

mł. kpt. mgr inż. Mariusz BARAŃSKI

Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Oławie

dr hab. inż. Tadeusz MACIAK, prof. SGSP

WIBP, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Informatyki i Łączności SGSP

Określanie czasu procesu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów

Omówienie
LEAD

W artykule przedstawiono postępy, jakie dokonały się w szacowaniu czasu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów. Uporządkowano chronologicznie najważniejsze prace nad opracowaniem coraz dokładniejszych modeli matematycznych opisujących proces ewakuacji. Ukazano złożoność oraz elementy składowe procesu ewakuacji. Przedstawiono czynniki wpływające na zmianę szybkości przemieszczania się osób w trakcie ewakuacji.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo w budynkach, ewakuacja ludności, szacowanie czasu ewakuacji.

Wprowadzenie

Proces ewakuacji jest bardzo złożonym zagadnieniem. Wynika to głównie z faktu nieprzewidywalnych zachowań ludzi poruszających się pojedynczo lub w grupach. Podczas ewakuacji możliwe jest tworzenie się warunków do powstania paniki. Każdy człowiek jest indywidualnie usposobiony i subiektywnie ocenia niebezpieczeństwo. Z subiektywną oceną niebezpieczeństwa powiązane jest niejednokrotnie lekceważenie lub przewartościowanie zagrożenia. Lekceważenie może doprowadzić do pozostania w budynku do czasu gdy jego opuszczenie będzie już niemożliwe. Natomiast przewartościowanie zagrożenia może prowadzić do powstania niepożądanych konfliktów w grupie, a nawet paniki. Ponadto podczas ewakuacji ludzie w różnym stopniu dokonują oceny najlepszej drogi ewakuacyjnej. Nie zawsze jest ona wybierana optymalnie i zgodnie z oznakowaniem dróg ewakuacyjnych. Ewakuujące się osoby po ogłoszeniu alarmu o ewakuacji niejednokrotnie kończą rozpoczętą czynność (np. wyłączają komputer, zbierają osobiste rzeczy itp.), co powoduje wydłużenie czasu ewakuacji. Proces ewakuacji zależy również od rodzaju obiektu, jego złożoności, długości dróg ewakuacyjnych itp.

Liczącą się na świecie normą standaryzującą warunki ewakuacji jest *British Standard PD 7974* [1], zaprezentowana przez autorów w publikacji [2]. Zdefinio-

wano w niej dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (*Available Safe Escape Time*) ASET oraz wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (*Required Safe Escape Time*) RSET. W celu wyznaczenia dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji ASET niezbędne jest oszacowanie czasu osiągnięcia parametrów krytycznych. W pierwszej kolejności jest to widzialność w dymie uniemożliwi opuszczenie zagrożonego obiektu. Następnie stężenia toksycznych produktów spalania, wartość promieniowania cieplnego oraz temperatura na drodze ewakuacyjnej. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji RSET wyznacza czas opuszczenia obiektu przez ostatnią ewakuującą się osobę.

Złożoność uwarunkowań procesu ewakuacji powoduje kłopoty z opracowaniem najlepszego modelu matematycznego pozwalającego na prawidłowe szacowanie czasu ewakuacji w każdym przypadku. Nie ma uniwersalnego rozwiązania i dla każdego przypadku takiej analizy należy indywidualnie prześledzić warunki jakie mogą występować w budynku podczas zagrożenia.

W przedstawionym opracowaniu autorzy pokazali dotychczasowe starania w opracowaniu najbardziej właściwej formuły matematycznej definiującej czas ewakuacji.

1. Szacowanie czasu ewakuacji

Ewakuacja jest procesem złożonym polegającym na uporządkowanym ruchu osób do miejsca bezpiecznego [2]. Z ewakuacją związany jest czas ewakuacji t_e określający przedział czasu, w jakim odbywa się ewakuacja. Jest to zatem czas przejścia ludzi z najdalej usytuowanego miejsca na zewnątrz budynku lub do innej strefy pożarowej.

Na przestrzeni kilkudziesięciu lat powstało wiele koncepcji określania czasu ewakuacji. Jednym z pierwszych równań matematycznych opisujących proces ewakuacji jest równanie zaprezentowane przez Togawę w 1955 r. [3]. Funkcja czasu ewakuacji t_e składa się ze zmiennych dotyczących osób ewakuowanych oraz zmiennych opisujących obiekt, z którego się ewakuują. Równanie zawiera takie zmienne, jak szerokość oraz przepustowość najwęższego przejścia na drodze ewakuacyjnej, odległość pierwszej ewakuowanej osoby od wyjścia ewakuacyjnego prowadzącego na zewnątrz budynku, prędkość, z jaką przemieszczają się osoby ewakuowane oraz ogólnej liczby osób ewakuowanych. Równanie pozwalające obliczyć czas ewakuacji t_e zaproponowane przez Togawę przedstawia się w następująco:

$$t_e = \frac{N}{bp} \frac{l}{v} \quad (1)$$

gdzie:

N – liczba ewakuowanych osób,

b – szerokość najwęższego przejścia na drodze ewakuacyjnej [m],

p – przepustowość najwęższego przejścia [os./m/s],

l – odległość do wyjścia ewakuacyjnego [m],
 v – prędkość przemieszczania się ludzi [m/s].

Niestety jest to równanie wymagające znajomości wielu zmiennych i niewygodne w użyciu. Ponadto Tagawa nie uwzględnił interakcji i zachowań ludzi w stosunku do innych osób oraz interakcji ludzi z otoczeniem.

Następnie zagadnieniem czasu ewakuacji zajmowali się Predtechenskii i Milinskii [4]. Uzależnili oni czas ewakuacji od gęstości rozmieszczenia ludzi w czasie ewakuacji. Takie samo podejście uwzględniające gęstość rozmieszczenia ludzi prezentuje Kendik [5], który uszczegółowił model poprzedników. Zaprezentowane przez niego równanie na czas ewakuacji z budynku ma następującą postać:

$$t_e = t_n + (n-1) \frac{l_n}{v_{n;n-1}} + (n-2) \Delta T \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba kondygnacji do ewakuacji,

t_n – czas potrzebny na opuszczenie piętra n [s],

l_n – długość klatki schodowej pomiędzy piętrami n i $n-1$ [m],

$v_{n;n-1}$ – prędkość przepływu pomiędzy piętrami n i $n-1$ zależny od zatłoczenia [m/s],

ΔT – czas opóźnienia ze względu na zatłoczenie powtarzający się na każdym kolejnym piętrze [s].

