

ml. kpt. inż. Łukasz Kita¹⁾
 st. kpt. mgr inż. Andrzej Krauze¹⁾
 ORCID: 0000-0002-9324-4535
 st. kpt. dr inż. Sylwia Boroń^{1)*}
 ORCID: 0000-0002-3886-0060

Modelowanie wpływu warunków środowiska pożarowego na dostępny czas ewakuacji

Modeling the impact of the fire environment on the available evacuation time

DOI: 10.15199/33.2021.07.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę numeryczną wpływu czynników towarzyszących występowaniu pożaru na dostępny czas ewakuacji, na podstawie przyjętego scenariusza pożarowego w wybranym pomieszczeniu. Środowisko pożaru modelowano za pomocą zaawansowanych metod numerycznych CFD w programie FDS. Na podstawie wartości krytycznej zasięgu widzialności określony został czas, po którym użytkownicy nie byli w stanie ewakuować się z analizowanego pomieszczenia objętego pożarem w sposób bezpieczny dla ich zdrowia i życia. Dokonano oceny potencjału aplikacyjnego oprogramowania FDS do przeprowadzenia analiz związanych z wpływem warunków pożaru na dostępny czas ewakuacji w obiekcie. **Słowa kluczowe:** dostępny czas ewakuacji; warunki krytyczne; zasięg widzialności; numeryczna mechanika płynów; Fire Dynamics Simulator.

Abstract. In the article a numerical analysis of the influence of factors accompanying the occurrence of fire for the available evacuation time was presented, based on the adopted fire scenario in a selected room. The fire environment modeling was performed using advanced numerical methods CFD in the FDS software. On the basis of the critical value of the visibility range, the time after which the users were not able to evacuate from the analyzed room under fire in a safe manner for their health and life was determined. The application potential of the FDS software was assessed for carrying out analyzes related to the impact of fire conditions on the available evacuation time in the facility.

Keywords: available evacuation time; critical conditions; visibility range; numerical fluid dynamics; Fire Dynamics Simulator.

W celu zapewnienia bezpiecznych warunków ewakuacji użytkowników obiektu niezbędne jest przeanalizowanie zależności dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji (DCBE) i wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji (WCBE). Kryterium uznania ewakuacji za bezpieczną jest wykazanie, że DCBE jest dłuższy lub równy WCBE, aby wszystkie osoby były w stanie opuścić obiekt przed wystąpieniem czynników krytycznych dla ewakuacji [5]. Wzrost szybkości i ilości rozprzestrzeniającego się dymu powoduje wydłużenie czasu ucieczki osób ewakuujących się z pomieszczeń zadymionych. Ilość światła pochłoniętego po przejściu przez takie pomieszczenie nazywana jest procentem zaciemnienia (λ). Na jego podstawie i długości ścieżki pomiarowej można wyznaczyć **współczynnik ekstynkcji**, jako [6, 7]:

$$\alpha = -[(\ln(1 - \lambda/100))/L] \quad (1)$$

gdzie:

¹⁾ Szkoła Główna Służby Pożarniczej; Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności
 *) Adres do korespondencji: sboron@sps.edu.pl

α – moduł ekstynkcji [1/m];
 λ – procent zaciemnienia [%];
 L – długość ścieżki [m].

Widzialność określana jest jako graniczna wartość zaciemnienia, przy której obiekt może być jeszcze zauważony. Zgodnie z rozporządzeniem [4] widzialność jest jednym z podstawowych parametrów sprawdzanych w przypadku oceny warunków ewakuacji. Ograniczenie zasięgu widzialności w pomieszczeniu utrudnia ewakuację ludzi z obiektu w warunkach pożaru. Zależność między widzialnością oraz zaciemnieniem podaje równanie (2) [6, 7]:

$$S = K/\alpha \quad (2)$$

gdzie:
 S – widzialność [m];
 K – współczynnik zaciemnienia [-];
 α – moduł ekstynkcji [1/m].

