich pomocą energie cumowania także są różne.

2.1.1. Metoda obliczania energii cumowania według PIANC [5, 12]

W metodzie analitycznej zalecanej przez Komisję Międzynarodowych Kongresów Nawigacyjnych (*The International Navigation Association*) PIANC, energia cumowania jest obliczona ze wzorów (1) i (2):

$$E = E_{NS} \cdot C_E \cdot C_M \cdot C_S \cdot C_C \ \text{[kN·m]} \tag{1}$$

$$E_{NS} = \frac{1}{2} m_S \cdot v_N^2 \ \text{[kN·m]} \tag{2}$$

gdzie:

E_{NS} – energia normalna statku [kN·m],
m_s – masa statku [kg],
v_N – prędkość normalna statku [m/s],
C_M – współczynnik masy wody towarzyszącej (dodanej) [bezwym.],
C_E – współczynnik ekscentryczności [bezwym.],
C_S – współczynnik sprężystości systemu nabrzeża – odbojnica – statek [bezwym.],
C_c – współczynnik konstrukcji nabrzeża [bezwym.].

Do obliczeń energii cumowania stosuje się energię normalną statku, bez uwzględniania masy dodanej statku.

W metodzie według PIANC masa wody dodanej jest uwzględniona w postaci współczynnika masy wody towarzyszącej C_M.

Podstawowe zależności geometryczne pomiędzy kadłubem statku i nabrzeżem, tzn. kąt podejścia do nabrzeża, szerokość statku, odległość pomiędzy środkiem ciężkości a punktem kontaktu z nabrzeżem oraz promień bezwładności uwzględnia współczynnik ekscentryczności C_E, którego wartości przedstawiono w tabeli 1 [5, 12].

Tabela 1

Wartości współczynnika niecentryczności C_E [bezwym.]
C_E factor

$x = \frac{L_{pp}}{4}$	$C_E \approx 0{,}4 \div 0{,}6$
$x = \frac{L_{pp}}{3}$	$C_E \approx 0{,}6 \div 0{,}8$
$x = \frac{L_{pp}}{2}$	$C_E \approx 1{,}0$

Dobór prędkości dla statków o poszczególnych długościach jest uzależniony od rodzaju wykonywanego manewru oraz usytuowania nabrzeża w stosunku do oddziaływania czynników, podczas wykonywania manewru.

Warunki, jakie brano pod uwagę w obliczeniach prędkości cumującego statku obejmowały rodzaj manewru oraz usytuowanie nabrzeża [5]:

a – łatwe cumowanie, osłonięty akwen;
b – trudne cumowanie, osłonięty akwen;

c – łatwe cumowanie, nieosłonięty akwen;
d – dobre cumowanie, nieosłonięty akwen;
e – trudne cumowanie, nieosłonięty akwen.

Uwzględniając te warunki, w tabeli 2 przedstawiono prędkości cumowania, a następnie energię cumowania (podpunkt 3.1.1 – tab. 7) dla statków o długości 235, 255, 260, 270 i 280 m. Są to statki, jakie mogą wchodzić do portu Świnoujście [5].

Tabela 2

Prędkość podchodzenia statku do nabrzeża, metoda wg PIANC
Approaching vessel's speed at the quay according to PIANC

Prędkość podchodzenia statku do nabrzeża						
L_C (m)	m_s (tony)	V (a) (m/s)	V (b) (m/s)	V (c) (m/s)	V (d) (m/s)	V (e) (m/s)
235	95 000	0,0396	0,0872	0,1276	0,1720	0,2022
255	103 000	0,0386	0,0853	0,125	0,1688	0,1987
260	105 000	0,0384	0,0848	0,1244	0,1679	0,1978
270	112 000	0,0377	0,0832	0,1222	0,165	0,1947
280	119 000	0,0368	0,0817	0,1202	0,1626	0,1921

1.1.2. Metoda obliczania energii cumowania według „Zalecenia do projektowania morskich budowli hydrotechnicznych" [7]

W metodzie analitycznej według „Zalecenia...", energia cumowania jest obliczana z następującego wzoru:

$$E = \frac{kWV_N^2}{2g} \text{ [kN·m]} \tag{3}$$

gdzie:
W – wirtualny ciężar statku [kN],
V_N – prędkość nominalna statku [m/s],
g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
k – współczynnik ekscentryczności [–].

