

Dorota ŁOZOWICKA<sup>1</sup>

### **METODY SZACOWANIA PRĘDKOŚCI PRZEMIESZCZANIA SIĘ LUDZI W MODELACH EWAKUACJI ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM SPECYFIKI EWAKUACJI ZE STATKÓW PASAŻERSKICH**

*W artykule poruszone zostają problemy przemieszczania się ludzi po drogach ewakuacji w zależności od różnych czynników, ze szczególnym uwzględnieniem ewakuacji ze statków pasażerskich. Dokonany zostaje przegląd metod szacowania prędkości ludzi w komputerowych programach do modelowania ewakuacji. Omówione zostają wytyczne dotyczące obliczeń prędkości ruchu w dokumentach normatywnych IMO a także przytoczone są przykładowe formuły do kalkulacji tych prędkości.*

### **THE METHODS OF CALCULATING OF SPEED OF PERSONS IN THE MODELS OF EVACUATION ESPECIALLY FROM PASSENGER SHIPS**

*The problems of people's speed during evacuation process are considered at the paper. Especially evacuation from passenger ships is taken into consideration. Review of the methods of calculating the speed of persons in computer models is added to the paper. Additionally the IMO requirements about the estimating of the speed are described. Some example formulas for calculation of the speed are given at the paper.*

## **1. WSTĘP**

Analizy ewakuacji ludzi ze statków pasażerskich mogą stanowić dosyć poważne i skomplikowane zadanie. Problem stanowi bardzo duża liczba czynników wpływających na przebieg ewakuacji oraz specyficzne warunki związane ze środowiskiem morskim w jakim odbywa się ewakuacja. Rzetelna analiza procesu ewakuacji wymaga opracowania skomplikowanego modelu komputerowego. Istotną rzeczą jest, aby model uwzględniał jak największą liczbę czynników wpływających na proces ewakuacji, co pozwoli na uzyskanie rezultatów zbliżonych do rzeczywistości.

Modele ewakuacji opracowywane przez instytucje badawcze we współpracy z administracją morską, przemysłem i transportem różnią się w zależności od sposobu przedstawienia przemieszczania się ludzi. W większości modeli ludzie posiadają swoją

---

<sup>1</sup>Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, 70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1-2, tel: +48 91 48 09 387, e-mail: d.lozowicka@am.szczecin.pl

specyficzną prędkość (dane z badań rzeczywistych). Jednakże w sytuacjach większego zagęszczenia, prowadzącego do powstawania zatorów istnieją różne sposoby opisu ruchu ludzi.

W warunkach ograniczonego przepływu możemy rozróżnić między innymi następujące podejścia do modelowania:

- wyznaczanie prędkości i przepływu ludzi (indywidualnych osób lub populacji) w oparciu o geometrię analizowanej przestrzeni (zagęszczenie),
- ustalenie indywidualnych odległości pomiędzy ewakuującymi się osobami i ewentualnymi przeszkodami,
- obliczanie niezakłóconego przepływu a następnie uwzględnianie zakłóceń poprzez odpowiednie współczynniki.

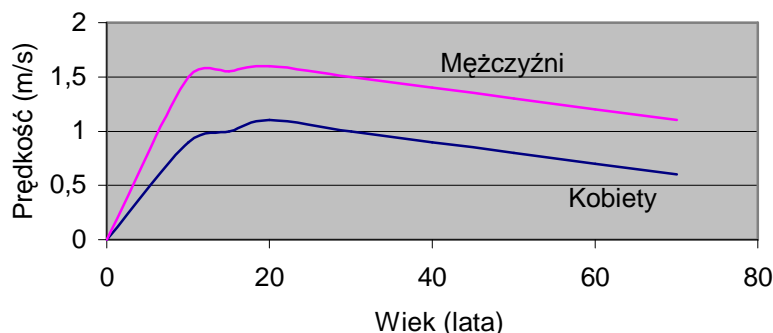
## 2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PRĘDKOŚĆ PORUSZANIA SIĘ LUDZI PO DROGACH EWAKUACJI

Na prędkość poruszania się ludzi po drogach ewakuacji wpływa szereg czynników, które ogólnie można pogrupować na związane z czynnikiem ludzkim, z otoczeniem w jakim odbywa się ewakuacja oraz wystąpieniem ewentualnego pożaru. Czynniki te zostały wyszczególnione i pogrupowane na rys.1.



