Bezpieczeństwo procesu ewakuacji w pomieszczeniach handlowych

Safety of the evacuation process in commercial rooms

MARIUSZ BARAŃSKI, DOROTA BRZEZIŃSKA

DOI 10.36119/15.2020.10.3

W artykule przedstawiono wyniki modelowania rozwoju pożaru i ewakuacji w pomieszczeniu handlowym w sytuacji zgromadzenia dużej liczby osób. Przeprowadzone badania polegały na określeniu wymaganego i dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji w kilku wybranych wariantach uwzględniających liczbę, szerokość i lokalizację wyjść ewakuacyjnych z pomieszczenia, a także liczbę znajdujących się w nim osób. W oparciu o uzyskane wyniki potwierdzono, że zapewnienie w pomieszczeniu handlowym parametrów przejścia ewakuacyjnego oraz wyjść ewakuacyjnych zgodnych z warunkami technicznymi nie zapewnia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Wykazano, że niezbędne jest wyposażenie obiektu w dodatkowe urządzenia przeciwpożarowe pozwalające na ograniczenie rozwoju pożaru, rozprzestrzeniania się gorącego i toksycznego dymu, a także pozwalających na lepszą organizację procesu ewakuacji.
Słowa kluczowe: proces ewakuacji, droga ewakuacyjna, urządzenia przeciwpożarowe, wentylacja pożarowa

The article presents the results of modeling the development of fire and evacuation in a commercial room in a situation of large numbers of people. The conducted research consisted in determining the required and available safe egress time in several selected variants, taking into account the number, width and location of emergency exits from the room, as well as the number of people in the room. Based on the obtained results, it was confirmed that providing the parameters of the emergency passage and emergency exits in the commercial room in accordance with the technical conditions does not ensure an adequate level of safety. It has been shown that it is necessary to equip the facility with additional fire protection devices to limit the development of fire, the spread of hot and toxic smoke, and to better organize the evacuation process.
Keywords: evacuation process, escape route, fire-fighting devices, fire ventilation

Wprowadzenie

Człowiek w sytuacji zagrożenia staje przed wyborem walki z nim lub ucieczki, nazywanej także ewakuacją [1;2]. Reakcja walki lub ucieczki (ang. fight-or-flight) po raz pierwszy została opisana przez Waltera Bradforda Cannona na początku XX wieku [3]. Jest ona podstawowym działaniem mającym na celu ochronę życia i zdrowia ludzi w przypadku powstania wszelkiego rodzaju zagrożeń. Na bezpieczeństwo procesu ewakuacji ma wpływ szereg czynników. Wśród nich można szczególnie wyróżnić uwarunkowania architektoniczne budynku (tj. rozkład pomieszczeń, ich wysokość, parametry dróg ewakuacyjnych) oraz dynamikę rozwoju pożaru. Zapewnienie odpowiednich warunków bezpieczeństwa ludzi w budynku wymaga zaprojektowania go i wykonania zgodnie z przepisami. Rozpoczęcie procesu ewakuacji w przeważającej części odbywa się w miejscu powstania pożaru. Pierwszym odcinkiem drogi jaki pokonują ewakuujące się osoby jest przejście ewakuacyjne, znajdujące się w pomieszczeniu. Parametry przejścia ewakuacyjnego w zakresie jego długości i szerokości, w odniesieniu do liczebności ewakuowanej grupy ludzi, ma ogromne znaczenie dla powodzenia procesu ewakuacji. W budynkach zaprojektowanych zgodnie z przepisami mogą występować warunki uzasadniające zastosowanie odpowiednich urządzeń przeciwpożarowych w postaci stałych urządzeń gaśniczych wodnych lub systemów dynamicznego oznakowania dróg ewakuacyjnych w celu poprawy bezpieczeństwa przebywających w nich osób. Warunki ewakuacji ludzi z budynków są regulowane przepisami, jednak dokładna analiza czasów ewakuacji możliwa jest jedynie z wykorzystaniem metod inżynierii pożarowej.

Dostępny oraz wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jako wyznacznik bezpieczeństwa

Dyskusje na temat sposobów szacowania czasu ewakuacji toczą się już od początku XX wieku. Na przestrzeni lat koncepcja czasu ewakuacji ulegała znacznym zmianom [9]. Obecnie w dziedzinie inżynierii bezpieczeństwa pożarowego przyjmuje się dwa pojęcia ściśle związane z czasem ewakuacji: dostępny czas bezpiecznej ewakuacji – Avaiable Safe Escape Time (ASET) i wymagany czas bezpiecznej ewakuacji – Required Safe Escape Time (RSET) [10;11].

Porównanie tych czasów daje pogląd na bezpieczeństwo procesu ewakuacji z budynku. Uwzględnienie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa pozwala na zabezpieczenie wszelkiego rodzaju opóźnień podczas ewakuacji użytkowników budynku.

Podczas analizy dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji niezbędne jest przeprowadzenie kalkulacji dla wielu scenariuszy pożarowych. Dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa scenariusze muszą odnosić się do warunków najbardziej niekorzystnych, które mogą wystąpić w obiekcie. Tak przeprowadzona analiza pozwala przygotować budynek do prowadzenia ewakuacji w przypadku najbardziej niekorzystnego zdarzenia [12].