Kolejne badania dotyczące ewakuacji prowadzili Melinek i Booth [6]. Uwzględnili oni możliwość powstawania zatorów na schodach, których nie uwzględnili ich poprzednicy. Podzielili proces ewakuacji na dwa przypadki. W pierwszym przyjęli swobodny przepływ ewakuowanych osób, w drugim uwzględnili tworzenie się zatorów:

$$t_{e \text{ swobodny}} = \frac{N}{pW_e} n t_s \quad (3)$$

$$t_{e \text{ zator}} = \frac{nN}{pW_e} t_s \quad (4)$$

gdzie:

n – liczba kondygnacji,

N – liczba ewakuowanych osób,

p – przepustowość schodów [os./m/s] (zwykle 1,7 os./m/s),

W_e – efektywna szerokość klatki schodowej [m],

t_s – czas przejścia pomiędzy kondygnacjami [s] (autorzy przyjęli 16 s)

Zagadnieniem czasu ewakuacji następnie zajmował się Pauls [7]. Jego prace doprowadziły do powstania dwóch równań opisujących czas ewakuacji ludzi pojedynczą klatką schodową z budynków wielokondygnacyjnych. Jedno opisuje czas ewakuacji dla mniej niż 800 osób przypadających na metr efektywnej szeroko-

kości schodów, drugie dla większej liczby ewakuowanych. Model matematyczny wykorzystuje rzeczywistą liczbę ewakuowanych osób przypadającą na metr efektywnej szerokości schodów:

$$t_e = 2,00 + 0,0117p_e \quad (5)$$

$$t_e = 0,70 + 0,0133p_e \quad (6)$$

gdzie:

t_e – czas ewakuacji [min],

p_e – liczba osób przypadająca na metr efektywnej szerokości schodów [os./m].

Równanie (5) nie zapewnia prawidłowego określenia czasu ewakuacji dla nielicznych grup ludzi. W celu lepszego dopasowania modelu zaproponowano równanie dla mniej niż 800 osób przypadających na metr efektywnej szerokości schodów, które dokładniej oddaje rzeczywistość dla budynków 8–15-kondygnacyjnych [8]:

$$t_e = 0,68 + 0,081^{0,73} p_e \quad (7)$$

gdzie:

t_e – czas ewakuacji [min],

p_e – liczba osób przypadająca na metr efektywnej szerokości schodów [os./m].

Kolejnym podejściem do szacowania czasu ewakuacji jest model Nelsona [8], który autor sformułował następująco:

$$t_e = \frac{N}{(1 - aD)kDW_e} \quad (8)$$

gdzie:

t_e – czas ewakuacji [s],

N – liczba osób,

D – gęstość rozmieszczenia osób [os./m²],

W_e – efektywna szerokość drogi ewakuacyjnej [m],

a – stała równa 0,266,

k – stała (zależna od parametrów drogi ewakuacyjnej zamieszczona w tabeli 3).

Kolejnym sposobem na wyznaczanie czasu ewakuacji jest formuła zawarta w normie British Standard PD 7974-6 [1, 2]. Rozszerza ona pojęcie czasu ewakuacji i definiuje dwa pojęcia wspomniane już na wstępie artykułu:

- wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (*Required Safe Escape Time* – RSET),
- dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (*Available Safe Escape Time* – ASET).

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji t_{RSET} nie jest jedynie czasem przejścia drogą ewakuacyjną (czasem ewakuacji – t_e). Rozszerzono go o czas związany z detekcją zagrożenia, alarmowaniem oraz reakcjami ludzi na alarm o zagrożeniu (rys. 1).

$$t_{RSET} = t_{det.} + t_{al.} + t_{rozp.} + t_{reak.} + t_p. \quad (9)$$

gdzie:

t_{RSET} – wymagany czas bezpiecznej ewakuacji,

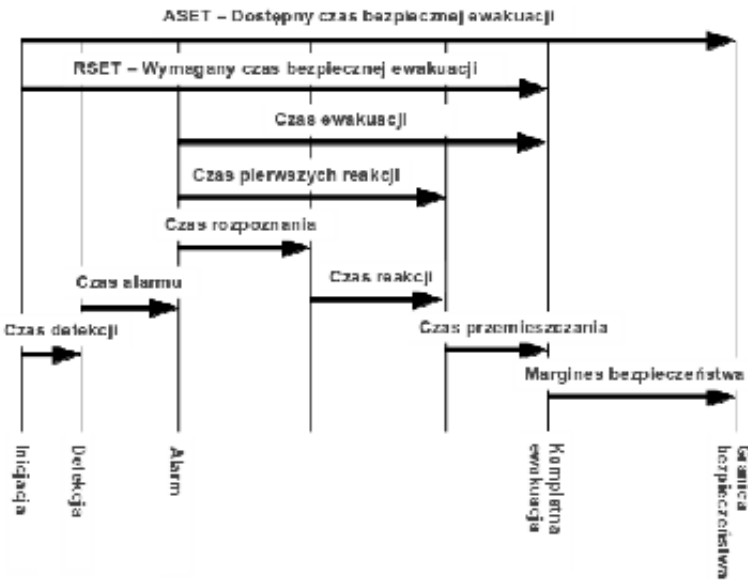
$t_{det.}$ – czas detekcji pożaru,

$t_{al.}$ – czas alarmu,

$t_{rozp.}$ – czas rozpoznania rodzaju alarmu (przed podjęciem decyzji),

$t_{reak.}$ – czas pierwszych reakcji (podjęcie decyzji i wybór drogi ewakuacyjnej),

$t_p.$ – czas przejścia drogą ewakuacyjną.



Rys. 1. Składowe czasu ewakuacji

Źródło: [1].

Wyrażenie (9) jest podstawowym wyrażeniem w teorii bezpieczeństwa ewakuacji. W literaturze [10] można spotkać również uproszczoną postać wzoru:

$$t_{RSET} = t_{d.a.} + t_{st.} + t_p. \quad (10)$$

gdzie:

t_{RSET} – wymagany czas bezpiecznej ewakuacji,

$t_{d.a.}$ – czas detekcji i alarmu (jako suma $t_{det.}$ i $t_{al.}$ z równania (9)),

$t_{st.}$ – czas pierwszych reakcji (jako suma $t_{rozp.}$ i $t_{reak.}$ z równania (9)),

$t_p.$ – czas przejścia.