Metoda według „Zalecenia..." masę wody towarzyszącej uwzględnia na etapie obliczeń wirtualnego ciężaru statku:

$$W = W_s + W_d \text{ [kN]} \tag{4}$$

gdzie:

W_s – ciężar statku [kN],

W_d – ciężar wody towarzyszącej [kN].

Współczynnik ekscentryczności uwzględnia rodzaj wykonywanego manewru i obliczany jest ze wzoru (5):

$$k = \frac{l}{l + \left(\frac{l}{r}\right)^2} \text{ [bezwym.]} \tag{5}$$

gdzie:

r – promień bezwładności [m],

l – odległość pomiędzy punktem kontaktu a środkiem ciężkości statku [m].

Wartość współczynnika ekscentryczności k przedstawiono w tabeli 3 [4, 7].

Tabela 3

Wartość współczynnika k [bezwym.]
Value of k factor (no units)

Gdy statek zbliża się do pirsu lub nabrzeża pod małym kątem i uderza mniej więcej w jednej czwartej swej długości	k = 0,5
Gdy statek uderza dziobem lub rufą	k = 0,2
Gdy statek uderza śródokręciem	k = 1,0

Dla normalnie podchodzącego statku z pomocą holowników do linii cumowniczej budowli hydrotechnicznej przyjmuje się prędkości dobijania zamieszczone w tabeli 4 [4, 7].

Tabela 4

Prędkość podchodzenia statku do nabrzeża, metoda wg „Zalecenia...” [m/s]
Approaching vessel's speed at the quay according to "Recommendations…"

Usytuowanie morskiej konstrukcji hydrotechnicznej	Rodzaj podejścia	Statki do 1000 dwt lub do 1500 t wyporności	Statki do 5000 dwt lub do 6500 t wyporności	Statki do 10 000 dwt lub do 13 000 t wyporności i większej
Konstrukcja i statek narażone na silny wiatr i falowanie	ciężkie	0,75	0,55	0,40
	korzystne	0,60	0,45	0,30
Konstrukcja i statek narażone na umiarkowany wiatr i falowanie	ciężkie	0,50	0,40	0,25
	korzystne	0,35	0,30	0,20
Konstrukcja i statek chronione przed wiatrem i falowaniem	ciężkie	0,25	0,20	0,15
	korzystne	0,20	0,15	0,10

Dla normalnie podchodzącego statku bez pomocy holowników, prędkości dobijania wymienione powyżej należy przyjmować stosując następujące współczynniki:

- dla warunków korzystnych 1,0;
- dla warunków ciężkich 1,4.

2.2. Metoda symulacyjna określania energii cumowania [3]

Wykorzystanie metody symulacyjnej jest uwarunkowane znajomością parametrów statku, jego prędkości (liniowej i kątowej) oraz kąta podejścia w momencie zetknięcia z nabrzeżem. Wartości te można uzyskać w wyniku badań eksperymentalnych bądź modelowych.

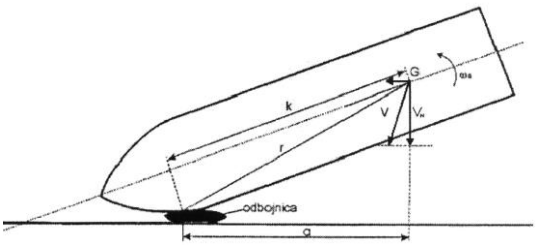
W metodzie symulacyjnej na podstawie zarejestrowanych wartości energii cumowania w poszczególnych przejazdach jest wyznaczana wartość energii cumowania z wykorzystaniem rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

Metoda symulacyjna jest oparta na wzorze (6) [3]:

$$E = \frac{1}{2} m u_0^2 \left(1 - \frac{a^2}{k^2 + r^2} \right) - m u_0 \omega_0 \frac{k^2 \cdot a}{k^2 + r^2} + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \frac{k^2 \cdot r^2}{k^2 + r^2} \tag{6}$$

gdzie:

- m – masa wirtualna statku [kg],
- u_0 – prędkość liniowa statku [m/s],
- ω_0 – prędkość kątowa statku [rad/s],
- r – odległość pomiędzy środkiem ciężkości statku a punktem kontaktu z nabrzeżem [m],
- a – odległość pomiędzy środkiem ciężkości statku a punktem kontaktu z nabrzeżem, rzutowana na linię nabrzeża [m],
- k – odległość pomiędzy środkiem ciężkości statku a punktem kontaktu z nabrzeżem, rzutowana na linię diametralną statku [m].



