

st. kpt. mgr inż. poż. Mariusz Barański

Komenda Wojewódzka Państwowej Straży Pożarnej we Wrocławiu,

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa

e-mail: mariusz.baranski@o2.pl

tel. 697-721-131

Recenzja: mgr Agnieszka Haznar-Barańska

Metody obliczania wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji (30 min + 10 min)

Szanowni Państwo,

Ewakuacja jest złożonym procesem polegającym na przemieszczaniu ludzi, zwierząt lub mienia z miejsca zagrożenia (bezpośredniego lub zbliżającego się) do miejsca aktualnie bezpiecznego. Proces ewakuacji może mieć charakter interwencyjny (ratowniczy) lub prewencyjny. Prowadzi się ją z różnych obiektów tj. obiekty budowlane, tereny - obszary, środki transportu, itp. Rozważanie prezentacji będą dotyczyły ewakuacji prewencyjnej ludzi z budynków. Ewakuacja ma na celu ochronę życia i zdrowia ludzi więc powinna odbywać się w warunkach bezpiecznych, szczególnie jeśli jest ona przedmiotem rozważań na etapie projektowania budynków.

Pojęcie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji ewoluowało na przestrzeni XX wieku aby przyjąć obecną formę, która jest uznawana w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego za jedną z lepszych koncepcji oceny bezpieczeństwa ewakuacji [1]. Pomimo krytycznej oceny koncepcja wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji [2] stanowi obecnie jedyne narzędzie do oszacowania poziomu bezpieczeństwa ewakuacji. Zgodnie z tą koncepcją wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest odcinkiem czasu od chwili powstania pożaru do momentu opuszczenia strefy zagrożenia (w tym przypadku budynku) przez ostatnią osobę.

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji składa się w kilku odcinków czasu:

- czas detekcji
- czas alarmowania
- czas reakcji użytkowników budynku:
 - czas rozpoznania alarmu
 - czas reakcji na alarm
- czas przemieszczania się drogami ewakuacyjnymi

Czas detekcji zaczyna się w chwili zainicjowania pożaru, a kończy w chwili przekazania informacji o zagrożeniu do systemu (np. CSP), który będzie odpowiedzialny za rozgłoszenie alarmu o pożarze lub uruchomienia odpowiedniego urządzenia służącego powiadamianiu użytkowników o pożarze (DSO). Zazwyczaj czas detekcji przez elementy systemu sygnalizacji pożarowej będzie zawierał się w przedziale do 60 s. Czas ten ściśle zależy od zakresu ochrony (ochrona całkowita, częściowa), rodzaju zastosowanych elementów detekcyjnych, itp. Detekcja zagrożenia może odbywać się również poprzez użycie ręcznych ostrzegaczy pożarowych lub poprzez aktywację samoczynnych urządzeń gaśniczych. Pytanie do Państwa jaki jest czas detekcji w budynku niewyposażonym w system sygnalizacji pożarowej?

Czas alarmowania jest odcinkiem czasu od chwili otrzymania informacji o pożarze do momentu wygłoszenia alarmu pożarowego. Norma PD 7974-6 wymaga aby w przypadku dźwiękowego systemu ostrzegawczego uwzględnić czas dwukrotnego wygłoszenie komunikatu. Czas ten zależy od przyjętej koncepcji alarmowania – alarmowania jednostopniowe, dwustopniowe. W przypadku alarmowania jednostopniowego alarm ogólny – pożarowy jest uruchamiany od razu po otrzymaniu informacji z urządzeń detekcji pożaru. W przypadku alarmowania dwustopniowego należy przewidzieć czas potrzebny na rozpoznanie sytuacji pożarowej przez obsługę budynku, który w zależności od przyjętych założeń może mieścić się w przedziale od 2 do 5 min.