Czas detekcji pożaru jest to czas liczony od powstania pożaru do wykrycia go przez system sygnalizacji pożarowej lub przez użytkownika budynku. Kolejnym czasem jest czas alarmu. Jest to czas, jakiego potrzebuje system sygnalizacji pożarowej od otrzymania sygnału pożarowego do wyemitowania alarmu pożarowego. Kolejnymi składowymi jest $t_{rozp.}$ i $t_{reak.}$ związane z zachowaniami ludzi w sytuacjach stresowych. Czas rozpoznania dotyczy rozpoznania rodzaju alarmu i określenia tego, czego dotyczy alarm. Czas pierwszych reakcji związany jest z takimi zachowaniami jak składanie podręcznych rzeczy, przedmiotów, sięganie po osobiste przedmioty, odkładanie rozłożonych dokumentów itp. Ostatnią składową jest czas przejścia drogami ewakuacyjnymi. Analiza bezpieczeństwa ewakuacji według normy podzielona jest na kilka etapów. W pierwszej fazie niezbędne jest określenie ludzkich zachowań związanych z ewakuacją w określonym typie budynku. Zdefiniowanych jest osiem kategorii ludzkich zachowań oznaczonych w normie brytyjskiej – A, B1, B2, Ci, Cii, Ciii, D, E. W kategoriach tych pod uwagę brane są takie parametry, jak czujność użytkowników budynku, znajomość rozkładu pomieszczeń, gęstość rozmieszczenia osób oraz liczba grup użytkowników w budynku. W tabeli 1 wyszczególniono poszczególne kategorie zachowań ludzkich.

Tabela 1. Kategorie zachowań ludzkich

Kategoria	Czujność ludzi	Znajomość obiektu	Gęstość rozmieszczenia osób	Ilość przestrzeni pomieszczeń	Przykład pomieszczeń
A	czujni	znający	niska	jedna lub wiele	biura lub obiekty przemysłowe
B1	czujni	nieznający	wysoka	jedna lub niewiele	sklepy, restauracje
B2	czujni	nieznający	wysoka	jedna w skupisku	kina, teatry
Ci	śpiący	znający	niska	niewiele	mieszkania bez nadzoru
Cii	nadzorowani	znający	niska	niewiele	mieszkania z nadzorem, akademiki
Ciii	śpiący	nieznający	niska	wiele	hotele, hostele
D	pod opieką medyczną	nieznający	niska	wiele	szpitale, sanatoria
E	podróżujący	nieznający	wysoka	wiele	dworce, lotniska

Źródło: [1].

Jeśli w budynku występują pomieszczenia z kilkoma kategoriami zachowań ludzkich, należy podczas analizy bezpieczeństwa ewakuacji rozpatrywać wszystkie ich warianty. W kolejnym etapie analizy niezbędne jest określenie rodzaju systemu sygnalizacji pożarowej, stopnia złożoności budynku i jakości systemu zarządzania bezpieczeństwem obiektu. Przy klasyfikowaniu systemu sygnalizacji pożarowej stosuje się trzystopniową skalę. W pierwszej kategorii znajdują się takie systemy sygnalizacji, które gwarantują automatyczne wykrywanie pożaru w całym budynku oraz natychmiastowe ogłoszenie alarmu we wszystkich zagrożonych częściach budynku. W drugiej kategorii znajdują się wszystkie systemy

sygnalizacji pożarowej o dwustopniowej organizacji alarmowania. W tym przypadku po wykryciu pożaru do aktywowania alarmu drugiego stopnia niezbędne jest potwierdzenie pożaru (np. ręcznym ostrzegaczem pożarowym) lub brak reakcji (wyłączenia alarmu pierwszego stopnia) w określonym odstępie czasu. Trzecią kategorię stanowią systemy zapewniające tylko lokalne wykrywanie pożaru lub niewykrywające pożaru, a jedynie posiadające ręczne ostrzegacze pożarowe pozwalające na uruchomienie systemu alarmowego we wszystkich zagrożonych strefach. W przypadku tego systemu niezbędne jest zauważenie pożaru przez osoby znajdujące się w budynku, które uruchomią system sygnalizacji pożarowej. Trzecia kategoria systemu sygnalizacji pożarowej jest najbardziej niekorzystna i w największym stopniu wydłuża czas detekcji i alarmu. Również w *British Standard 7974 PD 7974-6* do trzech kategorii sprowadzono stopień złożoności budynku. Kategoria pierwsza to budynki stanowiące prostokątny budynek z jednym lub niewieloma pomieszczeniami, z krótkimi drogami ewakuacyjnymi i wieloma wyjściami prowadzącymi bezpośrednio na zewnątrz budynku. Przykładem budynku zakwalifikowanego do tej kategorii może być supermarket.

Budynki z prostym układem kilku pomieszczeń powtarzającym się na wszystkich kondygnacjach kwalifikowane są do kategorii drugiej. Przykładem takiego obiektu może być kilkukondygnacyjny biurowiec. Duże kompleksy budynków ze złożonymi układami pomieszczeń powodujące trudności w określeniu kierunku ewakuacji przez osoby w nim przebywające norma gromadzi w trzeciej kategorii. W skład tego typu obiektów wchodzi między innymi domy towarowe, stare kompleksy hoteli, nowoczesne centra rozrywki, centra handlowe oraz lotniska.

Ostatnią klasyfikację stanowi jakość systemu zarządzania bezpieczeństwem. W trzystopniowej klasyfikacji do pierwszej kategorii zaliczane są obiekty z wysokiej jakości systemem bezpieczeństwa. Użytkownicy tego typu budynków są przeszkoleni z zakresu bezpieczeństwa pożarowego, dla budynku opracowany jest plan bezpieczeństwa oraz prowadzone są regularne ćwiczenia. W budynku występuje duża liczba opiekunów w stosunku do pozostałej grupy ludzi. Systemy i procedury w takich budynkach poddawane są nieustannej weryfikacji i certyfikacji, w tym prowadzone są regularne audyty z monitorowanych próbnych ewakuacji, dla których wydajność musi odpowiadać założeniom projektowym. Nagrania z pożarów oraz próbnych alarmów są archiwizowane i udostępniane do kontroli w ramach procesu certyfikacji. Zwiedzający budynek muszą być pod nadzorem personelu na każdym etapie przebywania w obiekcie.

Poziom bezpieczeństwa M1 często związany jest z dobrze zaprojektowanym obiektem posiadającym prosty układ dróg ewakuacyjnych zakwalifikowany do kategorii stopnia złożoności obiektu B1 lub przynajmniej B2. Ponadto system sygnalizacji pożarowej w takich obiektach powinien spełniać wymagania kategorii A1, a jeśli budynek jest przeznaczony dla publiczności, to powinien posiadać dźwiękowy system ostrzegawczy.

