

dr hab. inż. Dorota Brzezińska, prof. PŁ.^{1)*}

ORCID: 0000-0002-7509-2849

Maria Brzezińska²⁾

ORCID: 0000-0002-9095-817X

Oddymianie nowoczesnych atriów o skomplikowanej geometrii

Smoke control systems in modern complex geometry atria

DOI: 10.15199/33.2023.02.09

Streszczenie. W sytuacji pożaru atria stanowią przestrzenie umożliwiające niekontrolowane rozprzestrzenianie się dymu. Stwarza to niebezpieczne warunki ewakuacji ludzi i wymaga stosowania systemów oddymiania. Ich projektowanie odbywa się na podstawie dostępnych standardów obliczeniowych. Współczesne atria posiadają jednak niejednokrotnie dodatkowe elementy architektoniczne, np. poprzeczne balkony, mogące zakłócać działanie standardowych systemów.

Słowa kluczowe: wentylacja oddymniająca; atrium; ewakuacja ludzi.

Abstract. Atria are spaces in buildings that enable the uncontrolled spread of smoke in the event of a fire. This creates dangerous conditions for people evacuation and requires smoke control systems implementation. Their designing is realized on standard calculations. But modern atria often have additional architectural elements, such as transverse balconies, which may interfere with the operation of the standard systems.

Keywords: smoke ventilation; atrium; evacuation of people.

Atrium było historycznie centralnym pomieszczeniem w domach mieszkalnych starożytnego Rzymu, wokół którego urządzano pokoje mieszkalne. Dziś atrium to po prostu wewnętrzny, przekryty dziedziniec, otoczony ze wszystkich stron ścianami budynku. Współczesne techniki architektoniczne pozwalają, aby atria były integralną częścią dużych budynków, zaprojektowanych w celu stworzenia wrażenia przestrzeni otwartej wewnątrz nich. Najpopularniejsze przykłady można znaleźć w zadaszonych galeriach handlowych, biurach, muzeach czy salach koncertowych. Atria można sklasyfikować, w zależności od architektury obiektu, jako otwarte lub zamknięte, co przedstawiono w monografii „Wentylacja pożarowa obiektów budowlanych” [1]. Oddymianie atriów jest w Polsce obligatoryjne zgodnie z zapisem, że *W krytym ciągu pieszym (pasażu), do którego przylegają lokale handlowe i usługowe, oraz w przekrytym dziedzińcu wewnętrznym, należy zastosować rozwiązania techniczno-budowlane zabezpieczające*

przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych (§ 247 ust. 2 [2]).

Podstawowym celem inżynierii bezpieczeństwa pożarowego jest zapewnienie bezpieczeństwa ludzi w budynku oraz określenie najskuteczniejszej strategii ograniczania skutków pożaru. W zależności od rodzaju atrium stosuje się odpowiednie systemy oddymiania o obliczeniowo wyznaczonych parametrach. Bazują one na elementach naturalnego lub mechanicznego odprowadzania dymu i doprowadzania świeżego powietrza [3, 4]. Standardowo, wyciągi dymu powinny być zlokalizowane w górnej części atrium, a w dolnej części przestrzeni powinien być zlokalizowany dopływ świeżego powietrza [5].

Systemy kontroli dymu w przedsiwzięciach projektowane są wg modelu swobodnej kolumny dymu, stworzonego przez Heskestada [4], w którym generowana objętość dymu jest określona przez mechanizm konwekcyjnego napływu powietrza do kolumny dymu (rysunek 1). Wraz ze wzrostem odległości od źródła pożaru następuje wzrost strumienia masowego powstającego dymu.

