

**ZESZYTY NAUKOWE NR 3(75)
AKADEMII MORSKIEJ
SZCZECIN 2004**

PRACE WYDZIAŁU Nawigacyjnego

Dorota Łozowicka

**Analiza parametrów wpływających na przebieg
ewakuacji ludzi ze statków pasażerskich**

Słowa kluczowe: *statek pasażerski, bezpieczeństwo, ewakuacja, pożar*

Autorka analizuje zagadnienia związane z ewakuacją ludzi statku w sytuacjach awaryjnych. Zwraca szczególną uwagę na statki pasażerskie, ze względu na ich aranżację pomieszczeń i liczbę ewakuujących się osób. Omówione zostają najgroźniejsze sytuacje awaryjne na statkach wymagające ewakuacji. Analizie poddano parametry wpływające na czas ewakuacji i prędkość poruszania się ludzi, ze szczególnym uwzględnieniem warunków pożaru na statku.

**Analysis of Parameters Affecting Evacuation
from Passenger Ships**

Keywords: *passenger ship, evacuation, safety, fire*

The author analyses the problems associated with people's evacuation from the ship in an emergency situation, especially passenger ships because of their arrangement and number of passengers. The state of the art connected with the influence of different parameters on people, their reactions, behaviour and evacuation process is presented. Especially the case of fire growth is taken under consideration. This knowledge could be useful for interior designers in choosing safety furnishing, researchers who analyse the evacuation process when the fire spreads

1. Wstęp

Rejsy statkiem jako sposób podróżowania były praktykowane jeszcze 200 lat temu tylko w razie konieczności. Dopiero w połowie XIX wieku nowe technologie uczyniły te podróże szybszymi i bezpieczniejszymi. Jednakże do dnia dzisiejszego istnieje wiele nierozwiązanych problemów w zakresie technicznego bezpieczeństwa statków. Świadczą o tym przytrafiające się co jakiś czas katastrofy statków pasażerskich.

Do najgroźniejszych sytuacji awaryjnych wymagających ewakuacji pasażerów ze statku możemy zaliczyć utratę stateczności prowadzącą do zatonięcia jednostki; pożar, który w porównywalnym czasie może spowodować utratę statku; kolizję związaną z utratą pływalności; wejście na mieliznę czy zatonięcie spowodowane złymi warunkami pogodowymi.

W historii żeglugi światowej XIX i XX wieku odnotowano szereg spektakularnych wypadków morskich z licznymi ofiarami. Do największych można zaliczyć zatonięcie „Titanica” w 1912 roku oraz „Empress of Ireland” w 1914 roku, czy w czasach współczesnych zatonięcie statku „Dona Paz” w 1987 roku w wyniku zderzenia ze zbiornikowcem i pożaru. Również w ostatnich latach miały miejsce katastrofy morskie z licznymi ofiarami w ludziach. Pożar może być jednym z najniebezpieczniejszych i najszybciej rozwijających się zagrożeń, które mogą zmusić pasażerów do ewakuowania się ze statku. Prędkość rozprzestrzeniania się produktów pożaru, a w szczególności dymu warunkuje czas dostępny na ewakuację ludzi. W przypadkach kolizji statku czas, po którym statek tonie, warunkujący przeprowadzenie akcji ewakuacyjnej, zależy od wielu czynników i w skrajnych przypadkach może wynosić zaledwie kilka minut (tabela 1).

Tabela 1

Przykładowe czasy zatonięcia statków pasażerskich
Examples of passenger ships' sinking times