Rys 1 Czynniki wpływające na prędkość poruszania się ludzi po drogach ewakuacji

Prędkość poruszania się ludzi zależy od ich indywidualnych predyspozycji fizycznych i psychicznych (np. płeć, wiek, sprawność fizyczna). Maksymalna prędkość przemieszczania się osób po korytarzach w zależności od płci i wieku, według danych opublikowanych przez [1] jest przedstawiona na rys 2.

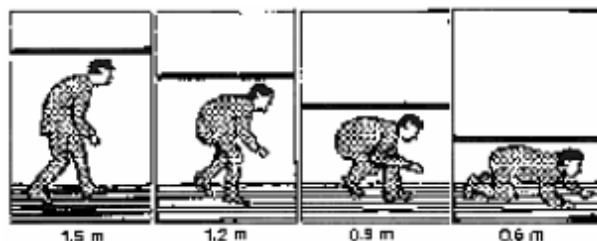


Rys 2 Prędkość przemieszczania się osób w zależności od wieku i płci [1]

Analizując przemieszczanie się ludzi podczas ewakuacji zakłada się określony kierunek ruchu. Jednakże w wyniku pewnych zakłóceń ewakuacji, często dochodzi do sytuacji, kiedy ten przepływ przestaje być uporządkowany. Jednym z czynników opóźniających ewakuację może być pojawienie się ruchu przeciwbieżnego. W [8] zdefiniowano model przemieszczania się człowieka, w którym dana osoba określona jest przez zestaw takich parametrów jak wiek, płeć i prędkość. Wartości tych parametrów dobierane są na podstawie eksperymentów. Badania eksperymentalne uwzględniały wpływ ruchu przeciwbieżnego. Prędkość ludzi zmniejszyła się aż o 30-60%.

Zakładając ewakuację ludzi w warunkach pożaru należy wziąć pod uwagę dodatkowe czynniki wpływające na prędkość uczestników ewakuacji. Pojawienie się substancji toksycznych zawartych w dymie wpływa spowalniająco na prędkość przemieszczania się, zmienia reakcje behawioralne oraz wybieranie dróg ewakuacyjnych. Efekt ograniczenia widzialności spowodowany pojawieniem się dymu również ma znaczący wpływ na prędkość poruszania się.

W [5] przedstawiono wyniki badań dotyczące prędkości poruszania się w zależności od wzrastającej warstwy podsufitowej dymu. Prędkość przemieszczania maleje w związku z koniecznością poruszania się na czworakach (rys 3).



Rys. 3 Dostępna wysokość przemieszczania się człowieka w zależności od grubości warstwy dymu [5]

Ważnym czynnikiem wpływającym na prędkość poruszania się ludzi jest ruch statku. Ruch statku między innymi wpływa na obniżenie się efektywnej szerokości dróg ewakuacyjnych ponieważ ściany „pochylają się” ku pasażerom zmniejszając efektywną powierzchnię podłogi. Ludzie muszą trzymać się poręczy, aby utrzymać równowagę. Na ten problem zwrócono uwagę w [3]. Efektywna wydajność ewakuowania się zmniejsza się do drastycznie do maksimum 2 osób idących obok siebie.