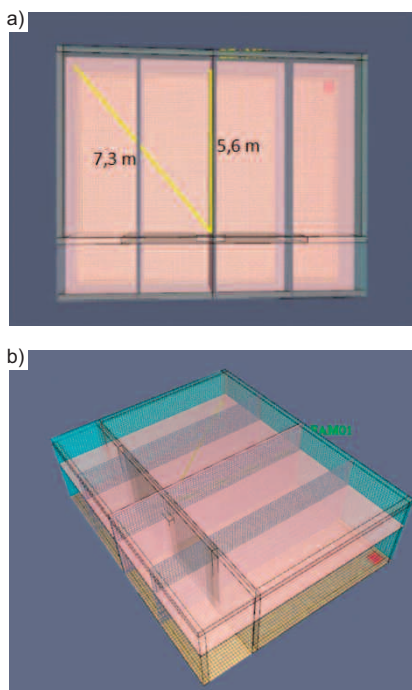
Nie należy zapominać o możliwym toksycznym wpływie produktów spalania oraz oddziaływaniu wysokiej temperatury środowiska pożaru, które stanowią zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka. W świetle istniejących zagrożeń uwidacznia się potrzeba rozwoju metod służących ocenie warunków ewakuacji w obiekcie, które mogą

wpłynąć na zwiększenie bezpieczeństwa pożarowego. Do przeprowadzenia analizy numerycznej wpływu czynników towarzyszących wystąpieniu pożaru na warunki ewakuacji w obiekcie wybrano oprogramowanie *Fire Dynamics Simulator* (FDS) wykorzystujące metody obliczeniowej mechaniki płynów CFD.

Założenia przyjęte w badaniach

Badania numeryczne przeprowadzono zgodnie z założeniami opisanymi w raporcie z badań NIST [1]. Za pomocą oprogramowania FDS opracowano numeryczny model pomieszczenia i przeprowadzono badania numeryczne rozwoju pożaru (rysunek 1).

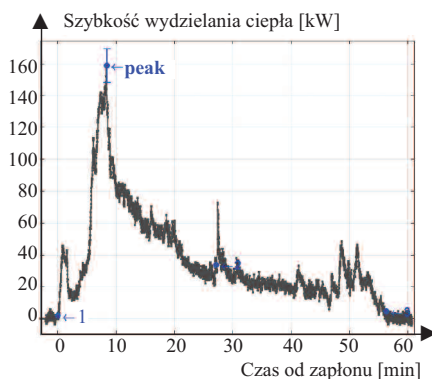
Geometrię domeny obliczeniowej stanowił obszar prostopadłościennego pomieszczenia o wymiarach 9,6 x 5,8 x 2,8 m i objętości 156 m³. W jednej ze ścian pomieszczenia znajdowały się drzwi o wymiarach 2 x 1 m, nad którymi został umieszczony na wysokości 2,2 m luminescencyjny znak ewakuacyjny. Materiałem palnym ulegającym zapłonowi był kosz na śmieci z tworzywa



Rys. 1. Przekrój poziomy domeny obliczeniowej (a) oraz jej ogólny widok (b)
 Fig. 1. Horizontal cross-section of the computing domain (a) and general view (b)
 Źródło: opracowanie własne

sztuczny wypełniony papierem o masie 2,32 kg, umieszczony w narożu pomieszczenia. Źródło pożaru o wymiarach 0,4 x 0,4 m zostało zlokalizowane w narożu pomieszczenia (rysunek 1). Domenę obliczeniową dyskretyzowano przy użyciu czterech siatek kartezjańskich. Wygenerowana siatka numeryczna składała się z 240 tys. elementów.

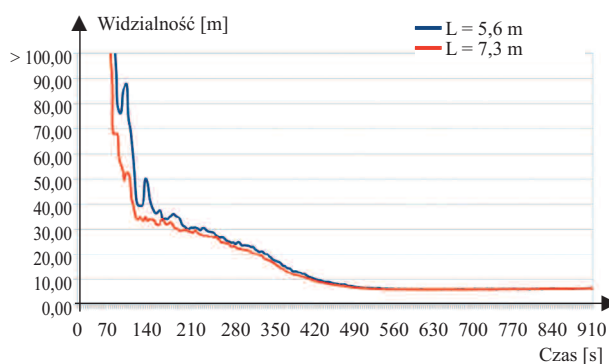
Badania numeryczne zostały zainicjowane w momencie odpowiadającym rozpoczęciu procesu spalania kosza na śmieci wypełnionego papierem. Jako parametr wejściowy symulacji, zdefiniowany przez użytkownika, przyjęto przebieg krzywej rozwoju pożaru (rysunek 2). Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 2 stwierdzono, że szczytowa szybkość wydzielania ciepła w trakcie pożaru wynosiła 159 kW i została osiągnięta po 8,35 min od momentu zainicjowania procesu spalania. Ciepło spalania osiągnęło wartość 28,2 MJ/kg, a część paliwa przekształcana na sadzę (soot yield) 0,0094 kg/kg. Analizę numeryczną przeprowadzono z wykorzystaniem modelu turbulencji przepływu LES. Długość kroku czasowego to 3 s. Założono, że czas trwania pożaru wynosi 925 s [3].