Tabela 2. Sugerowane czasy pierwszych reakcji

Kategoria	Czas reakcji pierwszych osób $t_{st.(1\%)} [\text{min.}]$	Czas reakcji ostatnich osób $t_{st.(99\%)} [\text{min.}]$
Kategoria A_a		
M1, B1-B2, A1-A2	0,5	1
M2, B1-B2, A1-A2	1	2
M3, B1-B2, A1-A3	> 15	> 15
Kategoria B_b		
M1, B1, A1-A2	0,5	2
M2, B1, A1-A2	1	3
M3, B1, A1-A3	> 15	> 15
Kategoria C_{ci}		
M2, B1, A1	5	5
M3, B1, A3	10	> 20
Kategoria C_{ii}		
M1, B2, A1-A2	10	20
M2, B2, A1-A2	15	25
M3, B2, A1-A3	> 20	> 20
Kategoria C_{diii}		
M1, B2, A1-A2	15	15
M2, B2, A1-A2	20	20
M3, B2, A1-A3	> 20	> 20
Kategoria D_b (czuwający)		
M1, B1, A1-A2	0,5	2
M2, B1, A1-A2	1	3
M3, B1, A1-A3	> 15	> 15
Kategoria D_d (uśpieni)		
M1, B2, A1-A2	5	10
M2, B2, A1-A2	10	20
M3, B2, A1-A3	> 10	> 20
Kategoria E_e		
M1, B3, A1-A2	1,5	4
M2, B3, A1-A2	2	5
M3, B3, A1-A3	> 15	> 15

a dla kategorii B3 należy dodać 0,5 min w celu odnalezienia drogi ewakuacji,
b dla kategorii B2 należy dodać 0,5 min w celu odnalezienia drogi ewakuacji,
c dla kategorii B3 należy dodać 1 min w celu odnalezienia drogi ewakuacji,
d dla kategorii B3 należy dodać 0,5 min w celu odnalezienia drogi ewakuacyjnej,
e wymagana jest odpowiednia liczba pracowników w celu ewakuacji niepełnosprawnych.

Źródło: [1].

Druga kategoria M2 różni się do M1 niższym odsetkiem opiekunów w stosunku do załogi lub brakiem opiekunów. Niewymagane są również audyty i certyfikacje bezpieczeństwa. Budynek w tej kategorii może być na poziomie B2 lub B3 odnośnie stopnia złożoności rozkładu pomieszczeń i na poziomie A1 odnośnie

systemu sygnalizacji pożarowej. Ostatnia trzecia kategoria M3 reprezentuje budynki z minimalnym poziomem zarządzania bezpieczeństwem. Bezpieczeństwo w takich obiektach zapewnione jest przez bierne elementy budynku (oddzielenia przeciwpożarowe, niepalne wykończenia dróg ewakuacyjnych itp.) lub czynne systemy (stałe urządzenia gaśnicze, samoczynne urządzenia oddymiające itp.). Do tej grupy mogą być zakwalifikowane budynki o poziomie złożoności B3 i systemie sygnalizacji pożarowej A3. Powyższe kategorie pozwalają na określenie czasu pierwszych reakcji ewakuujących się osób. Stanowią one następnie składową wymaganego czasu ewakuacji z równania (10).

W celu określenia czasu pierwszych reakcji rozpatrywane są dwa przypadki:

- a) gdy w strefie przeznaczonej do ewakuacji występuje mała gęstość rozmieszczenia ludzi, do 1/3 projektowanej liczba osób,
- b) gdy w strefie występuje maksymalna liczba osób.

W przypadku a) czas ewakuacji zależy od pierwszych reakcji ostatnich kilku osób decydujących się na opuszczenie strefy. Równanie opisujące czas ewakuacji przedstawia się wówczas następująco:

$$t_e = t_{st.(99\%)} + t_{prze(swobodnego)} \quad (12)$$

gdzie:

t_e – czas ewakuacji,

$t_{st.(99\%)}$ – czas pierwszych reakcji ostatnich kilku osób decydujących się na opuszczenie strefy,

$t_{prze(swobodnego)}$ – czas swobodnego przejścia drogą ewakuacyjną.

W przypadku b) czas ewakuacji zależy od reakcji pierwszych kilku osób decydujących się na opuszczenie strefy oraz przepustowości dróg ewakuacyjnych. Duże znaczenie w tym przypadku będzie miało tworzenie się zatorów na drogach ewakuacyjnych, które będą determinowały czas ewakuacji. Równanie pozwalające wyznaczyć czas ewakuacji w tym przypadku przedstawia się następująco:

$$t_e = t_{st.(1\%)} + t_{prze(drogami ew.)} + t_{prze(przez wyjścia)} \quad (13)$$

gdzie:

t_e – czas ewakuacji,

$t_{st.(1\%)}$ – czas reakcji pierwszych kilku osób decydujących się na ewakuację,

$t_{prze(drogami ew.)}$ – czas swobodnego przejścia drogą ewakuacyjną,

$t_{prze(przez wyjścia)}$ – czas przejścia przez wyjścia ewakuacyjne.

Czas swobodnego przejścia zależy od średniej prędkości przemieszczania się osób poziomymi i pionowymi drogami ewakuacyjnymi. Zwykle przyjmuje się prędkość 1,2 m/s. W przypadku pionowych dróg ewakuacyjnych przyjmuje się 0,8 m/s przy schodzeniu w dół oraz 0,7 m/s przy wchodzeniu do góry. Jeśli jednak zaproponowane wartości nie odzwierciedlają warunków panujących na drodze ewakuacyjnej, można zweryfikować prędkości przemieszczania się osób, stosując

równanie (21) z odpowiednim współczynnikiem k , w zależności od rodzaju drogi ewakuacyjnej (poziomej lub pionowej). Sytuacja zmienia się, jeśli analizujemy przypadek b), w którym zakładamy tworzenie się zatorów. Wtedy niezbędna jest kalkulacja przepustowości drogi ewakuacyjnej, a następnie wyznaczenie czasu przejścia drogą ewakuacyjną.

Innym podejściem zaproponowanym w pracy [11] jest wyznaczenie krytycznego czasu ewakuacji, czyli czasu najbardziej niekorzystnego, który nie powinien być przekroczony. Podejście to polega na podziale obiektu na strefy. Każda ze stref obejmuje jedno wyjście ewakuacyjne do przestrzeni bezpiecznej lub na zewnątrz obiektu oraz powierzchnię, z której powinni się ewakuować ludzie. Następnie oblicza się czas opóźnienia w każdej strefie ewakuacji. Wyznacza się go jako maksymalną wartość określoną z czasu oczekiwania przy wyjściu ewakuacyjnym na wydostanie się ze strefy i czasu niezbędnego na dotarcie ostatniej osoby do wyjścia ewakuacyjnego. Po wyznaczeniu czasu opóźnienia porównuje się go z czasem krytycznym. Jeśli jest mniejszy od czasu krytycznego, to warunki ewakuacji ze strefy są bezpieczne. Jeśli jednak czas opóźnienia przekracza czas krytyczny, należy poprawić warunki ewakuacji. Wyżej wymienione podejście nie uwzględnia sytuacji osiągnięcia warunków krytycznych pożaru (tj. widzialność, toksyczność produktów spalania, promieniowanie oraz temperatura), a czas krytyczny ewakuacji uzależniony jest od powierzchni strefy, z której prowadzona jest ewakuacja.

$$t_{kryt.} \quad t_{op.} \text{ – strefa ewakuacji bezpieczna,} \quad (14)$$

$$t_{kryt.} \quad t_{op.} \text{ – strefa ewakuacji niebezpieczna.} \quad (15)$$

gdzie:

$t_{kryt.}$ – czas krytyczny ewakuacji,

$t_{op.}$ – czas opóźnienia.

