

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

---

**EXPLO-SHIP 2004**

---

Leszek Smolarek

**Analiza funkcji ryzyka  
dla pneumatycznych tratw ratunkowych**

Słowa kluczowe: funkcja ryzyka, wywrotka, tratwa ratunkowa, wektor czynników zewnętrznych, wektor stanów tratwy

*W warunkach sztormowych tratwa podlega dynamicznym oddziaływaniom środowiska morskiego czyli uderzeniom wiatru, fali oraz zmianom nachylenia fali. Wstępna analiza zachowań tratw w warunkach sztormowych wskazuje na konieczność zastosowania modeli probabilistycznych w celu określenia wpływu dynamicznych warunków morskich na stateczność tratw. W przypadku analizy probabilistycznej niezbędne jest rozpatrzenie funkcji ryzyka.*

**The Risk Function Analysis of Inflatable Life Raft**

Key words: risk function, capsizing, life raft, vector of load conditions, vector of assumed situation

*During a storm the life raft is subject to dynamical wind and wave forces. The probabilistic evaluation of the life raft safety is closely connected with random events and values of hydrological and meteorological conditions and the raft load. It is necessary to obtain the risk function of raft safety against capsizing.*

## Wstęp

Wypadki statków na morzu występowały od początku istnienia floty i występują do dzisiaj. Dlatego niezbędne jest posiadanie odpowiednich środków ratunkowych. Tratwa ratunkowa jest powszechnie wykorzystywanym środkiem ratunkowym ze względu na niskie koszty a także możliwość zapakowania w metalowy kontener, zajmujący stosunkowo mało miejsca w porównaniu z wymiarami tratwy napompowanej i zapewniający tratwie ochronę przed wpływem agresywnych czynników środowiska morskiego. Tratwy ratunkowe powinny dać się zastosować w dowolnych warunkach pogodowych, zapewniając ochronę rozbitkom. W przypadku katastrof nagłych tratwa napełniana na wodzie jest jedynym zbiorowym środkiem ratunkowym. Jednak w czasie wystąpienia silnego sztormu dość często tratwy ulegają różnego rodzaju „awariom”, nie spełniając swej podstawowej roli. Niestety, jak pokazują wypadki nie zawsze jest to prawdą. Analiza wykorzystania tratw ratunkowych, na przykładzie katastrof morskich promów „Jan Heweliusz” oraz „Estonia”, oparta głównie na zeznaniach świadków naocznych, którzy przeżyli katastrofy [10] wskazuje, że:

- dużo tratw wywracało się do góry dnem z powodu działania silnego wiatru, niektóre z nich ułożone w pozycji do góry dnem nie zmieniały swojego położenia w wyniku działających fal i wiatru. Z zeznań świadków ratowników śmigłowców tratwy ratunkowe widziano i odnaleziono jak dryfowały w pozycji do góry dnem;
- w trudnych warunkach morskich, na skutek wznoszenia i opadania na fali i silnego wiatru osoby znajdujące się w tratwie ponownie wypadały do wody, z czym wiązało się ponowne obsadzanie tratw;
- wystąpiły trudności w wypełnieniu się tratw gazem CO<sub>2</sub>, co powodowało ich niecałkowite otwarcie się.

### 1. Czynniki wpływające na bezpieczeństwo tratwy

Jednym z podstawowych zagrożeń dla rozbitków znajdujących się w tratwie jest jej wywrotka. Wystąpienie tego zdarzenia jest ściśle związane z:

- warunkami hydrometeorologicznymi,
- ilością i rozmieszczeniem rozbitków w tratwie,
- geometrią tratwy (kształtem i wielkością),
- charakterystyką statecznościową tratwy (liczba i wielkość kieszeni, dryfkotwa).

Czynniki wpływające na stateczność tratwy można podzielić na dwie grupy:

- czynniki związane ze środowiskiem,
- czynniki związane z „typem” i „załadunkiem” tratwy.

Do pierwszej grupy zaliczymy czynniki hydrometeorologiczne. Można je opisać za pomocą parametrów takich jak:

- średnia prędkość wiatru,
- współczynnik porywistości wiatru,
- odchylenie kierunku wiatru od kierunku fali,
- wysokość znacząca fali,
- okres fali (lub długość fali),
- prędkość dryfu tratwy,
- dodatkowe siły zewnętrzne (np. szarpnięcia dryfkotwy).