Dostępny czas bezpieczniej ewakuacji jest czasem od momentu powstania pożaru do chwili, po której warunki panujące w budynku lub rozpatrywanej jego części

Mgr inż. Mariusz Barański https://orcid.org/ 0000-0002-2217-6539, dr hab. inż. Dorota Brzezińska – https://orcid.org/0000-0003-4615-4454, Politechnika Łódzka. Adres do korespondencji/ Corresponding author: dorota.brzezinska@p.lodz.pl

stają się krytyczne dla użytkowników. Podstawowymi warunkami krytycznymi są:

- przekroczenie granicznej temperatury,
- przekroczenie strumienia promieniowania cieplnego,
- zmniejszenie widzialności,
- przekroczenie stężenia gazów toksycznych,
- spadek stężenia tlenu,
- uszkodzenie obiektu lub jego elementów.

Rozwijający się pożar jest źródłem dymów i gazów pożarowych o wysokiej temperaturze. Wysoka temperatura powoduje u ewakuujących się osób oparzenia. Im wyższa temperatura tym krótszy czas ekspozycji, który powoduje takie same skutki. Również gęstość strumienia ciepła pochodzącego od ogniska pożaru, jak również od gorących gazów pożarowych, może powodować oparzenia. Produkty spalania zawierają ponadto szereg związków chemicznych, toksycznych dla człowieka, a występująca sadza ogranicza widzialność otoczenia w tym znaków ewakuacyjnych.

Z tego względu istotnym zagadnieniem jest właściwe przygotowanie użytkowników budynku do ewentualnej ewakuacji w warunkach pożaru. W sytuacji występowania zadymienia na drogach ewakuacyjnych ludzie powinni przemieszczać się w pozycji pochylonej najbliżej podłogi, tak aby jak najmniej narażać się na oddziaływanie dymów i gazów pożarowych. Powinni również kierować się do wyjść ewakuacyjnych zgodnie z kierunkami ewakuacji, a w przypadku gdy w budynku występuje przeszkolony personel zgodnie z jego poleceniami. Szybka i skuteczna ewakuacja jest warunkiem przeżycia w sytuacji szybko rozwijającego się pożaru.

Przyjmuje się, że temperatura atmosfery na wysokości od 1,5 ÷ 1,8 m przekraczająca wartość 60°C jest krytyczna dla procesu ewakuacji [10; 13]. Przekroczenie temperatury 200°C górnej warstwy produktów spalania znajdującej się na wysokości od 2 m w górę również uznaje się za warunek krytyczny. Ma to związek z kolejnym warunkiem krytycznym jakim jest gęstość strumienia ciepła. Od gorących gazów pożarowych promieniuje strumień ciepła. Jeśli jego gęstość przekracza 2,5 kW/m^2 to może on powodować oparzenia przy dłuższej ekspozycji. Wartość nieco mniejsza wynosząca 2,1 kW/m^2 jest wartością progową dla wywołania bólu przy czasie ekspozycji dłuższym niż jedna minuta [14].

Ograniczenie widzialności w szczególności w złożonych układach komunikacyjnych budynków może doprowadzić do zagubienia się ewakuujących się osób i pozostanie w strefie zagrożenia. Przyjmuje się dwie wartości krytyczne dla tego parametru. W przypadku małych przestrzeni wartością krytyczną jest zasięg widzialności na poziomie 5 m. W przypadku rozległych, dużych przestrzeni ten zasięg wynosi 10 m [10].

Produkty rozkładu termicznego materiałów palnych zawierają różnorodne gazy toksyczne [Porowski2018]. Przekroczenie określonych stężeń tych gazów może powodować zatrucie i śmierć ewakuujących się osób. Istotnym elementem zwiększającym skutki i ryzyko śmierci jest zjawisko synergii. Występowanie w środowisku pożaru, np.: dwutlenku węgla powoduje u ludzi przyspieszenie tempa oddychania, a to w konsekwencji ma wpływ na znacznie intensywniejszą inhalację pozostałymi gazami toksycznymi [11; 15; 16]. Występowanie produktów spalania w atmosferze powoduje wypieranie tlenu i zmniejszenie jego ilości. Przy stężeniu poniżej 12-13% zawartości tlenu w atmosferze dochodzi do utraty możliwości działania (utraty przytomności) już po ok. 5 minutach ekspozycji.

Należy również podkreślić kwestię zachowania odpowiednich parametrów odporności ogniowej elementów budynku. Nie sposób prowadzić ewakuacji drogami ewakuacyjnymi, których nośność, szczelność czy izolacyjność została przekroczona w warunkach pożaru, a elementy te zostały uszkodzone. Utrata parametrów odporności ogniowej głównej konstrukcji nośnej budynku jak również elementów konstrukcyjnych dróg ewakuacyjnych jest parametrem krytycznym dla bezpiecznego prowadzenia ewakuacji z budynku.

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest czasem od chwili powstania pożaru do momentu opuszczenia obiektu przez ostatnią ewakuującą się osobę. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji składa się z kilku podstawowych składowych t.j.:

- czas detekcji,
- czas alarmowania,
- czas rozpoznania,
- czas reakcji,
- czas przejścia.

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest składową wielu elementów. Zdeterminowany jest on dwoma kluczowymi składowymi – czynnikiem organizacyjno-architektonicznym oraz czynnikiem ludzkim.

Czynnikami organizacyjno-architektonicznymi są: sposób zabezpieczenia budynku, odpowiednie zaprojektowanie dróg ewakuacyjnych, a także występujące w nim urządzenia przeciwpożarowe w szczególności system sygnalizacji pożarowej. To od rodzaju zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz ich konfiguracji zależy czas detekcji i alarmowania. Szybka detekcja rzeczywistego pożaru oraz właściwe i skuteczne alarmowanie pozwalają skrócić wymagany czas bezpiecznej ewakuacji. Ponadto odpowiednio zaprojektowane drogi ewakuacyjne pozwalają uniknąć wszelkiego rodzaju opóźnień w procesie ewakuacji. Odpowiednie zaplanowanie procesu ewakuacji ma ogromne znaczenie w celu uniknięcia ewentualnych opóźnień, ale także ograniczenia wprowadzania nadmiernego stresu wywołanego alarmem pożarowym [17; 18; 2].