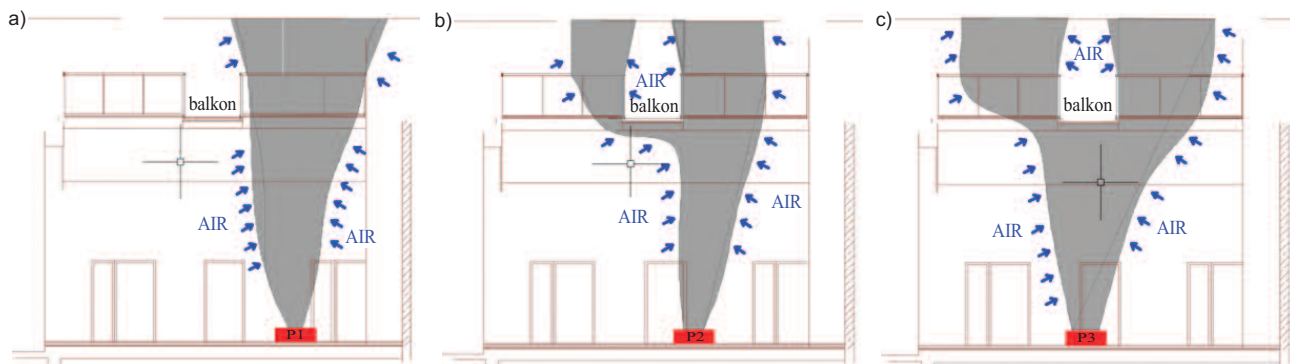
Najważniejszym parametrem obliczeniowym systemów oddymiania jest wysokość przepływu dymu od źródła pożaru do dolnej granicy zbiornika dymu.

Zależy ona od rodzaju atrium i jego wysokości oraz od poziomu, powyżej którego możliwe jest utworzenie zbiornika dymu. Przyjmuje się, że dolna granica warstwy dymu powinna znajdować się co najmniej 1,8 m od posadzki najwyższej kondygnacji otwartej na przestrzeń atrium [5, 6]. Współczesne projekty architektoniczne atriów są często bardzo efektowne wizualnie, ale skomplikowane geometrycznie. Wiadomo, że bardzo istotny wpływ na przemieszczanie się dymu i skuteczność systemu oddymiania ma lokalizacja punktów wyciągu dymu i napływu powietrza uzupełniającego [6]. Dodatkowe komplikacje mogą pojawić się także jako konsekwencja nietypowych elementów architektonicznych w atrium. Można wyróżnić atria proste, w których przestrzeń wewnętrzna pozbawiona jest dodatkowych elementów (fotografia a) lub atria złożone, w których zaimplementowano poprzeczne balkony, schody, belki lub inne dodatkowe elementy architektoniczne (fotografia b), mogące wpływać na ilość generowanego dymu, zwielfokrotniając jego masę w konwekcyjnym słupie dymu (rysunek 1b i 1c). W konsekwencji, rzeczywista objętość dymu może być większa od obliczonej wg wzorów normowych, a standardowy system oddymiania okaże się niewystarczająco skuteczny [7].

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

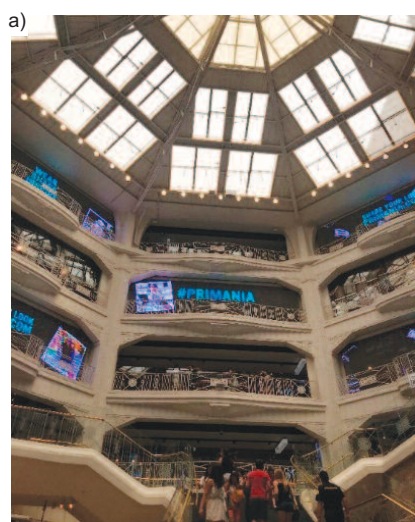
²⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

* Adres do korespondencji:
dorota.brzezinska@p.lodz.pl



Rys. 1. Słup dymu ponad źródłem pożaru: a) pożar w otwartej przestrzeni atrium; b) pożar częściowo pod balkonem; c) pożar pod balkonem

Fig. 1. Smoke plume: a) fire in open atrium; b) fire partly under balcony; c) fire under balcony