Czas krytyczny ewakuacji zależy od powierzchni obiektu i jest do niej proporcjonalny:

$$t_{kryt.} \quad 2\sqrt{A} \quad (16)$$

$$t_{op.} = \max(t_{ai} \cdot t_{bi}) \quad (17)$$

$$t_{ai} \quad \frac{n_i}{1,5W_{ei}} \quad (18)$$

$$t_{bi} \quad \frac{l_i}{v} \quad (19)$$

gdzie:

t_{ai} – czas oczekiwania przy wyjściu ewakuacyjnym ze strefy i [s],

t_{bi} – czas niezbędny na dotarcie ostatniej osoby do wyjścia ewakuacyjnego ze strefy i [s],

n_i – liczba osób w strefie i ,
 W_{ei} – efektywna szerokość drogi ewakuacyjnej ze strefy i [m],
 l_i – najdłuższa odległość na drodze ewakuacyjnej ze strefy i [m],
 v – prędkość przemieszczania się ewakuowanych [m/s²].

Prędkość przemieszczania się osób zależy od rodzaju budynku. Dla biur, szkół i stadionów wynosi 1,3 m/s, dla hoteli i domów handlowych 1,0 m/s a dla szpitali i mocno zatłoczonych pomieszczeń 0,5 m/s [11]. Przedstawiony model czasu ewakuacji jest bardzo uproszczony i sprawdza się w prostych układach pomieszczeń.

2. Szacowanie prędkości przemieszczania się osób w trakcie ewakuacji

Prędkość przemieszczania się osób w czasie ewakuacji jest podstawowym parametrem pozwalającym szacować czas ewakuacji. Od prędkości przemieszczania się zależy, czy dana osoba zdąży uciec przed pożarem lub innym zagrożeniem. W przypadku pożarów na prędkość przemieszczania się ludzi składa się wiele elementów, jednak kluczowymi są zadymienie i temperatura. W pracy [12] autorzy prezentują model matematyczny opisujący prędkość ruchu w zależności od temperatury i współczynnika ekstynkcji (gęstości dymu). Współczynnik ekstynkcji jest iloczynem odwrotności odległości pokonanej przez światło w dymie oraz logarytmu naturalnego ilości światła pochłoniętego przez dym.

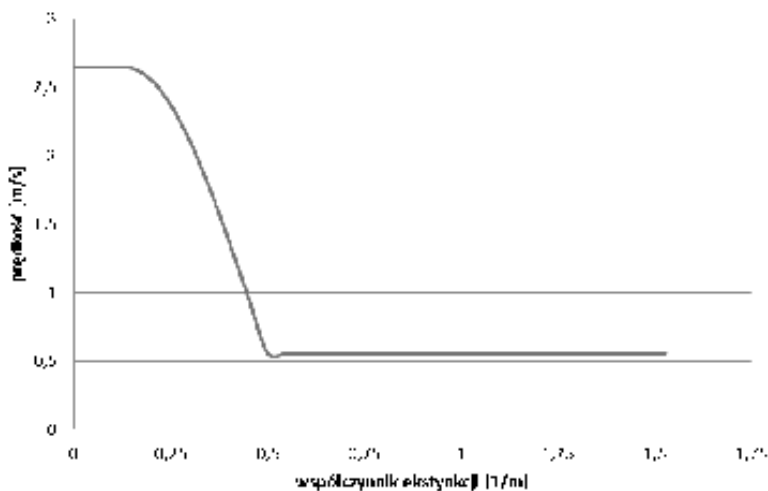
$$v = \begin{cases} 2,66 & 2,1e^{-\frac{1}{c_s}} & \text{gdy } c_s \in (0,151; 0,5) \\ 0,56 & & \text{gdy } c_s \in (0,5; 1,53) \end{cases} \quad (20)$$

gdzie:

v – prędkość przemieszczania się osób [m/s],

c_s – współczynnik ekstynkcji [1/m]

W przypadku braku zadymienia (współczynnika ekstynkcji równego zero) ewakuowani mogą przemieszczać się z prędkością nawet 2,5 m/s. Natomiast gdy współczynnik ekstynkcji zbliża się do wartości 0,5-1 m prędkość gwałtownie spada do minimalnej wartości ok. 0,56 m/s. Przy czym w przypadku tak dużego zadymienia postęp w pokonywaniu drogi do wyjścia ewakuacyjnego może być zerowy. Ludzie w zadymieniu mogą przemieszczać się zgodnie z podaną prędkością, ale w złych kierunkach niedających możliwości wydostania się z obiektu. Zależność współczynnika ekstynkcji od widzialności została przedstawiona na rys. 2. W przypadku dymu znaczenie ma również fakt, czy dym powoduje podrażnienia oczu i dróg oddechowych, co dodatkowo może zmniejszyć prędkość przemieszczania się ludzi.



Rys. 2. Zależność pomiędzy prędkością przemieszczania się ewakuowanych a współczynnikiem ekstynkcji

Źródło: opracowanie własne na podstawie równania [20].

Prędkość przemieszczania się ludzi podczas ewakuacji zależy również od gęstości rozmieszczenia poszczególnych osób [8]:

$$v = k(1 - 0,266D) \quad (21)$$

gdzie:

v – prędkość przemieszczania się [m/s],

k – stała, zależna od parametrów drogi ewakuacyjnej,

D – gęstość rozmieszczenia osób na drodze ewakuacyjnej [os./m²].

Z powyższego równania można wysnuć kilka ważnych wniosków. Pierwszym jest to, iż przy gęstości zatłoczenia 3,8 os/m² prędkość przemieszczania się tłumu spada do zera. Drugi to fakt, że maksymalna prędkość przemieszczania się osób zależy jedynie od stałej k , która ustalona jest w zależności od rodzaju części drogi ewakuacyjnej. Wartości stałej k przedstawiono w tabeli 3. W przypadku korytarzy wynosi ona 1,4, w przypadku schodów zależy od wymiarów stopni i zawiera się w przedziale 1,0 do 1,23.

Tabela 3. Wartość stałej k w zależności od elementu drogi ewakuacyjnej

Element drogi ewakuacyjnej		k
Korytarz		1,4
Klatka schodowa (wg parametrów stopni)		-----
Wysokość stopnia [mm]	Głębokość stopnia [mm]	
190,5	254	1,00
177,8	279,4	1,08
165,1	304,8	1,16
165,1	330,2	1,23

Źródło: [8].