W [2] opublikowano wyniki badań dotyczące mobilności ludzi w warunkach przechyłu. Badania zostały przeprowadzone na symulatorze SMS (Ship Motion Simulator). Badania przeprowadzono dla różnych kątów przechyłu i przegłębienia oraz charakterystyk ruchu statku (nurzań, kołysań wzdłużnych i kołysań bocznych). Dodatkowo uwzględniono obecność schodów oraz zróżnicowanie populacji pod względem wieku. Badania podzielono na dwie kategorie. W warunkach  $20^\circ$  przechyłu statycznego średnia prędkość przemieszczania zmalała o około 20%. Przeciętna prędkość grupy osób w wieku powyżej 60 lat zmalała o około 15% w stosunku do pozostałych grup. Wspinanie się po schodach było o 40% wolniejsze we wszystkich grupach, dla schodów pochylonych o  $20^\circ$  w górę. Natomiast wspinanie się po schodach pochylonych w dół nie wpłynęło na prędkość ruchu ludzi. Osoby schodzące po schodach pochylonych w dół były wolniejsze o około 30%, natomiast osoby wchodzące po schodach pochylonych w górę zwolniły o około 15%. Drugą część badań stanowił wpływ kołysań poprzecznych i wzdłużnych. Dane z eksperymentu zostały przedstawione jako prędkość w funkcji amplitudy i częstotliwości kołysań. Wyniki doświadczeń wykazały, że ludzie zwalniają przy wzrastającej amplitudzie i częstotliwości kołysań bocznych. Uzyskano spadek prędkości o 15% przy częstotliwości 0.89 rad/s i amplitudzie  $10^\circ$ . Mniejszy wpływ na prędkość ruchu ma kołysanie wzdłużne gdyż przemieszczanie się w górę jest utrudnione, lecz już po chwili staje się łatwiejsze po przejściu statku w inne położenie.

Podobne rezultaty uzyskano w [12]. Posłużono się ruchomą platformą symulującą kołysania wzdłużne i boczne statku. W tabeli 1 przytoczono wyniki badań.

Tab. 1. Prędkość ruchu ludzi w eksperymencie [12]

	Cykl	Prędkość m/s
Brak ruchu platformy	-	0.90
Kołysanie wzdłużne 10°	10 s	0.73
	5 s	0.71
Kołysanie boczne 10°	10 s	0.77
	5 s	0.72

### 3. PRĘDKOŚĆ PRZEMIESZCZANIA W DOKUMENTACH NORMATYWNYCH IMO

Specjaliści z Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) opracowali dwie następujące metody analizy ewakuacji:

- Uproszczona metoda, w której rozważany jest ruch pasażerów i członków załogi jako przepływ homogenicznej masy;
- Zaawansowana metoda, w oparciu o komputerowe symulacje ruchu poszczególnych osób.

Szczegółowe wymagania dotyczące uproszczonej analizy ewakuacji na statkach pasażerskich typu ro-ro zostały zawarte w dokumencie IMO- MSC/Circ. 1033.

Prędkość przemieszczania się zależy od indywidualnej charakterystyki przepływu początkowego osób (tabela 2). Dane są uzyskane z budownictwa lądowego [9]. Obliczanie czasu przemieszczania się następuje poprzez obliczanie niezakłóconego przepływu a następnie uwzględnianie zakłóceń poprzez odpowiednie współczynniki, które uwzględniają między innymi to, że ewakuacja odbywa się w warunkach morskich.

Tabela 2 Prędkość ruchu po korytarzach i schodach w zależności od przepływu początkowego [9]

Typ drogi ewakuacji	Specyficzny przepływ [osoba/ms]	Prędkość [m/s]
Schody w dół	0	1.0
	0.54	1.0
	1.1	0.55
Schody w górę	0	0.8
	0.43	0.8
	0.88	0.44
Korytarze	0	1.2
	0.65	1.2
	1.3	0.67

W metodzie zaawansowanej przyjmuje się prędkości przemieszczania się po korytarzach podane w [6]. Są to prędkości zależne od wieku, płci i kondycji fizycznej

(tabela 30). Podana jest również prędkość w rozgraniczeniu na pasażerów i członków załogi. Podobne tabele zostały opracowane dla ruchu po schodach.