Do drugiej grupy należą:

- parametry geometryczne tratwy (wielkość, kształt),
- stateczność statyczna (ramię prostujące, moment prostujący),
- liczba i rozmieszczenie rozbitków,
- liczba, wielkość i kształt kieszeni balastowych,
- wielkość i kształt dryfkotwy.

Niektóre z tych czynników mogą przyjąć, z takim samym prawdopodobieństwem, dowolną wartość z ich dopuszczalnej przestrzeni stanów. Nie można jednak ich wartości w przyszłości określić w sposób deterministyczny. Zmiany stateczności tratwy są wynikiem wpływu losowych czynników, dlatego musimy je rozpatrywać jako proces stochastyczny. Stan procesu można opisać za pomocą dwóch wektorów [1]:

- wektora warunków zewnętrznych  $S$ ,
- wektora stanu tratwy  $L$ .

Stan zagrożenia tratwy opisany jest funkcją  $\lambda$  zależną od  $\lambda = \lambda(S, L)$ .

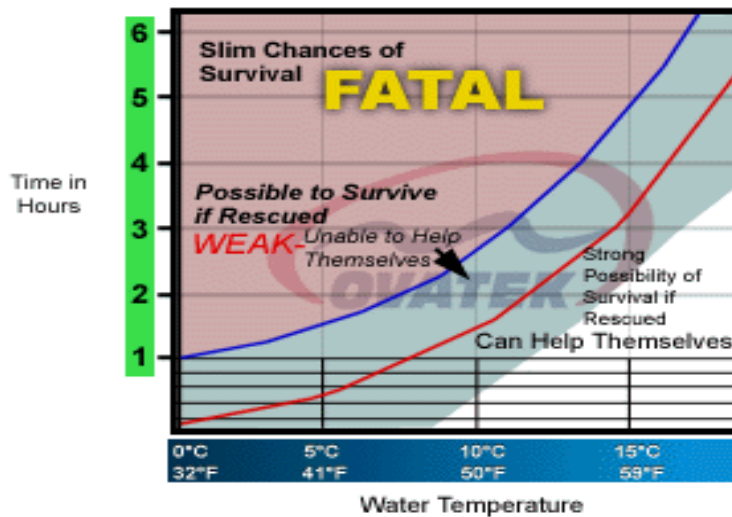
## **2. Model probabilistyczny**

W przypadku tratwy, inaczej niż w przypadku statku, wywrotka nie oznacza ostatecznej katastrofy (awarii systemu), ale tylko wystąpienie zagrożenia dla rozbitków. Po wywrotce tratwa może zostać odwrócona przez rozbitków lub też wyprostować się samodzielnie.



Rys. 1. Tratwa samoprostująca Viking 50  
 Fig. 1. VIKING 50 person self-righting liferaft

Można przyjąć, że każda następna wywrotka charakteryzuje się większym (niż poprzednia) prawdopodobieństwem wystąpienia zagrożenia dla rozbitków.



Rys. 2. Wpływ temperatury wody na sprawność i szanse przeżycia rozbitka [9]  
 Fig. 2. Average predicted survival times in water of different temperatures [9]

Spowodowane to jest zmęczeniem oraz wychłodzeniem rozbitków. Dlatego w przypadku wywrotki i wypadnięcia rozbitka z tratwy jego szanse na powrót do tratwy są coraz mniejsze. W trakcie wywrotki tratwy może nastąpić także utrata części wyposażenia.

Niezawodność techniczna systemu jest uzależniona od niezawodnej pracy jego podsystemów (komponentów, elementów). W przypadku tratwy ratunko-

wej systemem nazywamy układ składający się z komór wypornościowych, namiotu, dryfkotwy, wyposażenia.



Rys. 3. Tratwa ratunkowa jako system  
*Fig. 3. Open sea liferafts feature*

Niezawodność bezpieczeństwa każdego obiektu (systemu lub też jego komponentów) jest wyznaczona przez czas funkcjonowania tego elementu do chwili jego przejścia do stanu zawodności bezpieczeństwa. Czas ten jest zmienną o charakterze losowym. Jedną z podstawowych charakterystyk tej zmiennej losowej jest jej dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa. Wskaźnik ten jest nazywany zawodnością bezpieczeństwa systemów.

Miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo spełnienia przez system wymagań w zadanym czasie i w określonych warunkach.

Miarą zawodności bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo zniszczenia systemu w całości lub jego istotnej części na skutek zewnętrznych jak i wewnętrznych czynników.

Do obliczenia prawdopodobieństwa niezawodności bezpieczeństwa pracy urządzenia wykorzystuje się zwykle funkcję ryzyka zwaną też intensywnością uszkodzeń w chwili  $t$ . Funkcja ta jest gęstością prawdopodobieństwa powstania uszkodzeń w przedziale czasu  $(t, t+\Delta t)$  pod warunkiem, że do chwili  $t$  nie było uszkodzeń.

Zakładając, że awaria dryfkotwy, uszkodzenie komór wypornościowych, zniszczenie (rozerwanie) namiotu, wywrotka tratwy może spowodować sytuację awaryjną, prawdopodobieństwo niezawodności bezpieczeństwa pracy tratwy jest iloczynem prawdopodobieństw niezawodności bezpieczeństwa pracy każdego elementu (komponentu) z osobna. W przypadku tratw ratunkowych nie ma danych umożliwiających wyliczenie funkcji intensywności uszkodzeń opartych na ilości elementów uszkodzonych czy też ilości awarii systemu.

Jako miarę zagrożenia bezpieczeństwa tratwy możemy przyjąć prawdopodobieństwo ryzyka wywrotki tratwy. Funkcję ryzyka  $\lambda(t)$  określamy jako prawdopodobieństwo wystąpienia wywrotki w ustalonej jednostce czasu. Przy tak określonej funkcji ryzyka prawdopodobieństwo niewystąpienia wywrotki w jednostkowym interwale czasowym  $T_1$  dane jest wzorem:

$$\Pr(NC) = \exp \left[ - \int_0^{T_1} \lambda(t) dt \right] \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia  $k$  wywrotek do chwili  $t$  opisane jest wzorem:

$$\begin{aligned} \Pr(IC = k) = & \binom{n}{k} [1 - \Pr(NC)]^k [\Pr(NC)]^{n-k} \cdot \exp \left[ - \int_0^{t-T_1} \lambda(t) dt \right] + \\ & + \binom{n}{k-1} [1 - \Pr(NC)]^{k-1} [\Pr(NC)]^{n-k+1} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \int_0^{t-T_1} \lambda(t) dt \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$\Pr(NC)$  – prawdopodobieństwo niewywrócenia się tratwy w jednostkowym przedziale czasowym,

$n = [t/T_1]$  – część całkowita ilorazu  $t/T_1$ .

Stan zagrożenia bezpieczeństwa tratwy ratunkowej charakteryzuje ryzyko, jakie występuje podczas jej użytkowania. Ryzyko to definiowane jest jako kombinacja prawdopodobieństwa uszkodzenia i stopnia uszkodzenia systemu czyli prawdopodobieństwa wystąpienia awarii i skutków, jakie ona spowodowała:

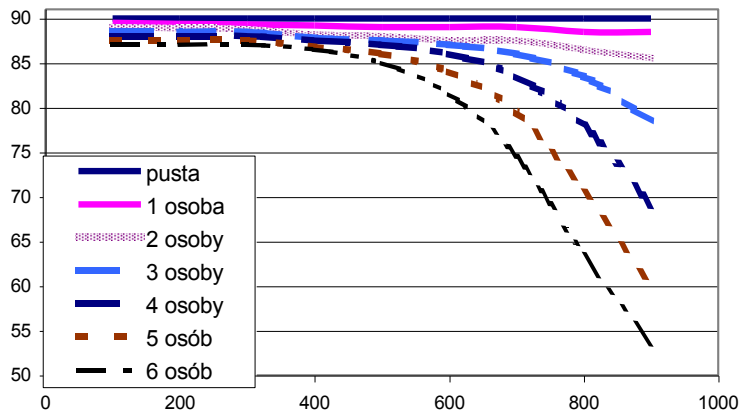
$$R = \sum_{k=1}^n \Pr(A_k) \cdot \Pr(S / A_k) \quad (3)$$

gdzie:

- $R$  – ryzyko użytkowania tratwy ratunkowej,
- $\Pr(A_k)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia  $k$ -tej awarii,
- $S$  – skutki, jakie spowoduje awaria.