Czas reakcji użytkowników obiektu jest odcinkiem czasu od chwili ogłoszenia alarmu do momentu rozpoczęcia przez ludzi przemieszczania się ludzi w celu opuszczenia budynku. Ten odcinek czasu jest bardzo zmienny i zależy od wielu czynników psychofizycznych ewakuujących się ludzi. Czas reakcji użytkowników obiektu składa się z dwóch składowych: czasu rozpoznania (zrozumienia) alarmu pożarowego oraz czasu reakcji na alarm pożarowy.

W trakcie rozpoznawania rodzaju ogłoszonego alarmu użytkownicy budynku mogą:

- zatrzymać wykonywane czynności i nasłuchiwać alarmu,
- nasłuchiwać pozostałych odgłosów dochodzących z budynku w celu zorientowania się w sytuacji,
- rozglądać się i oceniać reakcję innych osób,
- rozmawiać z innymi osobami znajdującymi się w pobliżu o niezbędnych działaniach oraz zagrożeniu,
- sprawdzać jak reagują inni (np. w sąsiednim biurze),
- poszukiwać dodatkowych informacji o ogłoszonym alarmie,
- wysłuchiwać pouczeń innych osób,
- ignorować alarm,
- kontynuować wykonywanie pracy.

Na etapie reakcji na wygłoszony alarm użytkownicy budynku mogą:

- gromadzić rodzinę i znajomych,
- próbować ugasić pożar,
- ostrzegać osoby znajdujące się w pobliżu,
- rozmawiać z personelem o planowanych działaniach,

- dzwonić pod numery alarmowe,
- zbierać rzeczy osobiste,
- wybierać odpowiednią drogę ewakuacyjną,
- powracać po pozostawione rzeczy lub osoby.

Wykonanie powyższych czynności wymaga poświęcenia pewnego fragmentu czasu, który wpływa na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji.

W przypadku obiektów hotelowych w etapie reakcji użytkowników użytkownicy mogą chociażby:

- budzić się i wstawać – w zależności od predyspozycji zdrowotnych czynność ta może trwać dłużej,
- ubierać się,
- kończyć prysznic i wycierać,
- dzwonić do recepcji, aby upewnić się o zagrożeniu.

W standardach oraz wytycznych znajdują się sugerowane czasy reakcji użytkowników budynku. Podczas projektowania ewakuacji z budynku, należy zawsze poddać krytycznej ocenie sugerowane czasy reakcji. Niezwykle pomocne w zakresie wyznaczenia czasów reakcji użytkowników budynku na zagrożenie pożarowe mogą być wcześniejsze alarmy nawet fałszywe. Jeśli w obiekcie znajduje się system kamer przemysłowych CCTV możliwe jest wskazanie czasu ogłoszenia alarmu oraz czasu rozpoczęcia ewakuacji przez pierwszą i ostatnią ewakuującą się osobę. Takie dane (o ile ewakuacja przebiegła prawidłowo) mogą posłużyć przy przyszłych analizach.

Czas przejścia drogami ewakuacyjnymi jest odcinkiem czasu od chwili przystąpienia do przemieszczania się do momentu opuszczenia budynku przez ostatnią znajdującą się w budynku osobę. Ze względu na to, że proces przemieszczania się ludzi podlega prawom fizyki podobnym do przepływu cieczy, jest to proces bardzo złożony. Obecne modele algebraiczne oraz komputerowe nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na proces przemieszczania się ludzi. Na przestrzeni ostatnich dekad [3] uwzględniono dość ogólnie wpływ dystansu społecznego na specyfikę poruszania się ludzi. Model ten nazywany jest *Social Force Model*. Zaimplementowano go w oprogramowaniu komputerowym tj. FDS+Evac i Pathfinder. Ze względu na jego bardzo dużą złożoność brak jest możliwości obliczania czasów przejścia drogami ewakuacyjnymi przy jego wykorzystaniu narzędziami algebraicznymi.