*Tabela 3 Prędkość przemieszczania się osób po korytarzach [6]*

Populacja-pasażerowie	Prędkość przemieszczania się osób po korytarzach [m/s]		
	Minimalna	Średnia	Maksymalna
Kobiety poniżej 30 lat	0,93	1,24	1,55
Kobiety 30-50 lat	0,71	0,95	1,19
Kobiety powyżej 50 lat	0,56	0,75	0,94
Kobiety powyżej 50 lat o ograniczonych zdolnościach ruchowych (dzień)	0,43	0,57	0,71
Kobiety powyżej 50 lat o ograniczonych zdolnościach ruchowych (noc)	0,37	0,49	0,61
Mężczyźni poniżej 30 lat	1,11	1,48	1,85
Mężczyźni 30-50 lat	0,97	1,3	1,62
Mężczyźni powyżej 50 lat	0,84	1,12	1,4
Mężczyźni powyżej 50 lat o ograniczonych zdolnościach ruchowych (dzień)	0,64	0,85	1,06
Mężczyźni powyżej 50 lat o ograniczonych zdolnościach ruchowych (noc)	0,55	0,73	0,91
Populacja-załoga	Prędkość przemieszczania się osób po korytarzach [m/s]		
	Minimalna	Średnia	Maksymalna
Kobiety	0,93	1,24	1,55
Mężczyźni	1,11	1,48	1,85

#### 4. SPOSOBY OBLICZANIA PRĘDKOŚCI LUDZI W MODELACH EWAKAUCJI

W większości komputerowych modeli symulujących ewakuację użytkownik programu przypisuje populacji lub poszczególnym uczestnikom specyficzną prędkość przemieszczania się. Dzieje się tak w przypadku założenia małego zagęszczenia osób na drogach ewakuacji. Problem pojawi się w chwili, gdy wystąpienia zwiększonego zagęszczenia (osoby zbliżają się do siebie). Wynikiem tego może być powstawanie zatorów i co za tym idzie spowolnienie ruchu. W modelach ten spowolniony przepływ może być uwzględniany w różnoraki sposób.

W [7] dokonano podziału modeli pod względem szacowania prędkości przemieszczania. W modelach wykorzystujących metodę prędkości skorelowanej z zagęszczeniem (np. TIMTEX, WAYOUT, Gridflow, PathFinder, Evac SIM) sposób symulacji polega na przypisywaniu prędkości i przepływu jednostkom lub całym populacjom na podstawie informacji o zagęszczeniu badanej przestrzeni.

Kolejnym sposobem modelowania jest wybór pewnych parametrów ruchu przez użytkownika programu. Wartości prędkości, przepływu i zagęszczenia są przypisywane przez użytkownika określonym przestrzeniom modelowanej struktury. Jako przykład można wymienić takie modele jak EVACNET4 czy FPETool. Użytkownik może ustalać takie parametry jak np: prędkość przemieszczania się po drogach ewakuacyjnych (w tym prędkość przemieszczania się po schodach i prędkość przepływu przez drzwi), udział osób niepełnosprawnych, prędkość najwolniejszej osoby.

W innym sposobie wykorzystana zaobserwowana prawidłowość dotycząca sposobu przemieszczania się osób w trakcie ewakuacji polegająca na tym, że ludzie mają tendencję do zajmowania przestrzeni wokół siebie, która przybiera postać okręgu (z wyjątkiem członków rodziny, którzy przemieszczają się jak najbliżej siebie). Właściwość tą wykorzystano między innymi w modelach SIMULEX, ASERI i VegAS. Każda z osób otoczona jest pewną przestrzenią (tzw. „bańka”), która umożliwia zbliżenie się do innych osób lub przeszkód tylko na pewną odległość, która używana jest do ustalania prędkości przemieszczania się osób podczas symulacji. Uwarunkowania behawioralne mogą być wprowadzane w postaci rozkładów lub indywidualnych danych wejściowych. Interesująca jest możliwość uwzględnienia osób niepełnosprawnych. Mogą być modelowane poprzez ustalenie mniejszej prędkości lub poprzez zwiększenie obszaru „bańki” celem zamodelowania powierzchni zajmowanej przez wózek inwalidzki.