Drugą ze składowych jest charakterystyka grupy użytkowników obiektu oraz ich przygotowanie na wypadek pożaru i ewakuacji. To od rodzaju występujących w budynku użytkowników zależy czas rozpoznania alarmu, czas reakcji na wygłoszony alarm oraz czas przejścia drogami ewakuacyjnymi. Inaczej będzie przebiegał proces ewakuacji przedszkola, gdzie dzieci ewakuowane są pod nadzorem opiekunów, a inaczej budynek biurowy. Ogromne znaczenie w tym przypadku ma kwestia czy w danym obiekcie prowadzony jest nocleg i czy użytkownicy są zaznajomieni z obiektem w szczególności z warunkami i organizacją ewakuacji.

Porównanie dostępnego i wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji daje pogląd na bezpieczeństwo użytkowników w danym obiekcie budowlanym. Różnica pomiędzy dostępnym, a wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji jest **marginesem bezpieczeństwa**. Nie bez znaczenia pozostaje informacja jakiego rzędu jest ta różnica. Margines bezpieczeństwa wynoszący kilka sekund w stosunku do wielominutowego procesu ewakuacji może być niewystarczający.

Metody obliczania wymaganego i dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji

Kalkulacja dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji polega na określeniu przestrzenno-czasowego rozkładu warunków krytycznych w budynku. Rozkład taki możemy określić na dwa sposoby t.j. doświadczalnie lub za pomocą modelowania komputerowego CFD.

Najbardziej obiektywną metodą pomiaru są doświadczenia. Określenie parametrów krytycznych za pomocą doświadczenia może odbywać się przy wykonywaniu testów pożarowych w pełnej [22; 23] lub małej skali [24; 25; 26]. Niestety ze względów finansowych oraz organizacyjnych są one bardzo rzadko wykonywane [27]. Metoda testów w skali rzeczywistej jest bardzo kosztowna, wymaga solidnego zaplecza logistycznego oraz dużej wiedzy w zakresie przygotowania odpowiednich testów. Wadą testów w skali rzeczywistej jest również fakt, że nie zawsze można je przeprowadzić wielokrotnie badając różne parametry początkowe. Jednak testy te dają najdokładniejsze wyniki dla danego układu budynku i założonego scenariusza rozwoju pożaru. Inną metodą badawczą w zakresie określania dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji jest modelowanie rozwoju pożaru.

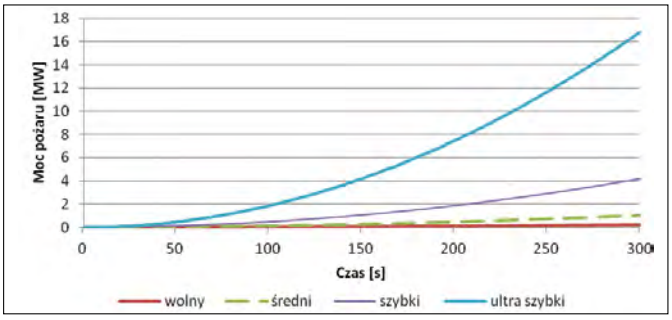
W tym zakresie możemy posłużyć się krzywymi nominalnymi. Krzywe nominalne służą głównie do określania parametrów nośności konstrukcji, która w pewnych określonych okolicznościach również jest warunkiem krytycznym dla prowadzenia ewakuacji. Do dyspozycji mamy następujące krzywe nominalne: krzywa standardowa, krzywa pożaru zewnętrznego oraz krzywa węglowodorowa. Kolejnym narzędziem są modele komputerowe pożaru. Modele dzielimy na dwie główne kategorie – modele strefowe oraz modele przepływowe. Jednym z najbardziej znanych i rozpowszechnionych modeli strefowych jest model CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke Transport) [28] i Ozone3 [29]. Natomiast modele przepływowe to m.in. FDS (Fire Dynamics Simulator) [30] czy Fluent [31].Alternatywną metodą określania dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji może być wykonanie prób dymowych [32]. Pomimo, iż jest to narzędzie do analizy skuteczności działania wentylacji oddymiającej to pośrednio możne posłużyć do określenia warunków panujących podczas rzeczywistego pożaru w tym do określenia dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji.

Jedną z podstawowym metod kalkulacji wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji jest oszacowanie go na podstawie normy PD 7974-6 [10]. Norma ta pozwala na określenie sugerowanych czasów reakcji użytkowników w zależności od scenariusza zachowań ludzkich. Zakłada ona przyjęcie określonych czasów pierwszych reakcji ludzi w zależności od grupy do jakiej należą, rodzaju systemu sygnalizacji pożaru, złożoności architektonicznej obiektu oraz od jakości systemu zarządzania bezpieczeństwem. Alternatywnym sposobem oszacowania wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji jest wykonanie próbnych ewakuacji. Tak wyznaczony wymagany czas bezpiecznej ewakuacji może jednak różnić się od występującego przy realnym zagrożeniu. Próbna ewakuacja w warunkach bezstresowych przebiega przeważnie płynnie bez ograniczeń. Wprowadzenie stresora w postaci rozprzestrzeniającego się zagrożenia może spowodować powstanie niekorzystnych zachowań, a tym samym wydłużyć proces ewakuacji. Elementem wpływającym na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji może również być lokalizacja źródła zagrożenia, które eliminuje niektóre z dróg ewakuacyjnych, a tym samym wpływa na wydłużenie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji.