Mając na uwadze proces przemieszczania się ludzi drogami ewakuacyjnymi należy uwzględnić przede wszystkim prędkość ich przemieszczania się. Prędkość przemieszczania się nie jest stała i taka sama dla wszystkich. Zależy głównie od wieku i płci. I tak dzieci oraz osoby starsze poruszają się znacznie wolniej niż osoby w sile wieku. Ponadto z badań wynika, że mężczyźni przemieszczają się szybciej niż kobiety. Prędkość przemieszczania się ludzi zależy również od gęstości ich rozmieszczenia. Dla małych gęstości rozmieszczenia ludzi prędkości są maksymalne i spadają liniowo wraz ze wzrostem gęstości zatłoczenia. Przy gęstości ok. 4 os/m² prędkość przemieszczania spada praktycznie do zera. Występują niebezpieczne zdarzenia z udziałem tłumu, w których gęstość rozmieszczenia ludzi osiąga nawet wartość 9 os./m² ale nie ma fizycznych możliwości przemieszczania się ludzi.

Kolejnym parametrem, który ma wpływ na przemieszczanie się ludzi drogami ewakuacyjnymi jest przepływ. Prowadzone badania nad przemieszczaniem się ludzi wykazały, że przepływ drogami ewakuacyjnymi ma swoje maksimum, które wynosi 1,3 os./s/m. Maksymalna wartość przepływu jest możliwa do osiągnięcia przy gęstości rozmieszczenia ludzi na poziomie ok. 2 os./m². Zarówno przy wzroście gęstości rozmieszczenia ludzi jak i spadku przepływ na drogach ewakuacyjnych spada.

Efektywna szerokość drogi ewakuacyjnej jest związana z fizycznymi właściwościami ciała człowieka. Ludzi przemieszczając się drogami ewakuacyjnymi poruszają się głównie jej środkową częścią unikając przeszkody i zachowując dystans od nich. W związku z powyższym efektywna szerokość drogi ewakuacyjnej jest mniejsza niż szerokość rzeczywista wynikająca z pomiaru. Aby wyznaczyć efektywną szerokość drogi ewakuacyjnej należy od szerokości rzeczywistej odjąć podwójną wartość tzw. warstwy granicznej (boundary layer). Dla przykładu drzwi posiadają warstwę graniczną na poziomie 15 cm.

Narzędzia wspierające oszacowanie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji można podzielić na:

- wyrażenia algebraiczne
- modele komputerowe

Wyrażenia algebraiczne opracowywane były na początku XX wieku. Do najbardziej znanych należą równania opracowane przez Predtechenskiy i Milinsky (radzieccy naukowcy). Są oni prekursorami badań nad procesem przemieszczania się ludzi. Jako pierwsi uzależnili prędkość przemieszczania się ludzi od gęstości rozmieszczenia.

Kolejnymi wyrażeniami algebraicznymi są równania Melinka i Bootha. Pozwalają one obliczyć czas przejścia klatkami schodowymi. Występują dwa warianty ich równań. Pierwszy wariant związany jest z ruchem swobodnym, drugi z występowaniem zatorów na drodze ewakuacyjnej.

Następnym wyrażeniem algebraicznym jest równanie Togawy. Jest ono praktycznie tożsame z równaniami zawartymi w PD 7974-6 i SFPE Handbook. Równanie to uwzględnia zarówno swobodny przepływ jak i opóźnienia spowodowane zawężeniami drogi ewakuacyjnej.

Jeśli chodzi o narzędzia w postaci modeli komputerowych to mamy do dyspozycji całą gamę programów. Do najbardziej znanych należy Pathfinder oraz FDS+Evac. Oczywiście każdy z modeli komputerowych ma swoje zalety i wady (ograniczenia). Należy o nich pamiętać i uwzględniać w rzetelnej analizie bezpieczeństwa procesu ewakuacji z budynku. Osoba szacująca wymagany czas bezpiecznej ewakuacji powinna mieć pewność co do sposobu obliczeń oraz powinna znać możliwości i ograniczenia modeli.