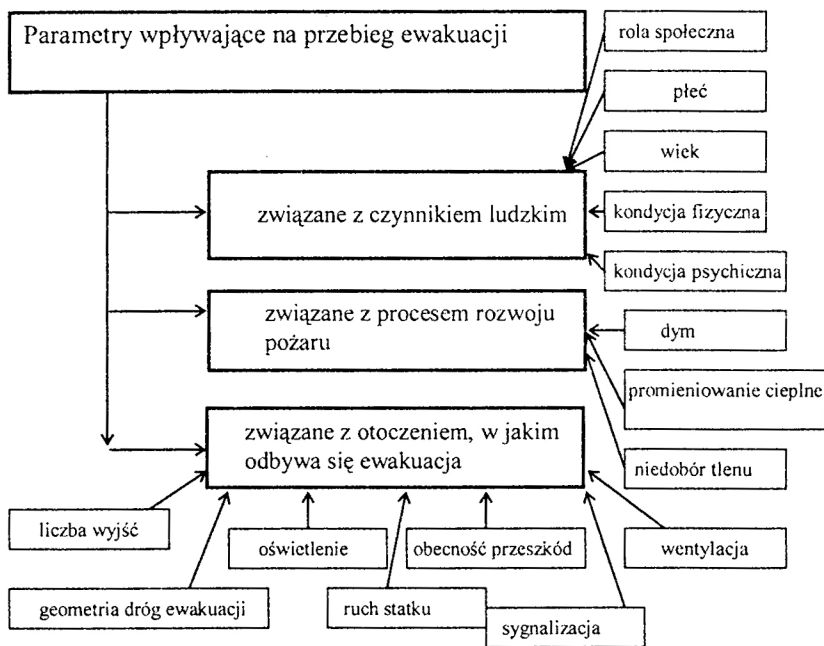
Lp.	Statek	Przyczyna zatonięcia	Czas zatonięcia
1.	Jupiter	Kolizja	40 minut
2.	Maiku	Kolizja	3 godziny
3.	Andrea Doria	Kolizja	12 godzin
4.	Michail Lermontov	Zderzenie ze skałą	5 godzin
5.	Admiral Nakhimov	Kolizja	8 minut
6.	Royal Pacific	Kolizja	10 – 15 minut
7.	Empress of Ireland	Kolizja	14 minut

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7].

Niezbędne jest analizowanie ewentualnej ewakuacji już na etapie projektowania wstępnego statków, co pozwoli na odpowiednią aranżację rozkładu dróg ewakuacji, która umożliwi opuszczenie jednostki przez pasażerów w dostępnym do przeprowadzenia akcji ewakuacyjnej czasie. Do przeprowadzenia analiz i symulacji, które przybliżyłyby rzeczywisty proces ewakuacji istnieje konieczność poznania parametrów wpływających na jej przebieg.

Parametry decydujące o tym, w jaki sposób i z jaką prędkością przemieszczają się będą ludzie podczas procesu ewakuacji ogólnie można pogrupować na:

- związane z czynnikiem ludzkim [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11];
- związane z procesem rozwoju pożaru [3, 6, 8, 12];
- związane z otoczeniem, w jakim odbywa się ewakuacja [4, 13] (rys 1).



Rys. 1. Parametry wpływające na przebieg ewakuacji

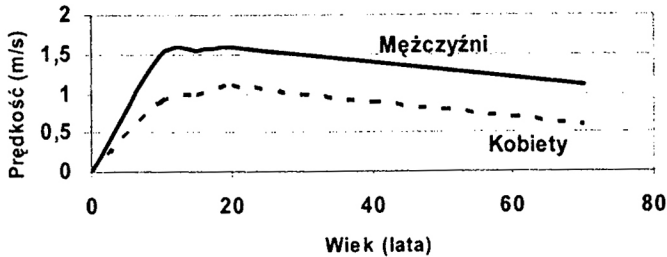
Fig. 1. Influence of different parameters on the evacuation process

2. Parametry związane z czynnikiem ludzkim

Prędkość poruszania się ludzi zależy od ich indywidualnych predyspozycji fizycznych i psychicznych. Dobrym sposobem na poznanie czynnika ludzkiego wpływającego na sprawność ewentualnej ewakuacji, przede wszystkim w wa-

runkach pożaru, jest studiowanie zachowania osób, które miały w swoim życiu okazję uczestniczyć w akcji ewakuacyjnej. Ludzie ci są pierwszymi świadkami, potrafią łatwo opisać swoje odczucia i reakcje. Uzyskane od nich informacje pozwalają poznać panujące warunki, zrozumieć i wyjaśnić pewne typy zachowań.

Maksymalna prędkość przemieszczania się osób po korytarzach w zależności od płci i wieku (rys. 2).



Rys. 2. Prędkość przemieszczania się osób w zależności od wieku i płci [1]
 Fig. 2. Walking speed as a function of age and gender

Dla każdej populacji osób, w zależności od ich cech fizycznych, ich prędkość przemieszczania się może zostać przedstawiona jako statystyczny rozkład jednorodny posiadający wartości minimalne, maksymalne i średnie.