Bezpieczeństwo ewakuacji w zakresie przejścia ewakuacyjnego – analiza przypadku

Pierwszym odcinkiem drogi jaki pokonują ewakuujące się osoby jest przejście ewakuacyjne, znajdujące się jeszcze w pomieszczeniu. Parametry przejścia ewakuacyjnego w zakresie jego długości i szerokości w odniesieniu do liczebności ewakuowanej grupy ludzi ma ogromne znaczenie dla powodzenia procesu ewakuacji. Przy projektowaniu obiektów uwzględnia się ich przeznaczenie oraz projektuje na wypadek wystąpienia ewentualnego pożaru. Ma to miejsce także w przypadku obiektów handlowych. Podczas użytkowania tego typu obiektów dochodzi niejednokrotnie do nieprzewidzianych zdarzeń i sytuacji. Szczególnie niebezpieczną sytuację może stworzyć zgromadzenie się znacznej liczby osób w niewielkiej przestrzeni. Sytuacja taka może być spowodowana chociażby chęcią nabycia promocyjnych artykułów przez znaczną liczbę osób w tym samym czasie, tzw. promocje Black Friday.

Rysunek 2. Tempo rozwoju pożarów. Źródło: opracowanie własne na podstawie [11]



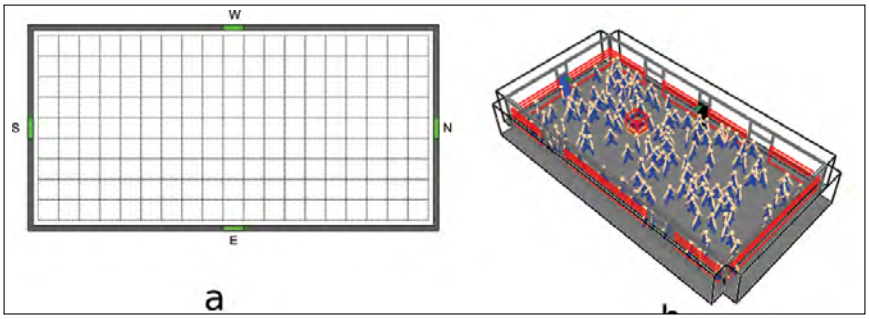
Do prezentowanej tutaj analizy bezpieczeństwa ewakuacji przyjęto pomieszczenie handlowe o wymiarach 10 x 20 m. Modelowanie rozwoju pożaru przeprowadzono dla pożaru o powierzchni 1 m^2, rozwijającego się zgodnie ze standardową krzywą rozwoju pożaru szybkiego [11].

Tempo rozwoju pożaru modelowane jest poprzez wzrost gęstości mocy pożaru wydzielanej w czasie. Lokalizacja pożaru w każdej kolejnej symulacji jest losowana. Materiałem spalanym jest pianka poliuretanowa, jej parametry dla modelu reakcji spalania zostały zaczerpnięte z SFPE Handbook, ed. 3 [11]. Założono, że z pomieszczenia prowadzi od 1 do 4 wyjść ewakuacyjnych i każde wyjście zlokalizowane jest na odrębnej ścianie pomieszczenia. Liczba osób przebywających w pomieszczeniu jest losowana dla każdej symulacji z zakresu od 50 do 200 osób. Maksymalna liczba osób jest przyjęta jak dla sal konferencyjnych, lokali gastronomiczno-rozrywkowych, poczekalni, holi, świetlic – 1 m^2/osobę analogicznie do *§236 ust. 6 rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [8].* Szerokość drzwi stanowiących wyjścia ewakuacyjne są losowane spośród następujących wartości 0,6; 0,8; 1,0 i 1,2 m.

Rysunek1. Przykładowe pomieszczenie handlowe, Źródło: materiał autora

Do modelowania wykorzystano Fire Dymamics Simulator, który posiada rozszerzenie Evac umożliwiające modelowanie rozwoju pożaru równocześnie z przebiegiem procesu ewakuacji. Fire Dynamics Simulator wykorzystuje metody numeryczne do rozwiązywania zagadnień przepływu płynów stanowiących dział mechaniki płynów. Jest to tak zwana obliczeniowa mechanika płynów CFD (Computational Fluid Dynamics). Jest to program przeznaczony głównie do modelowania zjawisk związanych z rozprzestrzenianiem się dymu i ciepła w warunkach pożaru. Dzięki możliwości wymodelowania rozprzestrzeniania się dymu i ciepła możliwe jest określenie miejsca i czasu występowania warunków krytycznych w określonej przestrzeni w warunkach projektowanego pożaru. Program został opracowany przez National Institute of Stadnards and Technology (NIST) i stale jest rozwijany [przypis]. Jest jednym z najpopularniejszych programów stosowanych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Dla programu dostępne są odpowiednie programy lub rozszerzenia programów tzw. nakładki ułatwiające przygotowanie pliku wsadowego. Takimi programami są: Pyrosim [34], BlenderFDS [35], acad2fds [36]. W oprogramowaniu został zastosowany wielkowirowy model turbulencji LES (Large Eddy Simulation).

FDS+Evac traktuje każdą modelowaną osobę jako indywidualnego agenta, którego przemieszczenie określane jest na podstawie określonych równań ruchu. Takie podejście do modelowania pozwala na przypisanie każdemu agentowi indywidualnych właściwości osobistych i strategii ucieczki. Na agentów oddziałują siły indywidualnej motywacji, oddziaływania pomiędzy innymi agentami oraz pomiędzy agentem, a występującymi na drodze ewakuacyjnej przeszkodami.