Pathfinder (program komercyjny), którego kodu źródłowego nie znamy oraz nie jesteśmy w stanie jednoznacznie stwierdzić jakie algorytmy zostały w nim zaimplementowane. Jest to natomiast oprogramowanie zwalidowane i zweryfikowane. Z prowadzonych badań wynika, że program ten jest pewną formą automatu komórkowego.

FDS+Evac (oprogramowanie darmowe), którego kod źródłowy jest ogólnie dostępny. W modelu tym zaimplementowany jest m.in. model sił społecznych. Model jest zwalidowany i częściowo zweryfikowany.

Automaty komórkowe (narzędzie inżynierii informatyki), stosowany do modelowania różnych zjawisk fizycznych w tym procesie przemieszczania się ludzi. Bez odpowiedniej implementacji, walidacji i weryfikacji nie jest możliwe użycie go do rzetelnej analizy bezpieczeństwa ewakuacji. Modele odpowiednio przygotowane (zweryfikowane) są bardzo wydajne. Pozwalają modelować ewakuację ogromnych ilości ludzi (w dziesiątkach tysięcy) w bardzo krótkim czasie, co dla modeli sił społecznych (FDS+Evac) czy Pathfinder jest nie do osiągnięcia.

Przykład obliczeniowy – CASE STUDY 1

Obliczmy czas przejścia drogami ewakuacyjnymi z najdalszego pomieszczenia w budynku do wyjścia na zewnątrz. Droga ewakuacyjna prowadzi przez pomieszczenie (20 m), następnie korytarzem do klatki schodowej (10 m), kolejno klatkę schodową 5 kondygnacji po (12 m – biegami schodów) do holu, następnie przez hol do wyjścia ewakuacyjnego na zewnątrz budynku (10 m). Klatka schodowa posiada biegi ze stopniami o wysokości 0,175 m i szerokości 0,300 m. Założenie do obliczeń – gęstość rozmieszczenia ludzi na drogach ewakuacyjnych nie będzie większa niż 1 os./m². Przyjmujemy w założeniu, że brak jest miejsc ograniczających przepływ ludzi drogami ewakuacyjnymi. W związku z powyższym pomijamy kwestię przepływu.

Oszacowanie prędkości przemieszczania się ludzi poziomymi i pionowymi drogami ewakuacyjnymi:

$$S = k - akD$$

- pozioma droga: $S = 1,4 - 0,266 * 1,4 * 1 = 1 \text{ m/s}$
- pionowa droga ewakuacyjna: $S = 1,08 - 0,266 * 1,08 * 1 = 0,8 \text{ m/s}$

Całkowity czas przejścia drogami ewakuacyjnymi wynosi:

$$T_{\text{trav}} = (20+10+10)/1 + (5*12)/0,8 = 40+75 = 115 \text{ s (ok. 2 min)}$$

Obliczenia znacznie się komplikują jeśli wchodzimy w zakres ograniczenia przepływów ludzi na drogach ewakuacyjnych, łączenia się strumieni ludzi, zmiany szerokości dróg ewakuacyjnych.

Przykład obliczeniowy – CASE STUDY 2

Budynek biurowy wielokondygnacyjny

1. Wyposażony w system sygnalizacji pożarowej z alarmowaniem dwustopniowym z ochroną pełną.
2. Na poziomie parteru znajduje się portiernia z ochroną obiektu odpowiedzialną za prowadzenie ewakuacji w przypadku zagrożenia.
3. Układ budynku prosty, symetryczny.

4. W budynku przebywają jedynie pracownicy. Gości przyjmuje się jedynie na parterze budynku i stale są pod opieką pracownika firmy.

Mając na uwadze sposób użytkowania obiektu można przyjąć że osoby w nim przebywające są stale czuwający, dobrze zaznajomieni z topografią obiektu i drogami komunikacji ogólnej, gęstość rozmieszczenia ludzi jest na poziomie niskim. Z tego względu użytkownicy obiektu będą zaliczani do kategorii zachowań ludzkich „A” zgodnie ze standardem PD 7974-6.