Skuteczność ewakuacji zależy również od wpływu produktów spalania na osoby ewakuujące się. Oddziaływanie na ludzi gazów pożarowych wpływa na ich zachowanie oraz na prędkość poruszania się. Do najważniejszych czynników warunkujących zachowanie się ludzi można zaliczyć temperaturę, promieniowanie ciepłe, zasięg widzialności, toksyczność produktów rozkładu termicznego i produktów spalania oraz zawartość tlenu [13, 14]. W inżynierii bezpieczeństwa pożarowego dostępny czas bezpiecznej ewakuacji ASET przyjmuje wartość graniczną wraz z przekroczeniem następujących parametrów krytycznych [15]:

1. temperatura górnej warstwy produktów spalania – 180°C,
2. temperatura dolnej warstwy – 60°C,
3. początek górnej warstwy na wysokości 1,5 m,
4. zasięg widzialności w warstwie dymu 2–3 m.

Przy szacowaniu dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji powszechne są następujące wskaźniki określające stopień zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi:

1. FED (*Fractional Effective Dose*) – cząstkowa dawka skuteczna,
2. FEC (*Fractional Effective Concentration*) – cząstkowe stężenie skuteczne,
3. FIC (*Fractional Irritant Concentration*) – cząstkowe stężenie drażniące,
4. FLD (*Fractional Lethal Dose*) – cząstkowa dawka śmiertelna.

Cząstkowa dawka skuteczna (FED) oraz cząstkowe skuteczne stężenie (FEC) substancji drażniących i dymu są wartościami granicznymi podczas wyznaczania ASET [14]. Sposób kalkulacji powyższych wskaźników określa dokument ISO TR 13571. Szczegółowo problem wpływu toksycznych produktów spalania opisany jest w [9].

Cząstkowe stężenie skuteczne najprościej rzecz biorąc jest ilorazem stężenia substancji drażniącej przez stężenie powodujące określone skutki dla życia i zdrowia w jednostce czasu. Podczas pożarów ludzie najczęściej giną z powodu zatrucia gazami pożarowymi. Toksyczne oddziaływanie tlenku węgla potęgowane jest hiperwentylacją spowodowaną występowaniem dwutlenku węgla oraz niedotlenieniem organizmu wywołanego spadkiem stężenia tlenu. Dodatkowo cyjanowodor, jego związki organiczne i inne toksyczne gazy pożarowe skracają czas niezbędny na bezpieczne opuszczenie strefy zagrożenia. Na tej podstawie ułamkowa dawka skuteczna powodująca uduszenie przedstawia się następująco [9]:

$$FED_{IN} = (FED_{CO} + FED_{CN} + FLD_{irr}) \times V_{CO_2} + FED_O \text{ lub } FED_{CO_2} \quad (22)$$

$$FED_{CO} = \frac{8,2925 \cdot 10^{-4} [ppmCO]^{1,036}}{30} \quad (23)$$

$$FED_{CN} = \frac{\exp \left[\frac{[ppm CN]}{43} \right]}{220} \quad (24)$$

$$V_{CO_2} = \exp\left(\frac{\%CO_2}{5}\right) \quad (25)$$

$$FED_{O_2} = \frac{1}{\exp(8,13 - 0,54(20,9 - \%O_2))} \quad (26)$$

$$FED_{CO_2} = \frac{1}{\exp(6,1623 - 0,5189 - \%CO_2)} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} &FLD_{irr} \quad FLD_{HCl} \quad FLD_{HBr} \quad FLD_{HF} \quad FLD_{SO_2} \\ &FDL_{NO_2} \quad FDL_{CH_2CHO} \quad FDL_{HCHO} \quad FLD_x \end{aligned} \quad (28)$$

gdzie:

FED_{IN} – ułamkowa dawka skuteczna powodująca uduszenie,

FED_{CO} – ułamkowa dawka skuteczna stężenia tlenu węgla,

FED_{CN} – ułamkowa dawka skuteczna cyjanowodoru i jego związków organicznych,

FLD_{irr} – ułamkowa dawka śmiertelna pozostałych gazów pożarowych,

V_{CO_2} – stopień hiperwentylacji spowodowany dwutlenkiem węgla,

FED_O – stopień niedotlenienia,

FED_{CO_2} – ułamkowa dawka skuteczna dwutlenku węgla.

Do obliczeń ułamkowej dawki skutecznej wchodzi cyjanowodor oraz wszystkie związki organiczne cyjanowodoru. Wykluczony jest natomiast dwutlenek azotu (NO_2) który stanowi składową FLD_{irr} – cząstkowej dawki śmiertelnej pozostałych gazów pożarowych. W celu obliczenia cząstkowego stężenia śmiertelnego niezbędne są wartości stężeń poszczególnych gazów powodujące śmierć.

Tabela 4. Stężenia gazów pożarowych powodujące śmierć

Gaz	Stężenie [ppm]
HCl	114 000
HBr	114 000
HF	87 000
SO ₂	12 000
NO ₂	1900
CH ₂ CHO	4500
HCHO (formaldehyd)	22 500

Źródło: [9].

W tabeli 5 przedstawiono praktyczny przykład zastosowania opisanego modelu. Z analizy otrzymanych danych wynika, że obezwładnienie ewakuujących się osób spowodowane produktami spalania nastąpi między szóstą, a siódmą mi-

nutą, jeśli będą przebywali w strefie zagrożenia. Wartość skumulowana stężenia skutecznego w czasie ośmiu minut osiąga wartość 1,0679. W ósmej minucie występuje już tak duże stężenie toksycznych i duszących składników dymu, że w ciągu jednej minuty spowodują zatrucie. Wskazuje na to suma dawek skutecznych przekraczająca wartość 1. Powyższe obliczenia mogą posłużyć do wyznaczenia dostępnego czasu ewakuacji ASET.