Rysunek 3.
Układ modelowanego pomieszczenia (a – szkic pomieszczenia, b – rzut pomieszczenia w programie FDS). Źródło: opracowanie własne

Równania ruchu agentów rozwiązywane są za pomocą dyssypatywnej dynamiki cząstek. Model oszacowuje ruch agentów w sposób ciągły w czasie i przestrzeni. Każdy agent reprezentowany jest przez trzy połączone ze sobą koła, których ostateczny kształt zbliżony jest do eliptycznego przekroju poziomego ciała człowieka. Rozmiar modelowanego ciała oraz prędkości przemieszczania się są losowane z odpowiednim rozkładem.

Dla potrzeb niniejszego artykułu wykonano kilka symulacji ewakuacji wraz z rozwojem pożaru. Zestawienie poszczególnych scenariuszy wraz z ich parametrami zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wygenerowane scenariusze rozwoju pożaru

Scenariusz	Liczba osób	Lokalizacja pożaru	Szybkość rozwoju pożaru	Kierunki wyjść ewakuacyjnych	Łączna szerokość wyjść ewakuacyjnych [m]
1	2	3	4	5	6
A-3	52	(10,8)	szybki	SENW	4,0
A-10	177	(16,2)	szybki	SEN	3,0
A-19	72	(2,7)	szybki	SEN	3,0
A-27	189	(15,9)	szybki	SW	2,0
A-33	157	(1,5)	szybki	SW	2,0
A-36	178	(13,6)	szybki	SE	2,0
A-45	196	(6,4)	szybki	SNW	3,6
A-50	163	(9,8)	szybki	EW	2,4

Analiza bezpieczeństwa ewakuacji na podstawie dostępnego i wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji

Dla poszczególnych scenariuszy przeprowadzono także kalkulację wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji na podstawie normy PD 7974-6. W obliczeniach przyjęto kategorię scenariusza zachowań B1 jak dla sklepów, restauracji w których ludzie są czuwający i nieznający budynku. Dla takiego scenariusza przyjęto czas reakcji pierwszych osób $\Delta t_{pre\ (1st\ percentile)}$ na poziomie 0,5 min oraz czas reakcji ostatnich osób $\Delta t_{pre\ (99th\ percentile)}$ na poziomie 2 min. Średnią prędkość przemieszczania się poziomymi drogami ewakuacyjnymi przyjęto na poziomie 1,2 m/s. Natomiast maksymalny przepływ na wyjściach ewakuacyjnych o wartości 1,3 os/s przypadający na metr efektywnej szerokości wyjścia ewakuacyjnego. Dla wyjść ewakuacyjnych w postaci drzwi efektywna szerokość wyjścia jest ich szerokością rzeczywistą pomniejszoną o 0,3 m.

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest uzależniony od liczby wyjść ewakuacyjnych, ich lokalizacji, szerokości, oraz od liczby osób przebywających w pomieszczeniu. Jak wynika z przedstawionych wcześniej analiz największa długość przejścia z pomieszczenia do wyjścia ewakuacyjnego występuje dla scenariuszy A-27, A-33 i A-50, gdzie dwa wyjścia ewakuacyjne zlokalizowane są na dwóch sąsiednich ścianach. W związku z powyższym przeciwległy kąt pomieszczenia znajduje się w odległości ok. 14,14 m od najbliższego wyjścia ewakuacyjnego. Najkorzystniejszy pod względem długości przejścia ewakuacyjnego scenariusz (A-3) uwzględnia występowanie czterech wyjść ewakuacyjnych, po jednym na każdej ścianie pomieszczenia. W związku z symetrycznym rozmieszczeniem wyjść ewakuacyjnych na każdej ze ścian pomieszczenia długość przejścia ewakuacyjnego nie przekracza w takim przypadku 6,2 m. Zestawienie oszacowanych wymaganych normowych czasów bezpiecznej ewakuacji, w zależności od przyjętego scenariusza przedstawiono w tabeli 2.

Określenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji dokonano w oparciu o modelowanie przy wykorzystaniu programu FDS+Evac. Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji w zależności od lokalizacji pożaru nie różni się

Tabela 2. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji dla poszczególnych scenariuszy wg PD 7974-6

Scenariusz	Liczba osób	Maksymalna długość przejścia [m]	Liczba wyjść [szt.]	Łączna szerokość wyjść ewakuacyjnych [m]	Łączna efektywna szerokość wyjść ewakuacyjnych [m]	Oszacowany wymagany czas bezpiecznej ewakuacji [s]
1	2	3	4	5	6	7
A-3	52	6,2	4	4,0	2,8	125,2 (49,5)
A-10	177	10,0	3	3,0	2,1	128,3 (103,2)
A-19	72	10,0	3	3,0	2,1	128,3 (64,7)
A-27	189	14,14	2	2,0	1,4	131,8 (145,6)
A-33	157	14,14	2	2,0	1,4	131,8 (128,0)
A-36	178	14,14	2	2,0	1,4	131,8 (139,6)
A-45	196	10,0	3	3,6	2,7	128,3 (94,2)
A-50	163	11,18	2	2,4	1,8	129,3 (109,0)