Rys. 2. Szybkość wydzielania ciepła (HRR) w trakcie analizowanego pożaru [7]
 Fig. 2. Graph of the heat release rate (HRR) during the analyzed fire [7]

Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych **zbadano przebieg zmian wybranego czynnika pożarowego wpływającego na warunki ewakuacji w czasie pożaru** w analizowanym pomieszczeniu [2]. Wytypowanym do analizy parametrem była zmiana zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m od posadzki w zadymionym pomieszczeniu objętym pożarem. Z badań numerycznych otrzymano wyniki prezentujące zmienność procentu zaciemnienia (λ) w funkcji czasu na ścieżce o długości $L = 5,6$ m i $L = 7,3$ m. Długość ścieżki odpowiadała odległości, z jakiej osoba o wzroście 1,8 m, znajdująca się w pomieszczeniu, obserwuje znak ewakuacyjny umieszczony na wysokości 2,2 m nad drzwiami ewakuacyjnymi (rysunek 1a). Podstawiając dane do równania (1), a następnie (2), wyznaczono zmienność zasięgu widzialności S w funkcji czasu w przypadku dwóch długości ścieżek $L = 5,6$ m i $L = 7,3$ m (rysunek 3). W obliczeniach przyjęto wartość współczynni-



Rys. 3. Zmienność zasięgu widzialności mierzona na ścieżce $L = 5,6$ m oraz $L = 7,3$ m [2]
 Fig. 3. The variability of the visibility range measured along the path $L = 5,6$ m and $L = 7,3$ m [2]

ka zaciemnienia $K = 3$ w przypadku znaku ewakuacyjnego odbijającego światło, umieszczonego nad drzwiami ewakuacyjnymi [7]. Na tej podstawie określono czas, po którym znak ewakuacyjny umieszczony nad drzwiami ewakuacyjnymi będzie niewidoczny, a tym samym użytkownicy pomieszczenia nie będą w stanie się bezpiecznie ewakuować ($S < L$). Kryterium $S > L$ zapewnia, że widzialność w pomieszczeniu jest wystarczająca do skutecznego opuszczenia przez uciekających pomieszczenia, w którym powstał pożar.

Dane wyjściowe z symulacji FDS zostały przedstawione na przekrojach poziomych (na wysokości 1,8 m od posadzki) obrazujących spadek zasięgu widzialności w wybranych krokach czasowych dla dwóch przypadków (tabela):

- osoba znajdująca się w odległości $L = 5,6$ m od znaku ewakuacyjnego;

- osoba znajdująca się w odległości $L = 7,3$ m od znaku ewakuacyjnego [2].

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń numerycznych stwierdzono, że:

- najszybsza redukcja zasięgu widzialności w przekroju poziomym pomieszczenia na wysokości 1,8 m od posadzki obserwowana była w pobliżu przegród pionowych pomieszczenia (tabela);

- zasięg widzialności S na ścieżce $L = 5,6$ m osiągnął po 550 s badania wartość mniejszą niż 5,6 m, a następnie dalej spadał poniżej akceptowalnego poziomu ($S < L$). Po tym czasie znak ewakuacyjny umieszczony nad drzwiami nie był widoczny w warstwie dymu dla użytkownika znajdującego się w odległości 5,6 m (rysunek 3);

- zasięg widzialności S na ścieżce $L = 7,3$ m zmniejszył się po 430 s badania

poniżej akceptowalnego poziomu ($S < 7,3$ m).

Po tym czasie osoba znajdująca się w odległości 7,3 m od drzwi nie była w stanie dostrzec w warstwie dymu oznakowania wyjścia ewakuacyjnego z pomieszczenia (rysunek 3);

- biorąc pod uwagę wyłącznie kryterium zasięgu widzialności w warstwie dymu oraz



CANASTOL – Water under Control

- kompletny hydrofobizator do systemów mineralnych,
- prosty w dozowaniu,
- sprawdzony w działaniu