W ostatnich latach tematyką zachowania ludzi w warunkach pożaru zajmowano się w wielu ośrodkach badawczych na świecie [2, 9, 10]. W szczególności badano w jaki sposób ludzie dostrzegają pożar, jaka jest ich reakcja na alarm pożarowy oraz jakich dróg ewakuacji używają. Zauważono, że najczęściej ludzie wybierają drogę, której używają zazwyczaj. Interesujące jest to, że bezpieczniejsza droga jest preferowana od krótszej. Przeprowadzono szereg ankiet wśród ofiar pożarów, wykorzystując wyniki badań do tworzenia i weryfikacji modeli komputerowych do analiz czasu ewakuacji. Ustalono zależność pomiędzy ewakuacją, a takimi psychologicznymi czynnikami jak: komunikacja, postrzeżenie, zrozumienie, oszacowanie i decydowanie.

3. Parametry związane z rozwojem pożaru

Bardzo ważną rolę w ewentualnym spowolnieniu procesu ewakuacji, jak zauważone zostało przez wielu niezależnych badaczy, odgrywa występowanie utrudnionych warunków podczas pożaru.

Obecność pożaru wpływa na człowieka poprzez dym, promieniowanie ciepłe, czy też niedobór tlenu. Może to być wpływ fizyczny lub psychologiczny. Czynniki te wpływają na bezpieczeństwo człowieka, mogą utrudniać lub uniemożliwiać ewakuację i stanowią bezpośrednie zagrożenie zdrowia i życia ludzkiego.

Dym jest krytycznym czynnikiem w pożarze. Jego wpływ na zachowanie ludzi oraz ich zdrowie i życie zależy od widzialnych i niewidzialnych składników dymu. Widzialny dym ma różny wpływ na ludzi w zależności od wielu czynników, takich jak chociażby znajomość otoczenia, stan emocjonalny, możliwości fizyczne. Do jego wpływu fizycznego należy obniżenie widzialności oraz drażnienie i działanie toksyczne spowodowane wdychaniem cząstek dymu. Drażnienie oczu przez dym powoduje dyskomfort. Cząstki zbyt duże, aby nimi oddychać mogą być połknięte, zatykają nos i usta. Mogą zawierać drażniącą warstwę aldehydów i kwasów. Dym może mieć również wpływ psychologiczny poprzez wywoływanie strachu.

Na podstawie badań [5, 12] można stwierdzić, iż obecność dymu jest bezpośrednio związana z zauważeniem zagrożenia. Mobilizuje ona do ucieczki. Pierwsze systematyczne badania zachowania się w pożarze w oparciu o ankiety przeprowadzone zostały wśród ofiar pożarów, aby uzyskać szczegółowe informacje o ich reakcjach. Brano pod uwagę takie elementy wpływające na indywidualny przebieg ewakuacji jak zadymienie, ale też znajomość układu korytarzy, pięć i wiek osób oraz porę dnia. Badano czy ludzie podjęli akcję gaszenia pożaru, czy też zajęli się tylko i wyłącznie ewakuowaniem się. Studiowano problem zachowania się pod wpływem silnego stresu, oraz podjęto próby wyłonienia nieoczekiwanych zachowań. Uzyskane wyniki pokazują, że kobiety ewakuują się szybciej niż mężczyźni, którzy mają skłonność do podejmowania walki z pożarem. Jeżeli ludzie mają świadomość, że drogi ewakuacji istnieją i są drożne, ewakuują się wolniej, gdyż czują się mniej zagrożeni przez pożar. Pewien wpływ mają też uprzednie doświadczenia ewakuujących się osób. Osoby, które brały już kiedyś udział w podobnym zagrożeniu wierzą, że mogą uniknąć niebezpieczeństwa. Zachowanie podczas pożaru jest związane ze społeczną rolą człowieka. To sugeruje, że ewakuacja nie jest irracjonalną i paniczną odpowiedzią ludzi poddanych stresowi.