Na podstawie wyposażenia budynku w urządzenia przeciwpożarowe, założenia organizacyjne oraz złożoność obiektu można przyjąć odpowiednio kategorię A2 w zakresie alarmowania, B2 w zakresie złożoności obiektu oraz M2 w zakresie zarządzania bezpieczeństwem obiektu.

Dla takich założeń możliwe jest wyznaczenie sugerowanych czasów reakcji ludzi na alarm pożarowy:

$$A: A2, B2, M2 \quad t_{pre1\%} = 60 \text{ s} \quad t_{pre99\%} = 120 \text{ s}$$

$$t_{pre} = t_{pre1\%} + t_{pre99\%} \text{ (wersja konserwatywna z PD 7974-6:2004)}$$

$$t_{pre} = 180 \text{ s}$$

$$t_d = 60 \text{ s}$$

$$t_a = 300 \text{ s}$$

$$t_{pre} = 180 \text{ s}$$

$$t_{trav} = 115 \text{ s}$$

$$WCBE = 655 \text{ s} = \text{ok. } 11 \text{ min}$$

Możemy uwzględnić, że w budynku będzie przebywało nie więcej niż 30% maksymalnej projektowanej ilości osób. Pozwala to przyjąć założenia, że w czasie ewakuacji nie będzie zjawiska oczekiwania na drogach ewakuacyjnych w jej przewężeniach lub przy wyjściu z budynku. Założenie to pozwala na skorzystanie z równania:

$$WCBE = t_d + t_a + t_{pre99\%} + t_{trav} = 595 \text{ s} = \text{ok. } 10 \text{ min}$$

Pamiętajmy, że czasy zaokrąglamy zawsze w górę, a nie zgodnie z zasadą do 0,5 w dół a powyżej 0,5 w górę.

Przykład obliczeniowy – CASE STUDY 3

Budynek hotelowy wielokondygnacyjny

1. Wyposażony w system sygnalizacji pożarowej z alarmowaniem dwustopniowym z ochroną pełną.
2. Na poziomie parteru znajduje się recepcja z ochroną obiektu odpowiedzialną za prowadzenie ewakuacji w przypadku zagrożenia.
3. Układ budynku prosty, symetryczny.
4. W budynku przebywają goście nie znający szczegółowo topografii budynku.

Mając na uwadze sposób użytkowania obiektu można przyjąć że osoby w nim przebywające są śpiący, nie zaznajomieni z topografią obiektu i drogami komunikacji ogólnej, gęstość rozmieszczenia ludzi jest na poziomie niskim. Z tego względu użytkownicy obiektu będą zaliczani do kategorii zachowań ludzkich „C_{III}” zgodnie ze standardem PD 7974-6.

Na podstawie wyposażenia budynku w urządzenia przeciwpożarowe, założenia organizacyjne oraz złożoność obiektu można przyjąć odpowiednio kategorię A2 w zakresie alarmowania, B2 w zakresie złożoności obiektu oraz M2 w zakresie zarządzania bezpieczeństwem obiektu.

Dla takich założeń możliwe jest wyznaczenie sugerowanych czasów reakcji ludzi na alarm pożarowy:

$$A: A2, B2, M2 \quad t_{pre1\%} = 1200 \text{ s} \quad t_{pre99\%} = 1200 \text{ s}$$

$$t_{pre} = t_{pre1\%} + t_{pre99\%} \text{ (wersja konserwatywna z PD 7974-6:2004)}$$

$$t_{pre} = 2400 \text{ s}$$

$$t_d = 60 \text{ s}$$

$$t_a = 300 \text{ s}$$

$$t_{pre} = 2400 \text{ s}$$

$$t_{trav} = 115 \text{ s}$$

$$WCBE = 2875 \text{ s} = \text{ok. } 48 \text{ min}$$

Możemy uwzględnić, że w budynku będzie przebywało nie więcej niż 30% maksymalnej projektowanej ilości osób. Pozwala to przyjąć założenia, że w czasie ewakuacji nie będzie zjawiska oczekiwania na drogach ewakuacyjnych w jej przewężeniach lub przy wyjściu z budynku. Założenie to pozwala na skorzystanie z równania:

$$WCBE = t_d + t_a + t_{pre99\%} + t_{trav} = 1675 \text{ s} = \text{ok. } 28 \text{ min}$$