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

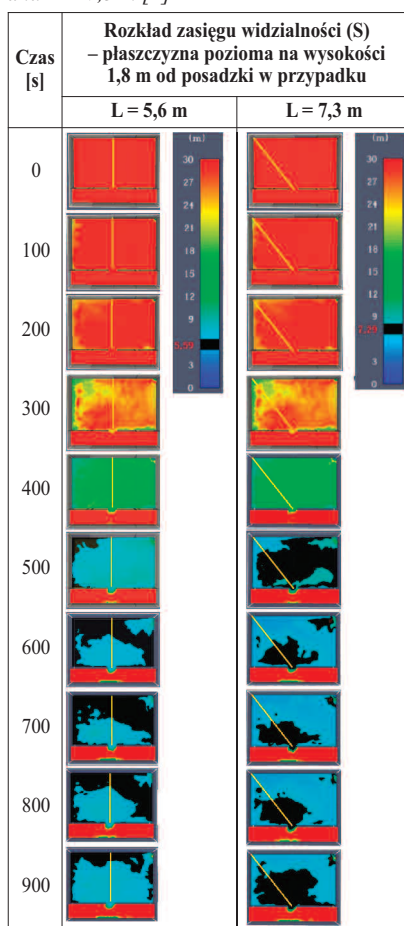
mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbolcel@jrs.pl

Rozkład zasięgu widzialności w przypadku $L = 5,6 \text{ m}$ i $L = 7,3 \text{ m}$ [2]

Distribution of visibility range for $L = 5,6 \text{ m}$ and $L = 7,3 \text{ m}$ [2]



odległość w pomieszczeniu od najdalszego miejsca, w którym może przebywać człowiek do wyjścia na drogę ewakuacyjną, wyznaczono, że dostępny czas bezpiecznej ewakuacji z przedmiotowego pomieszczenia wyniósł 430 s.

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają potencjał aplikacyjny programu FDS. Wykorzystanie programu do oceny warunków ewakuacji w pomieszczeniu objętym pożarem pozwala na przeprowadzenie przestrzennej analizy zasięgu widzialności z dowolnego punktu pomieszczenia, w wybranym kroku czasowym. Dzięki wizualizacji wyników możliwe jest dokonanie oceny warunków panujących w pomieszczeniu, bez konieczności przeprowadzania dodatkowych obliczeń.

Podsumowanie i wnioski

W momencie, gdy zasięg widzialności w warstwie dymu staje się mniejszy niż odległość, z jakiej osoba próbuje do-

strzec znak ewakuacyjny umieszczony nad drzwiami wyjściowymi, skuteczna ewakuacja z pomieszczenia jest niemożliwa. Na tej podstawie określony został dostępny czas bezpiecznej ewakuacji z pomieszczenia, w którym na drogach ewakuacyjnych nie nastąpiło przekroczenie granicznej wartości zasięgu widzialności na zadanej wysokości pomieszczenia. Zestawienie tej wartości z wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji (WCBE) pozwala ocenić, czy warunki panujące w pomieszczeniu są wystarczające do zapewnienia bezpiecznej ewakuacji znajdujących się w nim ludzi. Ponadto taka ocena umożliwi sformułowanie zaleceń, w celu ograniczenia negatywnych skutków występowania zadymienia w obiekcie. Może to dotyczyć konieczności wyposażenia obiektu w system wentylacji pożarowej o określonej wydajności.

Wyniki przeprowadzonych analiz upoważniają do stwierdzenia, że **zastosowanie oprogramowania FDS, wykorzystującego metody numeryczne CFD, pozwala na przeprowadzenie trójwymiarowej analizy zmienności zasięgu widzialności w pomieszczeniu w trakcie pożaru oraz oszacowanie czasu, po którym zostanie przekroczona wartość krytyczna tego parametru.** Stanowi zatem ważne narzędzie inżynierskie do badań w zakresie oceny warunków bezpieczeństwa pożarowego w obiekcie.

Literatura

- [1] <https://www.nist.gov/el/fcd/multiple-item-transient-combustion-calorimetry/test17trash-canr1>.
- [2] Kita Łukasz. 2021. *Modelowanie wpływu warunków środowiska pożarowego na dostępny czas ewakuacji*. Praca inżynierska. SGSP.
- [3] McGrattan K., S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, M. Vanella. 2020. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późn. zm.).
- [5] Skulich Janusz. 2008. „Procedury”. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń, Warszawa.
- [6] Tadahisa Jin. 1975. „Visibility through Fire Smoke”. *Report of Fire Research Institute of Japan* 5 (42).
- [7] Zugaj Michał, Adam Krasuski, Andrzej Krauze. 2019. „Warunki krytyczne środowiska pożarowego”. *Działania ratownicze*.

Przyjęto do druku: 07.06.2021 r.