Tabela 5. Przykład obliczenia stężenia skutecznego produktów spalania powodujące obездwładnienie, a w konsekwencji śmierć

Czas [min]	1	2	3	4	5	6	7	8
CO [ppm]	0	20	100	300	1000	2000	3500	5000
HCN [ppm]	0	1	2	4	8	12	14	16
HCl [ppm]	0	2	4	6	8	10	12	14
SO ₂ [ppm]	0	5	10	15	20	30	40	50
NO ₂ [ppm]	0	2	4	6	8	10	12	14
CO ₂ [%]	0	1	2	3	4	6	7	8
O ₂ [%]	21	20	19	18	17	15	14	13
FED _{CO}	0,0000	0,0006	0,0033	0,0102	0,0354	0,0727	0,1298	0,1878
FED _{CN}	0,0000	0,0047	0,0048	0,0050	0,0055	0,0060	0,0063	0,0066
FED _{irr}	0,0000	0,0015	0,0030	0,0045	0,0059	0,0079	0,0098	0,0117
V CO ₂	1,0000	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	3,3201	4,0552	4,9530
FED _O	0,0000	0,0005	0,0008	0,0014	0,0024	0,0071	0,0122	0,0210
FEDCO ₂	0,0000	0,0035	0,0059	0,0100	0,0168	0,0474	0,0797	0,1338
<i>FED_{IN}</i>	0,0000	0,0087	0,0172	0,0372	0,1067	0,2945	0,6036	1,0416
<i>sk</i> <i>FED_{IN}</i>	0,0000	0,0087	0,0260	0,0631	0,1699	0,4643	1,0679	2,1095
<i>sk</i> <i>FED_{CO₂}</i>	0,0000	0,0035	0,0095	0,0195	0,0363	0,0837	0,1634	0,2972
max	0,0000	0,0087	0,0260	0,0631	0,1699	0,4643	1,0679	2,1095

Źródło: opracowanie własne.

Produkty spalania oprócz właściwości toksycznych mają również działanie drażniące. Powodują podrażnienie oczu i dróg oddechowych. U ludzi zmniejsza się wtedy zdolność do określania drogi ucieczki, często dokonywane są błędne wybory prowadzące w konsekwencji do zabłądzenia w budynku. Większość gazów pożarowych dodatkowo kumuluje się w organizmie, potęgując skutki zatrucia. Wskaźnik FIC (cząstkowe stężenie drażniące) opisuje stopień drażliwości dymu i oblicza się go jako sumę wskaźników dla poszczególnych substancji [9]:

$$\begin{aligned}
 & FIC \quad FIC_{HCl} \quad FIC_{HBr} \quad FIC_{HF} \quad FIC_{SO_2} \quad FIC_{NO_2} \\
 & FIC_{CH_2HO} \quad FIC_{HCHO} \quad FIC_x
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

W celu wyznaczenia poszczególnych składowych równania niezbędna jest znajomość stężeń produktów spalania uniemożliwiających ewakuację i wyjście z budynku co najmniej połowie osób. Najbardziej drażniące są formaldehydy i akroleiny. W dalszej kolejności plasują się tlenki, które w kontakcie z wodą tworzą kwasy. Trafiając do oczu i dróg oddechowych, powodują powstanie odczynu kwaśnego, który utrudnia orientację na drodze ewakuacyjnej oraz utrudnia oddychanie. Najmniej agresywne są wodorki chloru, bromu i fluoru. W tabeli 6 przedstawiono stężenia drażniących związków dymu, które uniemożliwiają ewakuację.

Tabela 6. Stężenia związków drażniących dymu uniemożliwiające ewakuację z budynku połowie osób

Związek chemiczny	Stężenie [ppm]
HCl	200
HBr	200
HF	200
SO ₂	24
NO	70
CH ₂ CHO (akroleiny)	4
HCHO (formaldehydy)	6

Źródło: [9].

Koncentracja produktów spalania powoduje również ograniczenie widzialności oraz utrudnia wydostanie się z obiektu. Stopień zadymienia uniemożliwiający wydostanie się z obiektu opisuje ułamkowy wskaźnik koncentracji dymu FEC_{SMOKE} [9]:

$$FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0,2} \quad (\text{dla małych pomieszczeń}) \quad (30)$$

$$FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0,08} \quad (\text{dla dużych pomieszczeń}) \quad (31)$$

gdzie:

OD – optyczna gęstość dymu [B/m].

Wskaźnik koncentracji dymu zależy od wielkości pomieszczenia. Pierwszy dotyczy małych przestrzeni, gdzie odległość do najbliższych znaków ewakuacyjnych nie przekracza 5 m, drugi – dużych przestrzeni. W przypadku osiągnięcia przez wskaźnik FEC_{SMOKE} wartości 1, gęstość dymu jest na tyle duża, że ewakuowane osoby tracą orientację w przestrzeni i nie udaje się im opuścić strefy zagrożenia. Przedstawiona w równaniu gęstość optyczna dymu OD może być wyznaczona z opisywanego wcześniej wskaźnika ekstynkcji. Proporcja pomiędzy nimi przedstawia się w przybliżeniu następująco:

$$OD = \frac{1}{\ln 10} c_s = 0,4343 c_s \quad (32)$$

gdzie:

c_s – współczynnik ekstynkcji [1/m].

Przykładowo na przestrzeni 7×7 m występuje zadymienie ograniczające widzialność do 6 m, co odpowiada współczynnikowi ekstynkcji $0,384 \text{ m}^{-1}$. Przez pomieszczenie prowadzi droga ewakuacyjna, którą będą ewakuowali się ludzie. Po podstawieniu wartości do równania (32) otrzymujemy gęstość optyczną dymu równą $0,1668 \text{ B/m}$. Ze względu na małe rozmiary pomieszczenia wskaźnik stężenia skutecznego dymu wynosi:

$$FEC_{SMOKE} = \frac{OD}{0,2} = \frac{0,1668}{0,2} = 0,834 \quad (33)$$

Współczynnik stężenia skutecznego zadymienia niemalże przekroczył wartość krytyczną równą 1 powodującą utratę orientacji u ewakuujących się ludzi. Gdyby ograniczenie widzialności występowało w pomieszczeniu o dużych rozmiarach przekraczających 10 m sytuacja wyglądałaby inaczej. Wskaźnik FEC_{SMOKE} dla równania 31 wyniósłby 2,085 i ponad dwukrotnie przekroczyłby wartość krytyczną.

Strefa spalania emituje ciepło w postaci gorących gazów oraz promieniowania elektromagnetycznego. Nie są one obojętne dla ewakuujących się osób. Działanie promieniowania i wysokiej temperatury sumuje się, zmniejszając szanse na bezpieczne opuszczenie zagrożonej strefy. Możliwość opuszczenia pomieszczenia w stosunku do oddziaływania strumienia promieniowania cieplnego i temperatury opisują równania [9]:

$$FED_{RAD} = \frac{1,33}{q^{1,33}} = 1 \quad (34)$$

$$FED_{CONV} = \frac{1}{5 \cdot 10^7 T^{3,4}} \quad (35)$$

$$FED_{HEAT} = FED_{RAD} = FED_{CONV} \quad (36)$$

gdzie:

FED_{RAD} – wskaźnik skutecznej dawki promieniowania,

FED_{CONV} – wskaźnik skutecznej dawki temperatury,

FED_{HEAT} – wskaźnik skutecznej dawki równoczesnego oddziaływania promieniowania i temperatury,

q – gęstość strumienia ciepła [kW/m^2],

T – temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$].