Jak łatwo zauważyć w zależności od przeznaczenia, funkcji budynku czas reakcji użytkowników może mieć decydujący wpływ na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji. Dla budynku biurowego czas reakcji użytkowników stanowi niespełna 28% wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji, natomiast dla budynku hotelowego aż 83%.

Proszę Państwa ile czasu potrzeba na ewakuację obiektu widowiskowego przeznaczonego dla ok. 70-75 tys. osób?

Na zakończenie przedstawię Państwu strategiczny obiekt widowiskowy zaprojektowany i wybudowany przez naszych przodków (Koloseum Rzymskie), które mogło pomieścić ok. 75 tys. osób. Otóż, ewakuacja tego obiektu przewidziana była przez łącznie 60 wyjść (w niektórych źródłach 80 wyjść). Z obecnych badań wynika, że możliwa była jego ewakuacja w czasie do 5 minut !!!!!

Dla porównania Stadion Wrocław pomieści 43 tys. osób. Zakładany czas ewakuacji 15-20 minut.

**Osoby zainteresowane zagadnieniami bezpieczeństwa
procesu ewakuacji zapraszam do współpracy.**

Literatura:

1. Ng, Candy MY, and W. K. Chow. "A brief review on the time line concept in evacuation." *International journal on architectural science* 7.1 (2006): 1-13.
2. Babrauskas, Vytenis, Joseph M. Fleming, and B. Don Russell. "RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment." *Fire and Materials* 34.7 (2010): 341-355.
3. Helbing, Dirk, and Peter Molnar. "Social force model for pedestrian dynamics." *Physical review E* 51.5 (1995): 4282.
4. Barański, M., and T. Maciak. "Przegląd aktów prawnych i norm związanych z zagadnieniem ewakuacji." *Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej* (2013).
5. Barański, M., and T. Maciak. "Określanie czasu procesu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów." *Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej* 49 (1) (2014): 78-97.
6. Barański, M., and T. Maciak. "Możliwości współczesnego oprogramowania do symulacji procesu ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów." *Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej* (2014).
7. Barański, M., and T. Maciak. "Analiza rozwoju pożarów i ewakuacji wybranych fragmentów budynku wysokościowego przy zastosowaniu Fire Dynamics Simulator+ Evac." *Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej* (2015).
8. Maciak, Tadeusz, and Mariusz Barański. "Wprowadzenie do komputerowego modelowania zachowania się tłumu. Wybrane aspekty psychologii tłumu." *Safety & Fire Technology* 40 (2015).
9. Barański, Mariusz, and Tadeusz Maciak. "Automaty komórkowe w modelowaniu ewakuacji." *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 43.3 (2016).
10. Mariusz, Barański, and Maciak Tadeusz. "An evacuation model using cellular automata." *Safety & Fire Technology* 45.1 (2017).
11. Barański, Mariusz. "A Review of Models That Take Into Account the Effects of Emotional Contagion During Evacuation." *Safety & Fire Technology* 53.1 (2019).
12. Barański, Mariusz, and Dorota Brzezińska. "Bezpieczeństwo procesu ewakuacji w pomieszczeniach handlowych." *Instal* (2020).
13. Barański Mariusz, Dorota Brzezińska, „Bezpieczeństwo ewakuacji w warunkach pandemii COVID-19”, *Cyrkulacje* 64/2021.