W modelach z grupy tzw. „cellular automata” (PedGo, EGRESS, SGEM) każdej z komórek struktury opisującej drogę ewakuacji przyporządkowywana jest pewna wartość liczbowa (ewentualnie wartość potencjału), która warunkuje przemieszczanie się osób w określonych kierunkach. Uczestnicy ewakuacji próbują obniżyć swój potencjał wchodząc do sąsiadujących komórek struktury. Prędkościom przemieszczania się przyporządkowuje się wartość maksymalną, minimalną i średnią, oraz odchylenie standardowe celem dystrybucji pomiędzy poszczególne osoby symulacji.

ALLSAFE jest przykładem modelu, w którym dokonuje się obliczeń niczym niezakłóconego przemieszczania się osób, natomiast ostateczny wynik obliczonego czasu ewakuacji uzyskuje się poprzez dodanie lub odjęcie czasów opóźnień wynikające z takich powodów jak np. występujące systemy alarmowe, wyszkolenie załogi, nieznanostwo dróg ewakuacji lub utrudnione poruszanie się.

Niezależnie od sposobu przypisywania prędkości przemieszczania się w poszczególnych modelach ewakuacji wykorzystuje się różne formuły do kalkulacji tych prędkości. Poniżej przytoczone zostaną niektóre z metod.

W [11] wprowadzono na podstawie doświadczeń empirycznych następującą formułę:

$$V = V_0 * \rho^{-0.8} \quad (1)$$

gdzie:  $V$  - prędkość osoby,  $V_0$  - stała (1,3 m/s),  $\rho$  - zagęszczenie(osoba/m<sup>2</sup>).

Powierzchnie pochylone zostały uwzględnione w ten sposób, że prędkość redukuje się około 2% na każdy stopień pochylenia.

W [10] obliczono współczynnik  $dp$  zmniejszający prędkość w tłumie:

$$dp = \frac{\sqrt{1}}{d} \quad (2)$$

gdzie:  $d$  - zagęszczenie(osoba/m<sup>2</sup>).

Zależność pomiędzy prędkością zredukowaną  $V$  a prędkością w normalnych warunkach  $V_f$ , z uwzględnieniem tego współczynnika jest następująca:

$$V = \left[ V_f * \frac{(dp - 0,25)}{0,87} \right] \quad (3)$$

W modelu EXIT89 [4] wykorzystano następujące formuły, aby ustalić prędkości przemieszczania się ludzi w zależności od zagęszczenia  $D$  i specyfiki drogi ewakuacji:

-dla poziomych ścieżek:

$$V = 112D^4 + 380D^3 - 217D + 57 \text{ (m/min)} \quad (4)$$

- przez drzwi:

$$V_d = V * [1,17 + 0,13 \sin(6,03D - 0,12)] \text{ (m/min)} \quad (5)$$

-dla ruchu po schodach w dół:

$$V_{ds} = V * [0,775 + 0,44e^{-0,39D} \sin(5,61D - 0,224)] \text{ (m/min)} \quad (6)$$

- dla ruchu po schodach w górę:

$$V_{up} = V * [0,785 + 0,09e^{3,45D} \sin 15,7D] \text{ (m/min)} \text{ dla } 0 < D < 0,6 \quad (7)$$

$$V_{up} = V * [0,785 - 0,0e^{3,45D} \sin(7,85D + 1,57)] \text{ (m/min)} \text{ dla } 0,6 \leq D \leq 0,92 \quad (8)$$

Prędkości powyższe są ważne tylko dla ruchu ludzi w normalnych warunkach. Dla sytuacji awaryjnych prędkość wzrasta:

$$V_e = \mu_e V \quad (9)$$



gdzie:  $\mu_e=1,49-0,36D$ -dla poziomych ścieżek i drzwi,  $\mu_e=1,26$  dla schodów w górę,  $\mu_e=1,21$  dla schodów w dół.