### Podsumowanie

Brak jest informacji na temat ilości i przyczyn awarii tratw ratunkowych. Nie można określić czasu pracy systemu, tzn. czasu wykorzystywania tratwy jako środka ratunkowego. Tratwy są wykorzystywane w warunkach ekstremalnych (sztormy) i poddawane oddziaływaniu skrajnie trudnych warunków hydrometeorologicznych. Na awarię tratwy (wywrotkę) wpływają nie tylko czynniki hydrometeorologiczne, kształt i parametry tratwy, ale także awarie elementów systemu, np. urwanie się dryfkotwy. Parametry hydrometeorologiczne są elementami losowymi. Można je opisać przez podanie średnich wartości poszczególnych parametrów i rozkładu ich fluktuacji. Także obsada tratwy, a tym samym jej masa, jest wartością losową.



Rys. 4. Wykres zależności kąta wywrotki od przesunięcia obciążenia względem środka tratwy sześciuosobowej, przy różnej obsadzie

Fig. 4. Reduction of the life raft stability caused by weight shift

Obsada tratwy, tzn. liczba i rozmieszczenie rozbitków ma istotny wpływ na prawdopodobieństwo wywrotki tratwy.

Tratwa ratunkowa może być traktowana jako system odnawialny, tylko ze względu na awarie polegające na wywrotce tratwy.

Miarą stopnia zagrożenia rozbitków może być ryzyko wywrotki tratwy. Miara ta jest zależna zarówno od charakterystyki samej tratwy, jak też od czynników hydrometeorologicznych.

Prawdopodobieństwo wywrotki tratwy jest istotnie zależne od sekwencji zdarzeń, które do wywrotki doprowadziły. Należy rozpatrzeć scenariusze sytuacji prowadzące do wywrotki i dla każdego z nich określić jej prawdopodobieństwo (rozkład prawdopodobieństwa).

Stosowanie w nowych masowych systemach ratunkowych dużych tratew (ponad stuosobowych) stwarza potencjalne możliwości wystąpienia innych typów awarii systemu i konieczność ich uwzględnienia przy analizie ryzyka.



Rys. 5. Masowy system ewakuacji RFD

Fig. 5. RFD Marin-Ark Marine Evacuation System © copyright RFD, 2004



## Literatura

1. Belenky V. L., Sevastianov N. B., *Stability and Safety of Ships*, Elsevier, Oxford 2003.
2. Smolarek L., *An example of non-linear leeway for the life raft*, Proc. International Congress of Seas and Oceans, Szczecin-Miedzyzdroje 2001, Vol. 1.
3. Smolarek L., *Wpływ sił wiatrowych na tratwę*, Proc. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo morskie i ochrona środowiska morskiego”, Kołobrzeg 2002, Vol. 1.
4. Smolarek L., *Model of Wind Forces Acting at a Life Raft*, Proc. KONBiN 2003, Vol 1, s. 329 – 337.
5. Smolarek L., *Approximation of Life Raft Capsizing Risk Function*, Proc. KONBiN 2003, Vol 1, s. 321 – 329.
6. Smolarek L., *Modelowanie prawdopodobieństwa wywrotki tratwy ratunkowej*, Proc. II Forum Morskie „Bezpieczeństwo Morskie i Ochrona Naturalnego Środowiska Morskiego”, Kołobrzeg 2003, s. 261 – 274.
7. Smolarek L., *The Stochastic Model of Life Raft Capsizing Phenomenon*, 6<sup>th</sup> Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts University of Girona Girona, Spain, September 17–19, 2003.
8. Smolarek L., *Modeling of The Wind Generated Force Acting On The Liferaft*, Annual of Navigation 6/2003, 2003.
9. Strona internetowa [www.2001websolutions.ca](http://www.2001websolutions.ca).
10. *Final report on the mv “Estonia” disaster of 28 September 1994*, P.O.Box 800, FIN-00043 EDITA, Finland, December 1997 ESTONIA.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

## Recenzenci

prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Stanisław Gucma  
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

## Adres Autora

dr Leszek Smolarek  
Akademia Morska w Gdyni  
Wydział Nawigacji  
ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia  
[leszsmol@am.gdynia.pl](mailto:leszsmol@am.gdynia.pl)