Rodzaje atrium: a) proste; b) złożone
Atrium: a) simple; b) complex



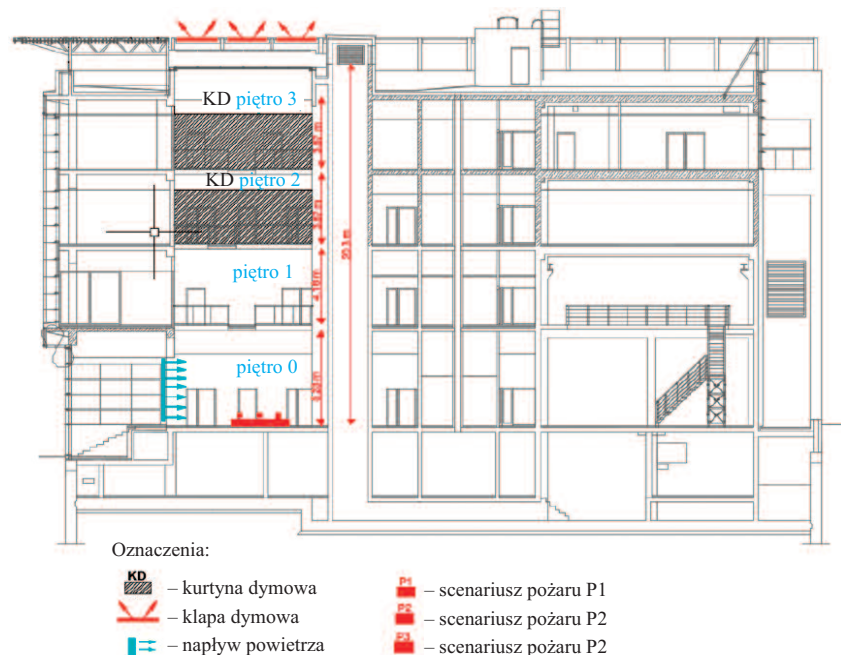
Fot. M. Brzezińska
Photo M. Brzezińska

kłapy dymowe, a na parterze budynku okno i drzwi nawiewne, zapewniające napływ powietrza uzupełniającego do celów oddymiania. Łączna efektywna powierzchnia otworów oddymiających wynosiła 4,2 m², a nawiewnych 10 m². Schemat atrium przedstawiono na rysunku 2. Analizy wpływu lokalizacji pożaru na ilość powstającego dymu zostały przeprowadzone za pomocą symulacji komputerowych CFD (*Computational Fluid Dynamics*), które są wykorzystywane do weryfikacji skuteczności systemów oddymiania jako potwierdzenie wstępnych obliczeń ręcznych. Dzięki technologii CFD możliwe jest rozwiązanie złożonych równań opisujących przepływ płynów w układzie trójwymiaro-

Najbardziej precyzyjną metodą analizy skuteczności działania systemu oddymiania są symulacje CFD (*Computational Fluid Dynamics*) [6, 8]. Metody te zostały już potwierdzone w analizach oddymiania atrium, a ich przykłady opisano w literaturze [9 – 13]. W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu balkonów występujących w atrium na skuteczność działania systemu oddymiania.

Analizy systemu oddymiania atrium

W analizowanym atrium zastosowano grawitacyjny system oddymiania. Do obliczeń teoretycznych parametrów systemu wykorzystano wymagania normy brytyjskiej [14]. Całkowity strumień ciepła pożaru przyjęto jako 1 MW, co reprezentuje standardowy pożar stanowiska biurowego lub recepcji [15]. W świetliku dachowym znajdowały się



Rys. 2. Przekrój analizowanego atrium

Fig. 2. A cross-section of the atrium

wym oraz uwzględnienie upływu czasu. Najczęściej wybieranym przez użytkowników programem do wykonywania symulacji jest *Fire Dynamics Simulator* (FDS), który jest najlepiej zweryfikowanym spośród wszystkich programów symulacyjnych [10], stosowanych w tego typu analizach.