Przykładowo rozpatrzmy przypadek, w którym podczas ewakuacji na osobę A oddziałuje strumień ciepła o gęstości $2,5 \text{ kW/m}^2$ w czasie 25 s oraz oddzielny przypadek, gdy na ewakuowaną osobę B oddziałuje temperatura 70°C , również w czasie 25 s. Wskaźnik skutecznej dawki promieniowania wynosi zatem $FED_{A \text{ RAD}} = 0,64$, a $FED_{B \text{ CONV}} = 0,93$.

Gdyby ewakuująca się osoba musiała pokonać przestrzeń, w której występują powyższe warunki łącznie, z pewnością nie opuściłaby strefy zagrożenia. Potwierdza to wskaźnik skutecznej dawki równoczesnego oddziaływania promieniowania i temperatury, który przekroczył wartość krytyczną równą 1:

$$FED_{HEAT} = 0,64 \cdot 0,93 = 1,57 \quad (37)$$

Podsumowanie

Ewakuacja jest procesem bardzo złożonym, przebiegającym odmiennie dla różnych budynków i w różnych warunkach. Ponadto skuteczna ewakuacja w przypadku zagrożenia pozwala na uratowanie wiele istnień ludzkich. Z tego powodu na przestrzeni wielu lat trwały i trwają nieustanne prace nad określeniem najbardziej dokładnych modeli matematycznych opisujących proces ewakuacji. Korzystając z dotychczasowych osiągnięć naukowych oraz z norm, możliwe jest bardzo dokładne oszacowanie czasu ewakuacji. Szacowanie jest czynnością bardzo pracochłonną, wymagającą dobrej znajomości budynku, warunków w nim panujących oraz konieczności przeanalizowania różnych scenariuszy rozwoju pożarów oraz innych zagrożeń. Parametry dróg ewakuacyjnych, tj. długości ciągów komunikacyjnych, szerokości przejść, liczba kondygnacji czy liczba wyjść ewakuacyjnych, to niektóre z elementów budynku mające wpływ na czas ewakuacji. Czynniki pochodzące od pożaru lub innego zagrożenia, m.in. widzialność, stężenie gazów toksycznych, stężenie gazów drażniących, temperatura, promieniowanie również w ogromnym stopniu zmieniają czas ewakuacji. Także indywidualne cechy ludzi oraz ich przygotowanie na wypadek ewentualnego zagrożenia są elementem mogącym wpływać na czas ewakuacji.

W opracowaniu przedstawiono postępy, jakie dokonały się w szacowaniu czasu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów. Pokazano, w jaki sposób na przestrzeni lat uszczegóławiano modele matematyczne dotyczące procesu przejścia drogami ewakuacyjnymi. Następnie przedstawiono rozszerzoną koncepcję szacowania czasu ewakuacji zaprezentowaną w normie British Standard PD 7974-6. W normie tej, oprócz czasu przejścia drogami ewakuacyjnymi, uwzględniono czas potrzebny na wykrycie zagrożenia (pożaru), czas alarmowania oraz czas reakcji ludzi na ogłoszony alarm. Jest to podejście szersze, ale dokładniej opisujące zjawisko ewakuacji. Norma również wskazuje na konieczność określania marginesu bezpieczeństwa, który jest różnicą pomiędzy dostęp-

nym, a wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji. Zakończenie artykułu stanowi przegląd czynników mających wpływ na szybkość przemieszczania się ludzi drogami ewakuacyjnymi. Jest to istotne ze względu na fakt, że szybkość przemieszczania się ludzi ma ogromny wpływ na czas ewakuacji.

Literatura

- [1] British Standard PD 7974-6:2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings – Human factors: Life safety strategies – Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6), British Standards Institute 2004.
- [2] Barański M., Maciak T.: Przegląd aktów prawnych i norm związanych z zagadnieniem ewakuacji, *Zeszyty Naukowe SCSP* 2013, nr 47(3), s. 100–112.
- [3] Togawa K.: Study of fire escapes basing on the observation of multitude currents, Ministry of Construction, Japan, Volume 14, pp. 1–40 (1955) – In Japanese.
- [4] Predtechenskii V.M., Milinskii A.I.: Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerind Publishing Company, Inc., New Delhi, 1978.
- [5] Kendik E.: Determination of the evacuation time pertinent to the projected area factor in the event of total evacuation of high-rise office buildings via staircases, *Fire Safety Journal* 1983, Vol. 5, No. 3–4, pp. 223–232.
- [6] Melinek S.J., Booth S.: An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings, Current paper CP 96/75, Building Research Establishment, Fire Research Station, Borehamwood, UK (1975).
- [7] Pauls J.: Calculating Evacuation Times for Tall Buildings, *Fire Safety Journal* 1987, Vol.12, pp. 213–236.
- [8] Nelson H.E., Mowrer F.W.: Emergency Movement, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd ed), DiNenno P.J. (ed), National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002, pp. 3/367–380.
- [9] Purser D.A.: Toxicity Assessment of Combustion Products, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd ed), DiNenno P.J. (ed), National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002, pp. 2/83–171.
- [10] Kucera P., Pokorny J.: Fire engineering approach of people evacuation assessment with a practical demonstration, *Safety Engineering* 2011, Vol. 1, No1, pp. 1–6.
- [11] Naai-Jung S., Ching-Yung L., Chin-Hsiang Y.: A virtual-reality-based feasibility study of evacuation time compared to the traditional calculation method, *Fire Safety Journal* 2000, Vol. 34, No 4, pp. 377–391.
- [12] Fang Z.M, Song W.G., Wu H, Zhang J.: A Multi-Grid model for evacuation coupling with the effects of fire products, *Fire Technology* 2012, Vol. 48, pp. 91–104.
- [13] Półka M., Konecki M.: Parametry krytyczne pożaru jako wyznaczniki bezpieczeństwa pożarowego, *Polski Przegląd Medycyny Lotniczej* 2008, tom 14, nr 4, s. 385–394.
- [14] Stec A.: Effects of fire effluents on evacuation conditions, Emergency Evacuation of People from Buildings, Ed. W. Jaskolowski and P. Kepka, p. 333–345, Proceedings from 1st International Scientific and Technical Conference: Emergency Evacuation of People from Buildings, Warsaw, Poland, 2011.

- [15] Konecki M.: Wpływ szybkości wydzielania ciepła i emisji dymu na rozwój pożaru w układzie pomieszczeń, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2007.

Mariusz BARAŃSKI

Tadeusz MACIAK

Fixing the Time for Safe Evacuation of People from Endangered Buildings

The paper presents the progress which has been made in estimating the time of the safe evacuation of people from endangered objects. The most important works on developing more and more accurate mathematical models describing the process of evacuation have been chronologically organized. The paper shows the complexity and the details of the evacuation process. The factors influencing the change in the speed of people movement during the evacuation have been presented.

Keywords: safety in buildings, people evacuation, estimating the evacuation time.

SUMMARY