* – oszacowany zgodnie ze wzorem nr 3 z PD 7974-4
** – oszacowany zgodnie ze wzorem nr 4 z PD 7974-4

znacznie i jest na poziomie ok. 71 s w kontekście ograniczenia widzialności poniżej 10 m. Natomiast ze względu na niewielkie wymiary pomieszczenia warunkiem krytycznym, który należy przyjmować jest zasięg widzialności na poziomie 5 m. Temperatura przekraczająca wartość 60°C powoduje ograniczenie ewakuacji w 155 s od powstania pożaru. Natomiast przekroczenie temperatury 200°C na poziomie 2 m rozpoczyna się w 230 s od chwili powstania pożaru. W tym miejscu należy podkreślić, że projektowane pomieszczenie spełnia wymagania warunków technicznych, a pomimo tego nie zapewnia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Ze względu na interakcję ludzi ze środowiskiem pożaru rzeczywisty czas ewakuacji określony z wykorzystaniem programu FDS+Evac różni się od wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji oszacowanego przy wykorzystaniu normy PD 7974-6 co przedstawiono w kolumnie 6 tabeli nr 3.

Analiza otrzymanych wyników

W analizowanym pomieszczeniu mogą występować skrajnie różne warunki ewakuacji w zależności od występujących warunków architektonicznych (w tym przypadku liczby i szerokości wyjść ewakuacyjnych) jak również liczby znajdujących się w nim osób.

Wykorzystanie jedynie normy PD 7974-6 [10] do określania bezpieczeństwa procesu ewakuacji, bez weryfikacji otrzymanych

Tabela 3. Wyniki niedoszacowania wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji oraz cząstkowa efektywna dawka śmiertelna ostatniej ewakuującej się osoby

Scenariusz	Liczba osób	Czas ewakuacji w warunkach rozwijającego się pożaru[1] [s]	Czas ewakuacji bez rozwoju pożaru[1] [s]	Maksymalny oszacowany czas ewakuacji[2] [s]	Różnica pomiędzy oszacowanym, amodelowanym czasem ewakuacji w warunkach pożaru [s] [kol. 5 – kol.3]	FED[3] – dla ostatniej ewakuującej się osoby [-]
1	2	3	4	5	6	7
A-3	52	140	126	125,2	-14,8	0,005
A-10	177	156	135	128,3	-27,7	0,007
A-19	72	146	125	128,3	-17,7	0,007
A-27	189	397	172	145,6	-251,4	0,478
A-33	157	206	154	131,8	-74,2	0,029
A-36	178	183	159	139,6	-43,4	0,018
A-45	196	150	127	128,3	-21,7	0,007
A-50	163	149	130	129,3	-19,7	0,007

[1] – wyznaczony przy użyciu FDS+Evac
[2] – oszacowany na podstawie PD 7974
[3] – Fractional Effective Dose określona przy użyciu FDS+Evac

wyników, przy zastosowaniu dostępnych modeli ewakuacji i rozwoju pożaru, może prowadzić do niedoszacowania wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji. Dla powyższych scenariuszy, w większości przypadków określony na podstawie normy PD 7974-6 [10] wymagany czas bezpiecznej ewakuacji okazał się być niedoszacowany. Różnica pomiędzy wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji określonym przy użyciu normy PD 7974, a czasem ewakuacji w warunkach rozwijającego się pożaru waha się w przedziale od 14,8 s aż do 251,4 s.

Największe niedoszacowania występują dla scenariuszy z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi oraz liczbą osób w pomieszczeniu przekraczającą 150. W przypadku trzech i czterech wyjść ewakuacyjnych, jak i liczby osób mniejszej niż 150 różnica nie przekracza 14%.

Niedoszacowanie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji może doprowadzić do sytuacji, że przeprowadzenie rzeczywistej ewakuacji będzie miało miejsce w warunkach krytycznych. Wprowadzenie systemu oddymiania pozwala skrócić czas ewakuacji ze względu na poprawę warunków występujących podczas tego procesu.

System oddymiania jako czynnik poprawy warunków ewakuacji

Celem systemu oddymiania jest zapewnienie odpowiednich warunków ewakuacji z budynku. Instalacja wentylacji oddymiającej zgodnie z § 270 [8] powinna usuwać dym z intensywnością zapewniającą, że w czasie potrzebnym do ewakuacji ludzi na chronionych przejściach i drogach ewakuacyjnych nie wystąpi zadymienie i temperatura uniemożliwiające bezpieczną ewakuację. Ponadto powinna mieć stały dopływ powietrza zewnętrznego uzupełniającego braki powietrza w wyniku jego wypływu wraz z dymem. Wentylację oddymiającą dzielimy na mechaniczną (przewodową) oraz grawitacyjną. Zasadą działania wentylacji oddymiającej jest usuwanie dymu z warstwy dymu zgromadzonej pod stropem i utrzymywanie wolnej od dymu przestrzeni, w której mogą ewakuować się ludzie. Odpowiednie zaprojektowanie skutecznego systemu wentylacji pożarowej pomieszczeń handlowych ze względu na ich wysokość może niekiedy stanowić wyzwanie dla projektantów [37].Dla potrzeb niniejszej analizy założono, że zastosowanie instalacji oddymiania grawitacyjnego zapewni naturalny przepływ dymu w górę pomieszczenia w wyniku działania sił wyporu. Do obliczenia wymaganej powierzchni czynnej oddymiania zgodnie z BS 7346-4 [38] przyjęto następujące parametry:

- Q = 2250 kW.
- P = 20 m
- Y = 2,2 m
- d = 0,2 m
- A_iC_i = 28 m^2
- C_e= 0,337

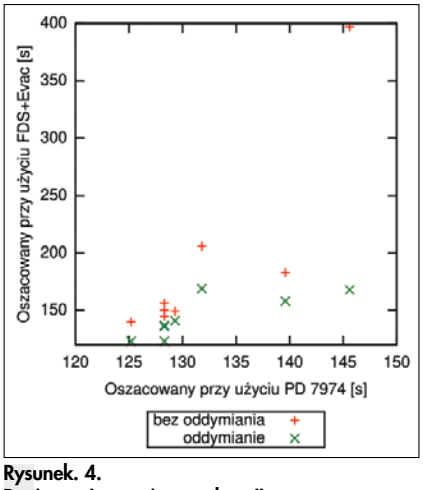
Zapewnienie odpowiednio skutecznej wentylacji pożarowej dla pomieszczenia wymaga zastosowania systemu klap dymowych o łącznej powierzchni czynnej 28 m^2. Do zapewnienia nawiewu wykorzystano istniejące drzwi stanowiące wyjścia ewakuacyjne, a także krat transferowych w dolnej części ścian zewnętrznych.

Zestawienie rzeczywistych czasów ewakuacji przy zastosowaniu systemu oddymiania grawitacyjnego przedstawiono w tabeli 4.

Rozprzestrzeniający się w pomieszczeniu dym może w końcowym etapie ewakuacji sięgać wyjść ewakuacyjnych, przez które prowadzona jest jeszcze ewakuacja. Zastosowanie systemu oddymiania wydłuży dostępny czas bezpiecznej ewakuacji oraz wpłynie na skrócenie procesu ewakuacji w ewentualnych warunkach na granicy warunków krytycznych. W analizowanych przykładach zastosowanie systemu oddymiania spowodowało skrócenie czasów ewakuacji w warunkach pożaru. Zestawienie symulowanych czasów ewakuacji przy użyciu oprogramowania FDS+Evac w porównaniu z wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji oszacowanym przy użyciu PD 7974-6 [10] przedstawiono na rysunku 4.

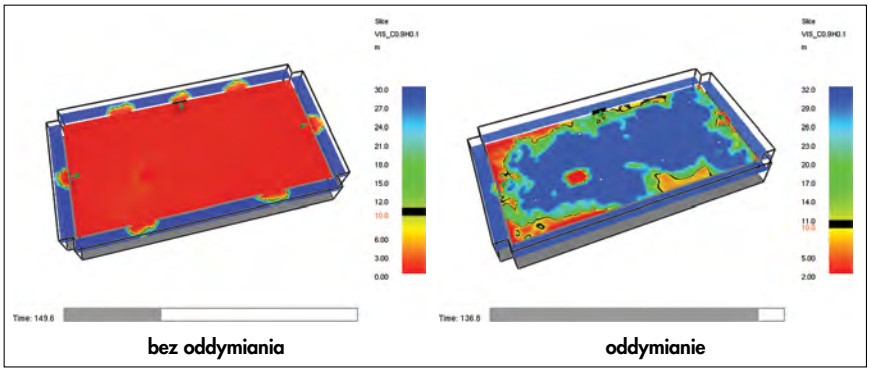
Tabela 4.

Scenariusz	Czas ewakuacji w warunkach rozwijającego się pożaru[1] [s]	Czas ewakuacji przy zastosowaniu oddymiania grawitacyjnego[1] [s]	Maksymalny oszacowany czas ewakuacji[2] [s]	Różnica pomiędzy oszacowanym, amodelowanym czasem ewakuacji w warunkach pożaru[s] [kol. 4 – kol. 3]	FED[3] – dla ostatniej ewakuującej się osoby bez zastosowania oddymiania [-]	FED[3] – dla ostatniej ewakuującej się osoby w przypadku zastosowania oddymiania [-]
1	2	3	4	5	6	7
A-3	140	123	125,2	2,2	0,005	0,000
A-10	156	136	128,3	-7,7	0,007	0,000
A-19	145	123	128,3	5,3	0,007	0,000
A-27	397	168	145,6	-22,4	0,478	0,003
A-33	206	169	131,8	-37,2	0,029	0,001
A-36	183	158	139,6	-18,4	0,018	0,000
A-45	150	137	128,3	-8,7	0,007	0,001
A-50	149	141	129,3	-11,7	0,007	0,000



Rysunek. 4.
Porównanie czasów ewakuacji

Na przedstawionym przykładzie można zaobserwować, że zastosowanie systemu oddymiania znacznie poprawiło warunki ewakuacji oraz skróciło czas ewakuacji.



Rysunek 5.
Warunki ewakuacji (zasięg widzialności) w chwili opuszczenia pomieszczenia przez ostatnią osobę

Warunki ewakuacji w chwili opuszczenia pomieszczenia przez ostatnią osobę w analizowanych scenariuszach są zdecydowanie lepsze w przypadku zastosowania systemu oddymiania. W dwóch przypadkach ewakuacja w warunkach pożaru przy zastosowaniu wentylacji pożarowej przebiega krócej niż to wynika z oszacowania na podstawie PD-7974-6 [10].

Wnioski

Ewakuacja ludzi w sytuacji zagrożenia powoduje możliwość powstania niebezpiecznych zjawisk z udziałem tłumu. Dynamicznie rozwijające się warunki krytyczne spowodowane pożarem wpływają na ewakuujące się osoby powodując stres. W procesie ewakuacji może dochodzić do różnego rodzaju opóźnień. Ewakuujący się ludzie w przypadku odcięcia wyjścia ewakuacyjnego przez dym i gazy pożarowe kierują się do pozostałych jeszcze dostępnych wyjść. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że parametry przejść ewakuacyjnych powinny, poza dopuszczalną długością, być dodatkowo uzależnione od liczby wyjść ewakuacyjnych z danego pomieszczenia. W tym celu oszacowanie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji powinno być w przypadku dużej liczby osób oraz niewielkiej liczby wyjść ewakuacjach weryfikowane przy użyciu modelu do symulowania procesu ewakuacji z zagrożonego obiektu (pomieszczenia). Pozwoliłoby to na wyeliminowanie ewentualnych niedoszacowań, jakie mogą wystąpić przy użyciu normy PD 7974-6 [10] oraz podjęcia właściwych działań w celu poprawy bezpieczeństwa w obiekcie.