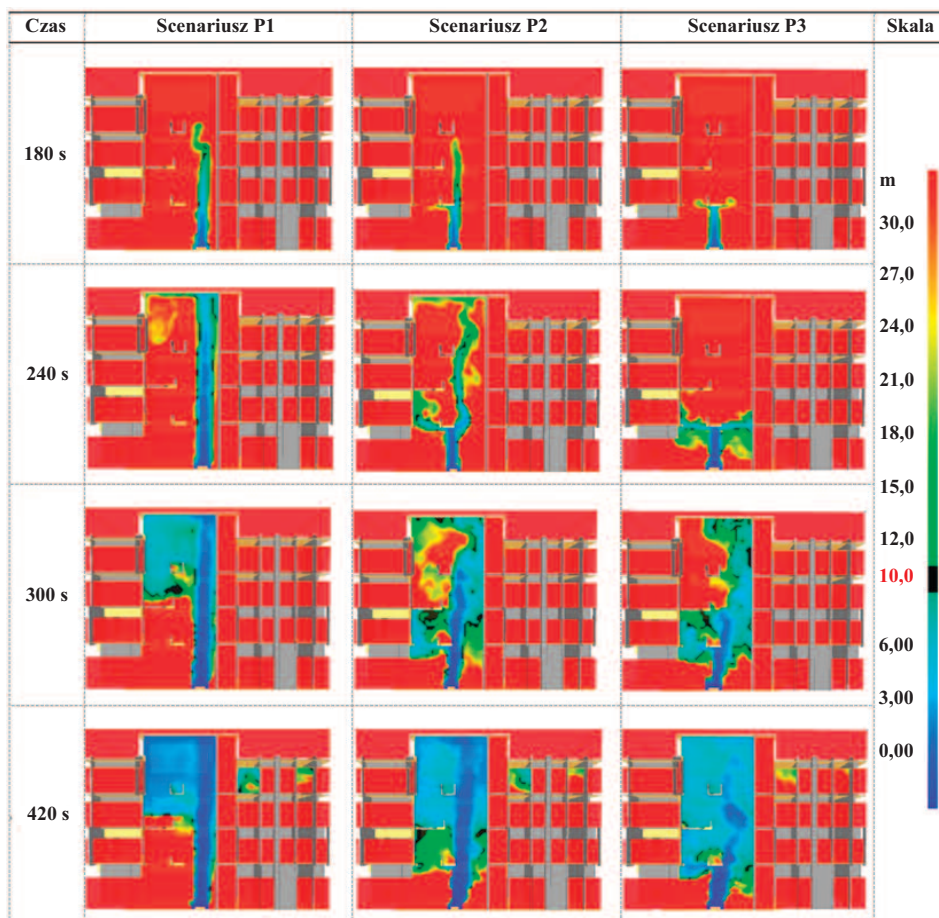
Do symulacji przyjęto siatkę obliczeniową o wymiarach każdej komórki obliczeniowej 0,3 m w kierunkach X, Y i Z. Większe zagęszczenie siatki zostało zweryfikowane we wstępnych analizach i potwierdziło brak istotnego wpływu na analizowane parametry. Materiałem konstrukcyjnym budynku był beton o gęstości 2,100 kg/m³, przewodności cieplnej 1,0 W/mK oraz ciepła właściwym 0,88 kJ/kgK. Początkowa temperatura zewnętrzna i wewnętrzna w analizach wynosiła 20°C. Jako materiał palny przyjęto mieszaninę styropianu, tworzyw sztucznych i drewna, reprezentującą skład materiałów potencjalnie występujących, w której przeprowadzono symulacje (przewiduje się występowanie recepcji wyposażonej w standardowe materiały i akcesoria biurowe). Całkowity strumień ciepła pożaru wynosił $Q = 1000$ kW, a współczynnik wytwarzania sadzy 0,091 kg/kg. Założono standardowy szybki rozwój pożaru zgodnie z krzywą t-kwadrat. Symulacje przeprowadzono po czasie 420 s od rozpoczęcia pożaru, czyli czasie rzeczywistym przewidzianym na ewakuację użytkowników budynku. Na podstawie symulacji określono czas wykrycia pożaru na ok. 120 s i przyjęto, że bezpośrednio po tym czasie (uwzględniając dodatkowo 20 s niezbędne na uruchomienie urządzeń) nastąpi uruchomienie systemu oddymiania. W związku z tym zdefiniowano, że po 140 s od rozpoczęcia pożaru otwierane są otwory oddymiające i nawiewne, a kurtyny dymowe są automatycznie opuszczane do posadzki poszczególnych kondygnacji.

W celu weryfikacji wpływu balkonu występującego w przestrzeni atrium na wytwarzanie

objętości dymu zbadano trzy scenariusze pożarowe. Pierwszy z nich zakładał pożar w otwartej przestrzeni atrium, drugi – częściowo pod balkonem, a trzeci – centralnie pod balkonem (rysunek 1). Wyniki symulacji w przypadku analizowanych scenariuszy pożarowych przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Dzięki zainstalowaniu kurtyn dymowych na kondygnacjach 2 i 3 zostały one odseparowane od przestrzeni atrium i zabezpieczone przed rozprzestrzenianiem się dymu. Zgodnie z obliczeniami teoretycznymi, przy zakładanych parametrach pożaru i instalacji oddymiającej, dolna warstwa dymu w atrium powinna znajdować się nad pierwszym piętrzem, czyli 7,4 m od źródła pożaru. Rysunek 3 przedstawia wyniki symulacji w postaci spadku zasięgu widoczności [m] w przekroju pionowym atrium. Widać, że tylko w scenariuszu P1 warstwa dymu jest utrzymywana na oczekiwanym poziomie. Natomiast w scenariuszach P2 i P3, gdy słup dymu napotyka