Rys. 1. Moment zetknięcia statku z nabrzeżem [3]
Fig. 1. The moment of first t vessel-quay contact

Wyniki uzyskane metodą symulacyjną są bardzo zbliżone do wartości rzeczywistych, ponieważ w badaniach uwzględnia się rzeczywiste parametry statku i akwenu oraz panujące na nim warunki hydrometeorologiczne.

3. Obliczanie energii cumowania dla wybranych nabrzeży portu Świnoujście

3.1. Obliczanie energii cumowania dla wybranych nabrzeży portu Świnoujście metodami analitycznymi

Aby możliwe było porównanie metod analitycznych z metodą symulacyjną, do obliczeń metodami analitycznymi zastosowano między innymi parametry takich statków, jakich dotyczyły symulacje przeprowadzane dla wybranych nabrzeży portu Świnoujście (Górników, Hutników, Chemików i Portowców), czyli masowców o długości 235 i 255 metrów. Zamieszczono je w tabeli 5 [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11].

Tabela 5

Parametry statków przyjęte do obliczeń metodami analitycznymi
Vessels dimensions accepted for analytical calculations

L_C [m]	T [m]	B [m]	C_B [bezwym.]
235	12,8	40,0	0,816
255	12,8	40,0	0,817
260	12,8	40,0	0,817
270	12,8	41,0	0,818
280	12,8	42,0	0,820

3.1.1. Obliczanie wielkości współczynników C_M, C_E, C_S, C_C dla metody zalecanej przez PIANC

Wielkości współczynników C_M, C_E, C_S, C_C dla obliczeń przyjęto zgodnie z założeniami metody Komitetu PIANC, po uwzględnieniu taktyki manewrowej, typów statków i konstrukcji oraz wyposażenia nabrzeży. Ponieważ przy nabrzeżach portu Świnoujście głębokości nie przekraczają 15 metrów, stąd stosunek głębokości akwenu do zanurzenia statku wynosi w przybliżeniu 1,1. W związku z tym zgodnie z metodą PIANC współczynnik masy dodanej C_M = 1,8.

Statki w porcie Świnoujście podchodzą do nabrzeża równolegle bądź prawie równolegle, więc kąt podejścia do nabrzeża jest bardzo mały. W takim wypadku ramię obrotu $x = \frac{L_{pp}}{2}$, co oznacza, że współczynnik $C_E \approx 1{,}0$.

Współczynnik sprężystości C_S przyjmuje dla odbojnic twardych wartość 0,9. Współczynnik konstrukcji C_C nabrzeża przyjęto 0,8, gdyż są to nabrzeża pełne. Wartości współczynników przedstawia tabela 6.

Tabela 6

Wartości współczynników C_M, C_E, C_S, C_C [bezwymiarowe]
Factors C_M, C_E, C_S, C_C (no units)

C_M	C_E	C_S	C_C
1,8	1,0	0,9	0,8

Iloczyn wszystkich współczynników, podobnie jak i same współczynniki, jest wielkością bezwymiarową i wynosi 1,296, co w przybliżeniu daje 1,3.

$$C_M \cdot C_E \cdot C_S \cdot C_C = 1{,}8 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8 = 1{,}296 \approx 1{,}3$$

Na podstawie obliczonych wartości metodą analityczną określono wielkość energii cumowania w różnych warunkach nawigacyjnych dla pięciu długości statków. Wartości energii cumowania dla statków o długościach całkowitych 235, 255, 260, 270, 280 m przedstawiono w tabeli 7 [5, 7].

Tabela 7

Wartości energii cumowania dla statków o długościach 255, 260, 270, 280 m
dla różnych warunków manewru cumowania
Mooring energy values for vessels 255, 260, 270, 280 m long
for different weather conditions

L_C	E_C (a) [kNm]	E_C (b) [kNm]	E_C (c) [kNm]	E_C (d) [kNm]	E_C (e) [kNm]
235	97	***470***	1005	1826	2525
255	100	***487***	1046	1907	2643
260	101	490	1056	1924	2670
270	104	504	1087	1982	2760
280	105	516	1118	2045	2855

Do porównania metod wybrano statki o długości 235 i 255 m dla warunków trudnego cumowania na obszarze osłoniętym, aby były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków panujących przy nabrzeżach portu Świnoujście.

3.1.2. Metoda obliczania energii cumowania według „Zalecenia..."

Do obliczeń energii cumowania metodą analityczną wg „Zaleceń ..." przyjęto parametry statków obsługiwanych przy wybranych nabrzeżach portu Świnoujście. Założono, że konstrukcja i statek są chronione przed wiatrem i falowaniem, przyjęte zatem wartości prędkości zamieszczono w tabeli 8 [4, 7].