Przeprowadzono również badania dotyczące wpływu dymu, a zwłaszcza jego niewidzialnej części (czyli gazowych produktów spalania) na zdrowie i życie człowieka. Najbardziej niebezpieczną substancją jest tlenek węgla (CO), który wydzielą się w dużych ilościach podczas pożaru. Jest on powodem połowy przypadków śmiertelnych wśród ofiar pożarów, a w połączeniu z innymi czynnikami przyczynia się do kolejnych 30% zgonów. Tlenek węgla wypiera tlen z układu krwionośnego człowieka poprzez łączenie się z hemoglobina. Jest tym bardziej groźny, gdyż nawet niewielkie jego ilości mogą być śmiertelne. W przypadku, gdy 30% hemoglobiny zawartej we krwi zostanie wskutek zatrucia zastąpione przez karboksyhemoglobinę (COHB), zdolność ludzi do ewakuowania się znacznie się obniża. Przy 50-60% zawartości COHB pojawiają się różne objawy, a nawet śmierć [3, 8].

Węgiel jako pierwiastek jest głównym składnikiem większości tworzyw sztucznych. Z tego powodu w produktach spalania większości tworzyw sztucznych występuje CO jako produkt niecałkowitego spalania. Badania emisji tlenu węgla wykazują znaczny jego udział w produktach rozkładu termicznego i spalania różnych materiałów.

Niemniej groźne są jednak również inne produkty pożaru, takie jak metale toksyczne, lotne kwasy i drażniące substancje, jak np. cyjanki.

Lotny HCl jest gazem nie tylko powodującym korozję przewodów elektrycznych, ale również agresywnie oddziałującym na drogi oddechowe człowieka. W zetknięciu z gałką oczną tworzy kwas, który powoduje ból i łzawienie, co zmniejsza widzialność. Do oślepiających gazów należy także amoniak. Gazy te powstają przy rozkładzie materiałów uodparnianych ogniowo przez wprowadzenie do ich struktury chemicznej pierwiastków z grupy chlorowców. Jako przeciwpalne składniki stosuje się np. brom, jod, fluor.

Do gazów hipnotyzujących i narkotycznych można zaliczyć ketony podrażniające centralny system nerwowy i narządy ruchu. Obniżają one świadomość i możliwość ucieczki.

Niektóre z tlenków azotu wyzwalane podczas spalania związków organicznych (warzywa, części zwierząt, wyroby z naturalnej skóry lub wełny) nie mają zapachu i ofiary są nieświadome, że ulegają zatruciu. Wchodzą one, podobnie jak CO, w związku z hemoglobina powodując niedotlenienie i śmierć.

W pożarze MGM Grand Hotelu (Las Vegas) w 1980 roku ludzie nie spalili się, ale zginęli z powodu toksycznego dymu. 85 osób zginęło i około 650 zostało rannych, z czego 75 osób zmarło w wyniku zatrucia tlenkiem węgla. Dane te uzyskano na podstawie analizy krwi ofiar pożaru. Stężenie CO było analizowane w zależności od miejsca znalezienia ofiary. Większość ofiar znaleziono w pobliżu wind, w pokojach blisko wind, co sugeruje, że tutaj właśnie wystąpiło największe stężenie toksycznych produktów pożaru. Szyby wind i klatki schodowe są zazwyczaj główną drogą, którą rozprzestrzenia się dym.

Galea [6] przeprowadzał eksperymentalną ewakuację pociągu w obecności nietoksycznego dymu. Na podstawie wyników tego doświadczenia można stwierdzić, że dym silnie ogranicza widzialność i utrudnia poruszanie się. Jego wpływ na bezpieczną ewakuację silnie zależy od znajomości otoczenia. Nieznajomość dróg ewakuacji powoduje utratę orientacji. Jeżeli dodatkowo uwzględniliby się toksyczne działanie dymu, staje się on bardzo niebezpiecznym czynnikiem mającym wpływ na prawidłowy i bezpieczny przebieg ewakuacji ludzi w przypadku zagrożenia pożarowego.

Kolejnym parametrem decydującym o prędkości poruszania się człowieka jest wysoka temperatura otoczenia, a także ekspozycja na promieniowanie cieplne, które jest jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących dynamikę rozwoju pożaru. W przypadku promieniowania cieplnego graniczna wartość

strumienia ciepła na jednostkę powierzchni (w tym skóry), przy której nie występuje ból, wynosi $2,5 \text{ kW/m}^2$ [8].