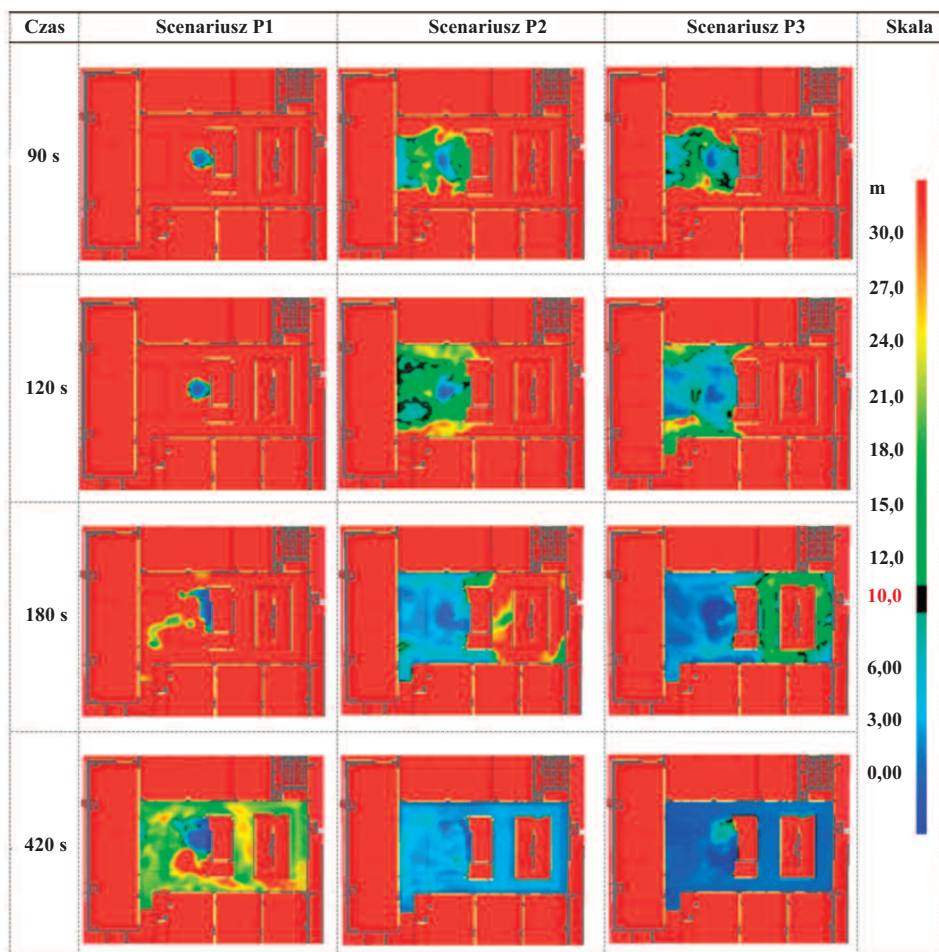
przeszkodę w postaci balkonu, poziom dymu znacznie się zmniejsza (szybciej w scenariuszu P3, gdzie dym dzieli się na dwie podobne kolumny, niż w scenariuszu P2, kiedy większość dymu wpływa z jednej strony balkonu).

Na rysunku 4 przedstawiono płaszczyzny pomiarowe zasięgu widoczności na poziomie 1,8 m od pierwszego piętra, które nie było oddzielone od atrium za pomocą kurtyn dymowych. Stwierdzono, że w scenariuszach P2 i P3, po 120 s od rozpoczęcia pożaru, dym zaczął rozprzestrzeniać się po korytarzach ewakuacyjnych na pierwszym piętrze. W tych scenariuszach, w ciągu kolejnych sekund, dym bardzo silnie rozprzestrzenia się po korytarzach, a widoczność była mniejsza niż 10 m. Oznacza to, że ewakuacja ludzi z tego piętra mogłaby być utrudniona. Tylko w scenariuszu P1, w przewidywanym czasie ewakuacji 420 s, widoczność na korytarzach była większa niż wymagane 10 m.