W celu poprawy warunków bezpieczeństwa w obiektach możliwe jest zastosowanie systemów wentylacji pożarowej. Odpowiednio zaprojektowany system wentylacji pozwala na odprowadzanie gazów pożarowych z pomieszczenia, a tym samym wydłuża dostępny czas bezpiecznej ewakuacji, co zobrazowano na przedstawionym w artykule przykładzie.

LITERATURA:

[1] The reinforcement sensitivity theory of personality, J. Corr Philip (ed.), Cambridge University Press, New York 2008.
[2] Barański Mariusz. "A Review of Models That Take Into Account the Effects of Emotional Contagion During Evacuation." Safety & Fire Technology 53 (2019). Lub M. Barański, Przegląd modeli uwzględniających efekt zarażania emocjonalnego w procesie ewakuacji, Safety & Fire Technology 53(1), pp. 106-116, 2019
[3] Berent Stanley. "Fight/Flight Reaction." *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (2010): 1-1.
[4] PN-ISO 8421-6:1997 Ochrona przeciwpożarowa – Terminologia – Ewakuacja i środki ewakuacji.
[5] Słownik języka polskiego – https://sjp.pl/
[6] Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z 2 kwietnia 1997 r.
[7] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów.
[8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
[9] Ng Candy MY, W. K. Chow. "A brief review on the time line concept in evacuation." International journal on architectural science 7.1 (2006): 1-13.
[10] PD 7974:2001 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings Part 6: Human factors: Life safety strategies Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
[11] DiNenno P., Drysdale D., Beyler C., Walton D., Custer R., Hall J., Watts J.: SFPE Handbook of fire protection engineering, wyd. 3, Massachusetts 2002.
[12] Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych w tych przepisach, oraz stosowania rozwiązań zamiennych, zapewniających niepogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowej, w przypadkach wskazanych w przepisach przeciwpożarowych, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, Warszawa 2008.
[13] Konecki M.: Wpływ szybkości wydzielania ciepła i emisji dymu na rozwój pożaru w układzie pomieszczeń, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2007.
[14] Lesiak Piotr, Rafał Porowski. "Ocena skutków awarii przemysłowej w instalacjach procesowych, w tym efektu domino-Część 1." Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza (2012): 13-26.
[15] ISO 13344:2015 Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents.
[16] ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
[17] Maciak Tadeusz, Mariusz Barański. "Wprowadzenie do komputerowego modelowania zachowania się tłumu. Wybrane aspekty psychologii tłumu." Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 40 (2015).
[18] Popielarczyk Tomasz. Ewakuacja ludzi z wykorzystaniem dźwiękowych systemów ostrzegawczych. Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego Państwowy Instytut Badawczy, 2018.
[19] Poon S. L. "A dynamic approach to ASET/RSET assessment in performance based design." Procedia Engineering 71 (2014): 173-181.
[20] W. K. Chow, Six points to note in applying timeline analysis in performance-based design for fire safety provisions in the far east, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Code, vol. 10, nr 1, pp. 1-5, 2011
[21] Kong Depeng, et al. "A method for linking safety factor to the target probability of failure in fire safety engineering." Journal of Civil Engineering and Management 19.sup1 (2013): S212-S221.
[22] Gałaj Jerzy, Damian Saleta. "Impact of Apartment Tightness on the Concentrations of Toxic Gases Emitted During a Fire." Sustainability 12.1 (2020): 223.
[23] Tuśnio Norbert, Damian Saleta. "Modelowanie rozwoju pożaru w mieszkaniach przy użyciu programu CFAST." Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza (2012): 37-44.
[24] Krajewski Grzegorz, Paweł Sulik, Wojciech Węgrzyński. "Metody numeryczne w projektowaniu systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych." Logistyka 6 (2014).
[25] https://www.youtube.com/watch?v=ib-b1j0XNeqM
[26] https://www.youtube.com/watch?v=V6RAR-SV0-To
[27] D. Saleta, Podpatrywanie pożaru, Przegląd Pożarniczy 7/2013
[28] https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/product-services/consolidated-fire-and-smoke-transport-model-cfast
[29] https://constructalia.arcelormittal.com/en/tools/software
[30] https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview
[31] https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent
[32] Paliszek-Saładyga J., Smardz P., Próby z gorącym dymem jako narzędzie inżynierskie, Ochrona Przeciwpożarowa 2/2013.
[33] Bogusławska Arleta, Dorota Brzezińska, Marek Dziubiński. "Wentylacja oddymiająca klatek schodowych w budynkach średniowysokich–ocena skuteczności instalacji." Instal 4/2019, str. 16-21.
[34] http://pyrosim.pl
[35] https://github.com/shkleinik/acad2fds
[36] https://github.com/firetools/blenderfds/
[37] Sulik P., Węgrzyński W. (2015). Wentylacja pożarowa w budynkach. Wymagania i systematyka. Część 1. Builder, 19.
[38] BS 7346-7:2006 Components for smoke and heat control systems – Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks, BSI, 2006

■