Wpływ temperatury na organizm człowieka jest zależny od czasu, w którym człowiek jest narażony na działanie gorąca oraz od wilgotności powietrza (większa wilgotność wzmacnia efekt cieplny). Jest to uzależnione dodatkowo od ubioru człowieka. Temperatura powyżej 44°C może spowodować poparzenia skóry. Przy 50°C mogą wystąpić ponadto poważne dolegliwości dróg oddechowych. Temperatura rzędu 65°C utrudnia poruszanie się. Śmierć spowodowana hipertermią może nastąpić w temperaturze powyżej 100°C .

Najpoważniejszymi dolegliwościami spowodowanymi przez działanie wysokiej temperatury i promieniowania cieplnego (także aktywnych substancji chemicznych) są oparzenia, czyli uszkodzenia tkanek.

Podczas wystąpienia pożaru jednym z efektów jest obniżenie zawartości stężenia tlenu w powietrzu, gdyż zostaje on zużywany w dużych ilościach w procesie spalania.

Drogi oddechowe oraz system nerwowy człowieka są przystosowane do funkcjonowania przy około 21% stężeniu tlenu w powietrzu. Zmniejszenie stężenia tlenu powoduje irracjonalne zachowywanie ludzi. Szczególnie narażeni są ludzie starsi chorujący na arteriosklerozę. Niedobór tlenu może być istotnym czynnikiem wpływającym na bezpieczną ewakuację ludzi, szczególnie wtedy, gdy przebiega ona w pomieszczeniach zamkniętych.

4. Parametry związane z otoczeniem

Kolejną grupą parametrów wpływających na sprawną ewakuację są elementy związane z otoczeniem, w jakim się ona odbywa.

Czynniki zapobiegające powstawaniu paniki wśród ewakuujących się osób, są następujące:

- odpowiednia liczba wyjść,
- odpowiednie oświetlenie i system sygnalizacji,
- odpowiednia wentylacja.

Na podstawie danych uzyskanych z badań przeprowadzonych w obiektach lądowych można przyjąć następujące wartości prędkości poruszania się osób po drogach ewakuacyjnych oraz specyficznego przepływu (czyli liczby ewakuujących się osób przypadającej na jednostkę czasu i jednostkę szerokości drogi ewakuacyjnej) w zależności od ich zagęszczenia na drogach ewakuacji (tabela 2).

Przenosząc wyniki badań dotyczących poruszania się ludzi w obiektach lądowych do warunków morskich należy uwzględnić dodatkowo wpływ czynników wynikających z przebywania w tak specyficznym środowisku, jakim jest

statek. Uwzględnić należy przede wszystkim ruch statku na fali, i co za tym idzie, wpływ kołysania na prędkość człowieka.

Tabela 2

Wartości specyficznego przepływu osób i ich prędkości
Values of specific flow and speed

Rodzaj drogi ewakuacji	Specyficzny przepływ (osoba/(m·s))	Prędkość osób (m/s)
Schody (w dół)	0	1
	0,54	1
	1,1	0,55
Schody (w górę)	0	0,8
	0,43	0,8
	0,88	0,44
Korytarz	0	1,2
	0,65	1,2
	1,3	0,67

Źródło: SFPE Fire Protection Engineering Handbook, 2nd edition, NFPA 1995

Wpływ kołysania statku na prędkość przemieszczania się pasażerów badał Bles [4]. Przy występowaniu 20 stopniowego kąta nachylenia pokładu statku prędkość ludzi zmniejsza się o około 35% przy ruchu w górę i o 15% przy ruchu w dół.

Obecnie w laboratorium Fleet Technology's Kanata (Wielka Brytania) przeprowadza się badania ruchu ludzi z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego symulatora SHEBA. Pierwsze testy z udziałem setki ochotników w różnym wieku zostały wykonane w czerwcu 2003 roku. Symulator jest używany do pomiarów związanych z poruszaniem się człowieka na typowym korytarzu na statku, po schodach w górę i w dół, przy kącie nachylenia do 22°. Rezultaty badań zostaną w przyszłości wykorzystane przez naukowców z Uniwersytetu Grenwich do stworzenia nowej generacji programu do szacowania czasu ewakuacji EXODUS.

Wyniki eksperymentów dotyczących prędkości poruszania się ludzi oraz ich jednostkowego przepływu w warunkach przechyłu statku, a także wynikające z nich propozycje doboru współczynników korygujących przedstawił Yoshida [13]. Badał on również przemieszczenie się pasażerów w obecności takich przeszkód, jak drzwi oraz poruszający się w przeciwnych kierunkach członkowie załogi.