Rys. 3. Rozkład zasięgu widoczności [m] w przekroju pionowym atrium

Fig. 3. Visibility [m] in the cross-section of the atrium



Rys. 4. Rozkład zasięgu widoczności [m] na wysokości 1,8 m od posadzki pierwszego piętra
 Fig. 4. Visibility [m] at the level of 1.8 m from the first floor

Wnioski

W artykule dowiedziono, że architektura atrium może silnie wpływać na skuteczność działania systemu jego oddymiania. Obserwacja i weryfikacja zjawisk zachodzących podczas rozprzestrzeniania się dymu w przestrzeni atrium o zróżnicowanym układzie architektonicznym jest możliwa na etapie projektowania tylko na podstawie symulacji CFD. Dzięki temu można zidentyfikować sytuacje niebezpieczne dla ludzi, które mogłyby się pojawić w czasie pożaru, np. zadymienie dróg ewakuacyjnych przed zakończeniem ewakuacji. Przedstawiony przykład pokazuje, że pożar zlokalizowany pod balkonem powoduje zwiększenie ilości dymu i przyspiesza osiągnięcie warunków granicznych widoczności na drogach ewakuacyjnych. Poprawę bezpieczeństwa ludzi w takiej sytuacji można osiągnąć przez zwiększenie wydajności systemu oddymiania i/lub za-

stosowanie dodatkowych kurtyn dymowych na niższych poziomach atrium. Ostateczną weryfikację systemu oddymiania należy przeprowadzić po realizacji obiektu, na etapie jego odbioru. Najlepszym sposobem weryfikacji są próby z gorącym dymem, które umożliwiają dokładną wizualizację warunków, jakie mogłyby wystąpić w budynku w przypadku pożaru.

Planowane są dalsze prace badawcze wpływu dodatkowych elementów architektonicznych w atriach na skuteczność działania systemów oddymiania, przewidujące porównanie wyników eksperymentalnych i modelowania CFD oraz poszerzenie zakresu analizowanych kształtów atriów i występujących w nich elementów zakłócających swobodny przepływ dymu.

Literatura

[1] Brzezińska D. Wentylacja pożarowa obiektów budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. 2015.

[2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2019, poz. 1065 z późn. zm.).

[3] Morgan HP, Ghosh BK, Garrad G. Design Methodologies for Smoke and Heat Exhaust Ventilation; Building Research Establishment (BRE): London, UK; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers: Atlanta, GA, USA, 1999.

[4] Klote JH, Milke JA. Principles of Smoke Management; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers: Atlanta, GA, USA, 2002.

[5] Klote JH, Milke JA. Design of Smoke Management Systems; Amer Society of Heating; Washington, DC, USA, 1992.

[6] Pongratz C, Milke JA, Trouve A. CFD Study Atrium Smoke Control. ASHRAE Trans. 2016; 122: 10 – 26.

[7] Doheim RM, Yohanis YG, Nadjai A, Elkadi H. The impact of atrium shape on natural smoke ventilation. Fire Saf. J. 2014; 63: 9 – 16.

[8] Ayala P, Cantizano A, Rein G, Vigne G, Gutiérrez-Montes C. Fire Experiments and Simulations in a Full-scale Atrium Under Transient and Asymmetric Venting Conditions. Fire Technol. 2016; 52: 51 – 78.

[9] Rundle CA, Lightstone MF, Oosthuizen P, Karava P, Mouriki. E. Validation of computational fluid dynamics simulations for atria geometries. Build. Environ. 2011; 46: 1343 – 1353.

[10] Kerber S, Milke JA. Using FDS to simulate smoke layer interface height in a simple atrium. Fire Technol. 2007; 43: 45 – 75.

[11] Volley MK. Verification and validation—How determine the accuracy of fire models. Fire Prot. Eng. 2007. Available online: <https://www.nist.gov/publications/verification-and-validation-how-determine-accuracy-fire-models>.

[12] Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research (RES). Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications; Main Report; 2007; Volume 1. Available online: <https://www.nrc.gov/reading-rm/docollections/nuregs/staff/sr1824/s1/index.html>.

[13] Baolati J, Li K, Zou Y, Frank K, Hare G, Zhang J, Ge F. Large eddy simulation of room fire spread using a medium scale compartment made of medium density fibreboard (MDF) panels. Build. Simul. 2022; 15: 495 – 510.

[14] BSI, BS 7346-4. Components for smoke and heat control systems – Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires – Code of practice. 2003.

[15] NFPA, NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting. 2021.

Przyjęto do druku: 09.01.2023 r.