Tabela 8

Prędkości podejścia w zależności od usytuowania nabrzeża
Approaching speed depending on quay location

Usytuowanie morskiej konstrukcji hydrotechnicznej	Rodzaj podejścia	Statki do 10 000 dwt lub do 13 000 t wyporności i większej [m/s]
Konstrukcja i statek chronione przed wiatrem i falowaniem	ciężkie (trudne)	0,15
	korzystne (łatwe)	0,10

Ponieważ przy nabrzeżach w porcie Świnoujście konstrukcja i statek są chronione przed silnym wiatrem i falowaniem, do obliczeń przyjęto wartości prędkości V_C = 0,15 oraz V_C = 0,1 m/s. Dla każdego z nabrzeży wyznaczono energię cumowania E dla określonej masy statku m_s. Masy statków do obliczeń przyjęto takie, jak w badaniach symulacyjnych. Współczynnik k = 1,0 ponieważ przyjęto, że pierwszy kontakt statek – nabrzeże nastąpi śródokręciem.

Nab. Chemików

m_S = 100 000 ton; V_C = 0,1 m/s; E = 500 kNm
Vc = 0,15 m/s; **E = 1125 kNm**

Nab. Portowców

m_S = 90 000 ton; Vc = 0,1 m/s; E = 450 kNm
Vc = 0,15 m/s; **E = 1012,5 kNm**

Nab. Hutników

m_S = 100 000 ton; Vc = 0,1 m/s; E = 500 kNm
Vc = 0,15 m/s; **E = 1125 kNm**

Nab. Górników

m_S = 100 000 ton; Vc = 0,1 m/s; E = 500 kNm
Vc = 0,15 m/s; **E = 1125 kNm**

Do celów porównawczych wybrano energię obliczoną dla warunków najbardziej zbliżonych do panujących przy nabrzeżach portu Świnoujście.

3.2. Wyniki badań symulacyjnych

Uaktualnione i ujednolicone dane odnośnie energii cumowania przy nabrzeżach portu Świnoujście zebrane podczas analizy prac naukowo-badawczych, wykonanych przez zespół badawczy IIRM w WSM w Szczecinie [1, 2, 8, 9, 11, 12], zawiera tabela 9, w której przedstawiono wartości energii cumowania uzyskane metodą symulacyjną. Tabela dotyczy nabrzeży portu Świnoujście z uwzględnieniem parametrów statków obsługiwanych przy danym nabrzeżu.

Tabela 9

Energia cumowania dla nabrzeży portu Świnoujście
Mooring energy for the Port of Świnoujscie

Nabrzeże	Statek			DWT [t]	Wyporność [t]	Energia [kNm]
	L [m]	*B* [m]	*T* [m]			
Chemików	255	40	12,8	75000	100000	800
Portowców	235	40	12,8	65000	90000	600
Hutników	255	40	12,8	75000	100000	700
Górników	255	40	12,8	80000	100000	800

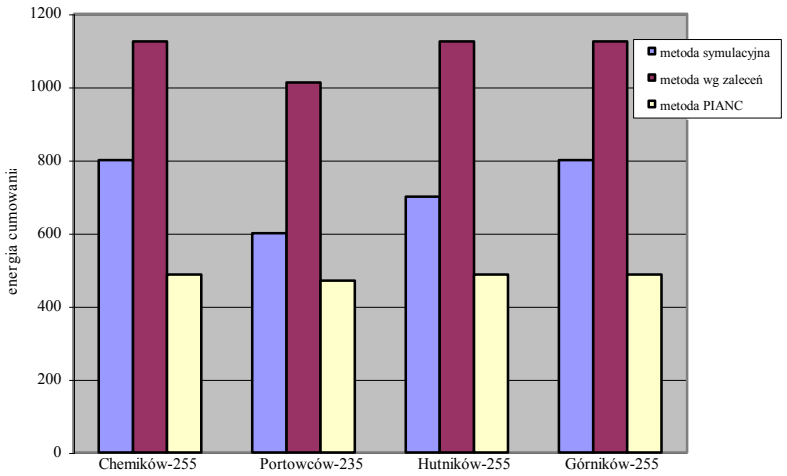
4. Porównanie metod analitycznych i symulacyjnej określania energii cumowania

Do celów porównawczych zestawiono energię cumowania, obliczoną dwiema metodami analitycznymi w trudnych warunkach manewrowania oraz energię określoną metodą symulacyjną. Wyniki przedstawiono w tabeli 10 oraz na wykresie (rys. 2).