5. Podsumowanie

Istniejący stan wiedzy pozwala na stwierdzenie, że duże postępy poczyniono w kwestii poznania czynnika ludzkiego opierając się na psychologii zachowania się człowieka. Usystematyzowano pewne typy zachowań podczas procesu ewakuacji, co pozwoliło na dokładniejsze szacowanie czasu ewakuacji. W dalszym ciągu prowadzone są badania dotyczące ruchu ludzi w różnych warunkach w tym, w przypadku występowania przechyłu statku oraz warunków rozprzestrzeniającego się pożaru. Większość aktualnie prowadzonych prac skupia się na komputerowym symulowaniu ruchu ludzi oraz przebiegu ewakuacji. W opracowywanych modelach dąży się do uwzględniania jak największej liczby czynników mogących mieć wpływ na czas ewakuacji, w szczególności zagadnień związanych z czynnikiem ludzkim.

Modele do obliczeń czasu ewakuacji powinny brać pod uwagę omówione parametry, które mają wpływ na prędkość poruszania się ludzi:

- warunki środowiska, w jakim odbywa się ewakuacja (kotłowania statku, zadymienie itp.),
- obecność przeszkód,
- czynnik ludzki (wiek, płeć, przeszkolenie, znajomość otoczenia, kondycja fizyczna itp.).

Poznanie i uwzględnienie w dalszych analizach powyższych czynników umożliwia tworzenie dokładniejszych modeli czasu ewakuacji, ułatwiających projektowanie bezpieczniejszych systemów ewakuacyjnych.

Literatura

1. Ando K., Ota H., Oki T., *Forecasting the flow of people*, Railway Research Review, Vol. 45, p. 8-14, 1988.
2. Benthorn L., Frantzieh H., *Fire alarm in a public building: how do people evaluate information and choose an evacuation exit?* Fire and Materials, Volume 23, Issue 6, s. 311-315, November/December 1999.
3. Birky M., *The progress report on smoke inhalation injury*, Sixth Panel Meeting on Fire Research and Safety, Tokyo, 1982.
4. Bles W., Nooy S.A.E., Boer L.C., *Influence of ship listing and ship motion on walking speed*, Paper prepared for 46th IMO Session of Sub-Committee on Fire Protection, November 2001.
5. Bryan J. L., *A review of the examination and analysis of the dynamic of human behaviour in the fire at the MGM Grand Hotel, Clark Country, Nevada, as determined from a selected questionnaire population*, Fire Safety Journal 5, s. 233 - 240, 1983.

6. Galea E.R., Gwynne S., *Estimating the flow rate capacity of an overturned rail carriage end exit in the presence of smoke*, Fire and Materials, Volume 24, Issue 6, s. 291 – 302, November/December 2000.
7. Hook N., *Maritime Casualties 1963-1996*, Lloyd's Press, 1997.
8. Meacham B.J., *Integrating human factors issued into engineered fire safety design*, Fire and Materials, Volume 23, Issue 6, s. 273 – 279, 1999.
9. Proulx G., *Occupant response during a residential high rise fire*, Fire and Materials Volume 23, Issue 6, s. 317 – 323, November/December 1999.
10. Sekizawa A., Ebihara M., Notake H., Kubota K., Nakano M., Ohmiya Y., Kaneko H., *Occupants' behaviour in response to the high-rise apartments fire in Hiroshima City*, Fire and Materials, Volume 23, Issue 6, s. 297 – 303, November/December 1999.
11. SFPE Fire Protection Engineering Handbook, 2nd edition, NFPA 1995.
12. Wood P. G., *A survey of behaviour in fires*, Fire and Human Behaviour, edited by John Wiley & Sons, Ltd, 1980.
13. Yoshida K., Murayama M., Itakaki T., *Study on evaluation of escape route in passenger ships by evacuation simulation and full-scale trails*, INTERFLAME, 2001.

Recenzent

prof. dr hab. inż. Tadeusz Szelangiewicz

Adres Autora

mgr inż. Dorota Łozowicka

Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Nawigacji Morskiej
ul. Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin
e-mail: dorotalo@am.szczecin.pl