Prędkość zmniejsza się o połowę przy asystowaniu w ewakuacji innej osobie i do 40% w przypadku wystąpienia zatorów.

## 5. WNIOSKI

W literaturze spotyka się wyniki badań dotyczące prędkości przemieszczania się ludzi podczas ewakuacji. Na prędkość poruszania się ludzi po drogach ewakuacji wpływa szereg czynników. Do najbardziej istotnych należy zaliczyć wpływ ruchu statku oraz czynnika ludzkiego. Istotne jest też zagęszczenie na drogach ewakuacji i wystąpienie ruchu przeciwbieżnego.

Dokładność stosowanych komputerowych programów symulujących przebieg ewakuacji zależy w dużej mierze od sposobu obliczania prędkości przemieszczania się populacji ludzi. Najprostsze z nich wykorzystują niezakłócony przepływ powiększony o założone współczynniki zwiększające, w modelach bardziej zaawansowanych przypisuje się specyficzne prędkości poszczególnym uczestnikom ewakuacji uwzględniając ich specyficzne cechy.

Ważną sprawą jest wykonywanie prób w pełnej skali na symulatorach ruchu (np. SHEBA, SMS), które pozwalają uzyskiwać wartości prędkości przemieszczania się szczególnie w tak specyficznym otoczeniu jakim jest statek. Należy bowiem mieć na uwadze fakt (sięgając po wyniki doświadczeń wykonywanych w warunkach lądowych), że podczas ewakuacji ze statku dochodzi szereg czynników, które dodatkowo ją spowalniają i utrudniają.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ando K., Ota H. & Oki T.: *Forecasting the flow of people*, Railway Research Review, vol. 45, pp. 8-14, 1988.
- [2] Bles W., Nooy N., Boer L. C.: *Influence of ship listing and ship motion on walking speed*, Report TNO-TM 2001 C-15. FP46/INF.3, 2001.
- [3] Boer L.C., Skjong R.: *Emergency evacuation: how better interior design can improve passenger flow*, Cruise+ferry 2001. London, 8-10 May 2001.
- [4] Fahy R.: *Exit89-an evacuation model for high-rise buildings-model description and example applications*, Fire Safety Science-proceedings of the Fourth International Symposium, pp 657-668, 1994.
- [5] Fukuchi N., Svhinoda T.: *The Risk Assessment for Safe Evacuation Based on the Escape Simulation considering Smoke Diffusion in the Event of a Marine Fire*, IMDC'03, Ateny 2003.
- [6] Galea, E.R., Gwynne, S., Lawrence, P. & Filipides, L., *Building EXODUS user guidelines manual*, University of Greenwich, 1998.
- [7] Kuligowski E.D., Peacock R.D. *A review of building evacuation models*, Technical Report 1471, National Institute of Standards and Technology, 2005.

- 
- [8] Lee D., Park J.H., Kim H.: *A study on experiment of human behaviour for evacuation simulation*, Ocean Engineering 31(2004), pp. 931-941, 2004.
- [9] SFPE Fire Protection Engineering Handbook, 2nd edition, NFPA 1995.
- [10] Thompson P., Marchant E.: *SIMULEX: developing new computer modelling techniques for evaluation*, Fire Safety Science-proceedings of the Fourth International Symposium, pp 613-624, 1994.
- [11] Togawa K.: *Study on fire escapes based on the observation of multitude currents*, Japanese Research Institute Report No 14, Tokyo, 1955.
- [12] Yoshida K., Murayama M., Itakaki T.: *Study on evaluation of escape route in passenger ships by evacuation and full scale trial*, Interflam 2001 Edinburgh, Scotland, pp. 865-876, 2001.