Tabela 10

Zestawienie energii cumowania obliczanej różnymi metodami
Mooring energy for various calculation methods

Nabrzeże	Energia określona metodą symulacyjną [kNm]	Energia określona metodą wg PIANC [kNm]	Energia określona metodą wg „Zaleceń...” [kNm]
Hutników	700	487	1125
Chemików	800	487	1125
Górników	800	487	1125
Portowców	600	470	1012,5



Rys. 2. Zestawienie energii cumowania otrzymanej metodami analitycznymi oraz metodą symulacyjną

Fig. 2. Mooring energy for analytical and simulation methods

Wnioski

1. W metodzie PIANC uzyskana wartość nie jest wystarczająca do zachowania bezpieczeństwa podczas manewru cumowania. Tym samym urządzenia odbojowe dobierane tą metodą nie miałyby parametrów odpowiadających rzeczywistym wymaganiom nabrzeża.
2. W metodzie wg „Zaleceń ...” urządzenia odbojowe miałyby wystarczające parametry, aby zapewnić bezpieczny manewr cumowania, niemniej jednak ich właściwości nie byłyby wykorzystane całkowicie.
3. Im większa energia absorbowana tym większa jest głębokość urządzenia odbojowego (wielkość urządzenia wystająca w stronę wody) niektórych typów urządzeń odbojowych. Według Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej urządzenie odbojowe powinno posiadać jak najmniejszą głębokość. Ponadto głębokość urządzenia odbojowego może być ograniczona zasięgiem urządzeń przeładunkowych zamontowanych na nabrzeżu.
4. Wraz z wielkością energii absorbowanej przez urządzenie odbojowe wzrastają koszty utrzymania, w związku z tym metoda określania energii cumowania, zawyżająca rzeczywistą jej wartość powoduje nieuzasadniony wzrost kosztów, a tym samym nie spełnia kryterium ekonomicznego.

Literatura

1. *Analiza nawigacyjna dla przebudowanego Nabrzeża Górników w porcie handlowym Świnoujście,* praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 2000.
2. *Analiza możliwości zastosowania odbojnic korytkowych typu Milanówek na nabrzeżu Górników w Porcie Świnoujście,* praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 2001.
3. *Badania eksploatacyjne urządzeń odbojowych typu Milanówek na nabrzeżach Portowców i Chorzowskim*, praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 1999.
4. Dziennik Ustaw RP Warszawa dnia 6 sierpnia 1998 r. Nr 101, Rozporządzenie 645 MTGM z dnia 01.06.1998 r. „w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie".
5. *Fentek Marine Fendering Systems*, materiały firmowe, FENTEK Marine Systems GmbH, Hamburg.
6. Guziewicz J., *Analiza statystyczna manewrów cumowania statku w zakresie absorbowanej energii kinetycznej uderzenia statku w nabrzeże*, Zeszyty Naukowe nr 48, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 1995.
7. Mazurkiewicz B., *Zalecenia do projektowania morskich budowli hydrotechnicznych*, Politechnika Gdańska Katedra Budownictwa Morskiego, Gdańsk 1997.
8. *Możliwość zastosowania elastomerowych odbojnic korytkowych produkowanych przez ZPTS w Milanówku na modernizowanym nabrzeżu Portowców w Świnoujściu*, praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 1998.
9. *Obciążenia nabrzeży od cumujących statków. Dobór i rozmieszczenie urządzeń odbojowych*, praca naukowo-badawcza, Biuro Projektów Budownictwa Morskiego, Szczecin 1991.
10. *Określenia na podstawie badań symulacyjnych maksymalnych parametrów statków mogących bezpiecznie wchodzić przy danych warunkach do portu Świnoujście (Nabrzeże Hutników),* praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 1995.
11. *Określenia na podstawie badań symulacyjnych maksymalnych parametrów statków mogących bezpiecznie wchodzić przy danych warunkach do portu Świnoujście (Nabrzeże Chemików),* praca naukowo-badawcza, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 1997.
12. Report of the International Commission for Improving the Design of fenders systems; Supplement to PIANC bulletin N° 45 (1984).

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Bolesław Mazurkiewicz
dr hab. inż. Wiesław Galor, prof. AM

Adres Autorki

mgr inż. Monika Król
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin