



WOJCIECH WĘGRZYŃSKI

Zakład Badań Ogniwych
w.wegrzynski@itb.pl
ORCID: 0000-0002-7465-0212

Wentylacja pożarowa tuneli drogowych

Tunele drogowe są obiektami wymagającymi szczególnego zaangażowania w zapewnienie bezpieczeństwa oraz uzyskanie wysokiej rezylencji obiektu. W odróżnieniu od budynków, tunele zapewniają mniejszy wy-

bór dróg ewakuacji połączony ze znacznie wyższym ryzykiem pożaru, rozwijającym się szybciej i osiągającym znacznie wyższe moce. W odpowiedzi na zagrożenie pożarowe, tunele drogowe uzbrajane są w liczne pasywne i aktywne systemy przeciwpożarowe. Spośród systemów aktywnych, skuteczna detekcja pożaru oraz usuwanie dymu i gorących produktów spalania są często pierwszymi i ostatnimi narzędziami służącymi aktywnemu zmniejszeniu konsekwencji pożaru i ograniczaniu zagrożenia życia użytkowników tunelu.

Systemy wentylacji pożarowej tuneli drogowych, w porównaniu z systemami spotykanymi w budynkach, wyróżnia bardzo duży objętościowy wydatek niezbędny do odprowadzenia dymu i ciepła z przestrzeni tunelu. W budynkach (dobrą analogią mogą być garaże dla samochodów osobowych [1]) najczęściej spotyka się systemy zaprojektowane z wydajnością około 45–50 m³/s. W przypadku tuneli zapotrzebowanie na powietrze jest o wiele wyższe. Przykładowo – tunel o przekroju poprzecznym 100 m² i wymaganej prędkości przepływu (tzw. prędkość krytyczna) 3,00 m/s wymaga przepływu aż 300 m³/s. W tunelach wentylowanych poprzecznie wydajność ta może być jeszcze większa. Przykładowo, oddany niedawno tunel Południowej Obwodnicy Warszawy na trasie S2 zaprojektowano na przepływ aż 420 m³/s (1,5 mln m³/h!). Zapotrzebowanie na tak dużą ilość powietrza jest wynikiem wysokiego ryzyka pożaru, w tym w szczególności ryzyka wystąpienia pożarów o mocach przekraczających 100–200 MW (w przytoczonym przykładzie garaży pod budynkami pożary projektowe rzadko przekraczają moc 8 MW). Za najważniejsze dokumenty normatywne przydatne w projektowaniu systemów wentylacji pożarowej w Polsce należy uznać austriackie wytyczne RVS 09.02.31 [2], niemieckie wytyczne RABT [3] czy szwajcarskie wytyczne ASTRA 13001 [4]. Istnieją także lokalne wytyczne udostępniane w zasobach Ministerstwa Infrastruktury [5].

Systemy wentylacji pożarowej tuneli muszą zapewnić warunki bezpiecznej ewakuacji setkom lub nawet tysiącom użytkowników. Oznacza to, że bez oceny przebiegu procesu ewakuacji nie da się określić, czy działanie systemu wentylacji pożarowej jest skuteczne. Proces ewakuacji osób w warunkach zadymienia w obiektach tunelowych może prze-

biegać inaczej niż ten w budynkach. Drogami ewakuacji są zazwyczaj poziome drogi ewakuacji wytyczone na chodnikach wzdłuż ścian tunelu. Ewakuacja możliwa jest w dwóch kierunkach, a informację o najbliższym wyjściu umieszczone są (wraz z podaniem odległości) na specjalnych, oświetlonych znakach ewakuacyjnych. Prędkość przemieszczania się ludzi może być inna niż w obiektach naziemnych, a odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi może wynosić nawet 500 m (typowo od 150 m do 250 m). Więcej informacji o specyfice ewakuacji w obiektach tunelowych można odnaleźć w wynikach badań [6–9].

Do efektywnego działania systemu wentylacji pożarowej konieczne jest skuteczne i szybkie wykrycie pożaru w jego jak najwcześniejszym stadium, a następnie jak najszybsze przekazanie informacji o pożarze do innych elementów automatyki pożarowej. Detekcja realizowana jest najczęściej za pomocą tzw. liniowych czujek ciepła wykrywających przyrost temperatury pod stropem tunelu oraz uzupełniająco poprzez systemy wizyjne CCTV i AID zarządzane przez obsługę obiektu. Automatyczne przekazanie informacji o pożarze i zarządzanie pracą systemów odbywa się poprzez urządzenia sterująco-zasilające takie jak tablice i centrale sterująco zasilające, zasilacze pożarowe oraz centrale sterujące urządzeniami przeciwpożarowymi. Szczególnym rodzajem tych ostatnich są tzw. systemy integracyjne, pozwalające na automatyczne i ręczne sterowanie urządzeniami przeciwpożarowymi, weryfikację sygnału alarmu pożarowego oraz monitorowanie stanu pracy urządzeń bezpieczeństwa. Zastosowanie urządzeń integrujących jest obligatoryjne w obiektach budowlanych metra [10], są one również powszechnie stosowane w obiektach infrastruktury drogowej. Rozważając systemy zapewniające skuteczne działanie automatyki pożarowej należy także wspomnieć o równie ważnych i skomplikowanych rozwiązaniach zapewniających ciągłość zasilania w obiekcie (podstawowe i rezerwowe źródła zasilania oraz systemy automatycznego załączania rezerwy) oraz przeciwpożarowych wyłączników prądu, pozwalających na odłączenie zasilania wszystkich systemów, których działanie w warunkach pożaru nie jest niezbędne. Problematykę zasilania urządzeń bezpieczeństwa pożarowego omówiono szerzej w monografii [11, 12].

Systemy wentylacji pożarowej

Próbując skatalogować systemy wentylacji pożarowej tuneli możemy wyróżnić trzy główne ich rodzaje różniące się sposobem usuwania dymu oraz dostarczania powietrza kompensującego:

- wentylacja wzdłużna;
- wentylacja półpoprzeczna;
- wentylacja poprzeczna.

Według przepisów techniczno-budowlanych, stosowanie systemów możliwe jest w tunelach jak w tabeli 1.

Tabela 1. Zakres stosowania systemów wentylacji mechanicznej, wg [13]

System wentylacji	Długość tunelu	
	prowadzącego jezdnię dwukierunkową	o oddzielnych konstrukcjach dla różnych kierunków ruchu
Wzdłużna	nie większa niż 1000 m	nie większa niż 3000 m
Półpoprzeczna	większa niż 250 m i mniejsza niż bądź równa 1500 m	większa niż 250 m i mniejsza niż bądź równa 3000 m
Poprzeczna	większa niż 1500 m	większa niż 3000 m

Ponadto, możliwe jest także wykorzystanie wentylacji naturalnej realizowanej jako swobodny wypływ dymu poprzez portale tuneli o niewielkiej długości, lub poprzez dedykowane otwory w stropie łączące tunel z powierzchnią, przez które możliwa jest ekstrakcja dymu. Rozwiązanie to jest powszechnie stosowane w krajach dalekiego wschodu (Japonia, Chiny) i wedle wiedzy autora nie zostało jeszcze użyte w żadnym z polskich tuneli drogowych.

Wentylacja wzdłużna

Najczęstszym rozwiązaniem wentylacji pożarowej tuneli drogowych jest wentylacja wzdłużna, tj. system, w którym wskutek wymuszonego przepływu powietrza dym usuwany jest mechanicznie przez portal wyjazdowy tunelu (rys. 1). Wymuszenie przepływu realizowane jest poprzez wentyla-

tory strumieniowe rozmieszczone pod stropem tunelu, a ich liczba i parametry pracy dobierane są w sposób zapobiegający cofaniu się dymu w kierunku portalu wjazdowego. Wymagana prędkość przepływu powietrza (tzw. prędkość krytyczna) obliczana jest z uwzględnieniem niekorzystnych warunków meteorologicznych, różnicy wysokości pomiędzy portalami (istotne z uwagi na efekt kominowy), oporów lokalnych (portale, pojazdy) czy oddziaływania pożaru. Przepisy techniczno-budowlane wymagają, aby prędkość krytyczna nie była mniejsza niż 1,50 m/s [13]. Kierunek przepływu powietrza powinien być zgodny z kierunkiem ruchu w tunelu, tak aby dym nie był kierowany w stronę użytkowników pojazdów, którzy zatrzymali się przed miejscem pożaru. W systemach wzdłużnych dym zazwyczaj usuwany jest z tunelu poprzez jego portale, a w przypadku obiektów o dużej długości przez punkty wyciągowe zlokalizowane w jego ścianach lub stropie (zazwyczaj co 750–1500 m). Przy skutecznym działaniu systemu tunel jest wolny od dymu od strony nawiewu powietrza kompensacyjnego, przez co możliwa jest zarówno ewakuacja, jak i prowadzenie akcji ratowniczo-gaśniczej. Ponieważ dym transportowany jest w całym przekroju poprzecznym tunelu, system ten nie zapewnia warunków ewakuacji w obszarze pomiędzy źródłem pożaru a portalem, którym dym jest usuwany. W związku z powyższym, w czasie niezbędnym na ewakuację system wentylacji pożarowej powinien być wyłączony tak, aby umożliwić ewakuację osobom znajdującym się „za” źródłem pożaru. Wobec powyższych wad, zastosowanie systemu wentylacji wzdłużnej w dwukierunkowych tunelach oraz tunelach miejskich o dużym prawdopodobieństwie powstania zatorów komunikacyjnych jest trudne. Takie zastosowanie wymaga pogłębionych analiz ryzyka oraz może wymagać dodatkowych rozwiązań w obszarze kontroli ruchu, kierowania procesem ewakuacji czy samoczynnych urządzeń gaśniczych.

Rys. 1. Dym kierowany w głąb tunelu w kierunku ruchu pojazdów – skuteczne działanie systemu wentylacji wzdłużnej w tunelu drogowym



Wentylacja półpoprzeczna

System półpoprzeczny to system łączący poprzeczny sposób wyciągu dymu poprzez kraty wyciągowe równomiernie rozmieszczone co 50–120 m ze wzdłużnym sposobem dostarczania powietrza kompensacyjnego całym przekrojem tunelu. System ten osiąga parametry pracy zbliżone do wentylacji poprzecznej, przy istotnym zmniejszeniu kosztu realizacji inwestycji (brak odrębnego kanału powietrza nawiewanego i powiązanej infrastruktury). Choć w ocenie autora rozwiązanie to może sprawdzić się w każdym obiekcie bez względu na długość, przepisy techniczno-budowlane ograniczają jego stosowanie do tuneli o długości do 1,5 km lub 3 km (tab. 1).

W polskim systemie prawnym za system półpoprzeczny uważa się także system, w którym powietrze kompensacyjne dostarczane jest poprzecznie przez punkty nawiewu w ścianach tunelu, a dym usuwany jest portalami jak przy wentylacji wzdłużnej. W ocenie autora, rozwiązanie to nie ma jednoznacznych zalet w stosunku do systemu wentylacji wzdłużnej, przy zdecydowanie zwiększonym koszcie jego realizacji. Jego popularność tłumaczy wyłącznie osadzenie w przepisach techniczno-budowlanych, jako rozwiązania pozwalającego na rezygnację z wentylacji poprzecznej w tunelach dwukierunkowych.

Wentylacja poprzeczna

System, w którym dym usuwany jest punktowo poprzez klapy wentylacji pożarowej w górnej części tunelu, a powie-

trze kompensacyjne dostarczane jest równomiernie w całej długości tunelu lub na wybranym jego odcinku. W prawidłowo działającym systemie wentylacji poprzecznej rozpręstrzenie się dymu ograniczane jest do odcinka pomiędzy źródłem pożaru a punktem wyciągu, przy czym zapewnienie „szczelności” tego odcinka nie jest w pełni możliwe (niewielkie ilości dymu mogą wypływać poza wyznaczony odcinek oddymiany). Dym powinien utrzymywać się pod stropem tunelu (rys. 2). W celu uniezależnienia działania systemu od warunków meteorologicznych i innych wpływających na przepływ w tunelu, system poprzeczny może być wspierany grupami wentylatorów strumieniowych regulujących prędkość przepływu wzdłuż tunelu. Dzięki dostarczaniu powietrza kompensacyjnego z niedużą prędkością, ograniczane jest mieszanie się dymu z tym powietrzem. Skutkiem tego, system poprzeczny zapewnia lepsze warunki środowiska w pobliżu pożaru niż systemy wzdłużne lub półpoprzeczne. Systemy wentylacji poprzecznej są szczególnie użyteczne w tunelach dwukierunkowych, miejskich lub o dużym ryzyku powstania zatorów komunikacyjnych. Dzięki możliwości ograniczenia odcinka, na którym dochodzi do zadymienia, systemy poprzeczne są typowym rozwiązaniem w tunelach o długości ponad 3 km.

Wentylacja naturalna

Wentylacja naturalna to rozwiązanie, w którym dym usuwany jest z tunelu wyłącznie poprzez działanie naturalnych sił wyporu powstałych pomiędzy gorącą warstwą dymu a otaczającym powietrzem, czasem w niewielkim stopniu



Rys. 2. Warstwa dymu pod stropem tunelu wentylowanego poprzecznie

wspomagany przez ruch powietrza wywołany ruchem pojazdów. Ograniczeniem jest wychładzanie się dymu w odległości 100–200 m od źródła pożaru, przez które dym opadać może do strefy, w której mogą przebywać ludzie [4]. Ponadto, w przypadku niekorzystnego oddziaływania wiatru, usunięcie dymu z tunelu w sposób naturalny może nie być możliwe. Przepisy techniczno-budowlane zezwalają na wentylację naturalną (z wykorzystaniem głowic tunelu) w obiektach o długości do 500 m (dwukierunkowe) lub 700 m (jednokierunkowe). Jednocześnie, zastosowanie wentylacji naturalnej w tunelu o długości przekraczającej 250 m wymaga potwierdzenia skuteczności jej działania na podstawie sporządzonej analizy ryzyka. W ocenie autora udowodnienie bezpiecznego zastosowania wentylacji naturalnej w tunelach o długości ponad 250 m jest trudne, o ile nie zostaną zastosowane dodatkowe rozwiązania podnoszące bezpieczeństwo tunelu, związane z ewakuacją czy samoczynnym gaszeniem pożaru.

Wykorzystanie narzędzi numerycznych w projektowaniu wentylacji tuneli

Wymagany i Dostępny Czas Ewakuacji

Przepisy techniczno-budowlane [13], jak i rekomendacje techniczne [5], odnoszą się do oceny skuteczności działania systemów bezpieczeństwa pożarowego, w tym przede wszystkim wentylacji pożarowej na drodze analiz ryzyka oraz analiz inżynierskich. W obszarze bezpieczeństwa pożarowego, podstawowym sposobem oceny prawidłowości działania przyjętych rozwiązań jest porównanie Dostępnego i Wymaganego Czasu Bezpiecznej Ewakuacji (DCBE i WCBE). Czas DCBE to czas, po którym warunki środowiska w tunelu uniemożliwią ewakuację. Czas szacowany jest w ramach modelowania przepływu powietrza w obiekcie z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*, CFD). Czas WCBE to czas potrzebny na opuszczenie tunelu przez osoby zagrożone przez pożar. W przypadku czasu WCBE, określa się go z wykorzystaniem numerycznych modeli ewakuacji osób przy uwzględnieniu współczynnika bezpieczeństwa nie mniejszego niż 1,30. Interpretacja wyników analiz ewakuacji w tunelach drogowych nie jest tak jednoznaczna jak w przypadku budynków. W odniesieniu do bezpieczeństwa, czym innym jest opuszczenie obszaru przy samym pożarze, gdzie osobie grozi bezpośrednio niebezpieczeństwo, czym innym przejście do sąsiedniej nawy lub klatek schodowych a czym innym wyjście na zewnątrz obiektu. Jednocześnie, każda nawa tunelu stanowi odrębną strefę pożarową, a tradycyjna definicja traktuje osobę jako bezpieczną dopiero, gdy znajdzie się w innej strefie pożarowej, niż ta objęta pożarem. Podchodząc do zagadnienia w sposób inżynierski, osoby, które opuszczą obszar oddymiany są już bezpieczne, ale nie oznacza to, że zakończyły ewakuację. Czas ucieczki poza obszar bezpośredniego zagrożenia może wynosić kilkadziesiąt sekund do kilku minut, a wiele zależy od tzw. czasu opóźnienia początku ewakuacji. Często przyjmuje się, że osoby zatrzymujące się tuż obok źródła

pożaru, widzą rozwijający się gigantyczny pożar i w krótkim czasie podejmą decyzję o ucieczce. Osoby znajdujące się w dużej odległości od ognia mogą potrzebować więcej czasu lub innych sygnałów. Stąd ocena czasu ewakuacji oraz bezpieczeństwa osób ewakuujących się jest trudniejsza, niż w przypadku oceny ewakuacji budynku. W każdym wypadku, proces musi być oceniany łącznie ze scenariuszem rozwoju pożaru i wynikami analiz CFD rozprzestrzeniania się dymu i ciepła.

Ocena czasu DCBE polega na określeniu czasu, po jakim przekroczone zostaną wartości krytyczne warunków środowiska, które uniemożliwią ewakuację osób. Kryteria te zdefiniowano w rozporządzeniu dot. podziemnych obiektów metra [10], przy czym w ocenie autora podane tam wartości parametrów mogą być zastosowane wprost, także w drogowych obiektach inżynierskich. Krytyczne wartości parametrów, będące kryteriami oceny bezpieczeństwa, przyjmują wartości:

- temperatura powietrza powyżej 60°C na wysokości mniejszej lub równej 1,80 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- gęstość strumienia promieniowania cieplnego o wartości 2,50 kW/m² przez czas ekspozycji dłuższy niż 30 s;
- temperatura gorących gazów pożarowych powyżej 200°C na wysokości ponad 2,50 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- zasięg widzialności mniejszy niż 10 m na wysokości mniejszej lub równej 1,80 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- objętościowe stężenie tlenu poniżej 15%.

Analizy CFD

Analiza CFD polega na rozwiązaniu układu równań różniczkowych opisujących przepływ masy i energii w badanym układzie, podzielonym na skończoną liczbę niewielkich objętości, w dokładnie opisanych następujących po sobie krokach czasowych. Rozwiązanie równań stanowią wartości ciśnienia, temperatury, gęstości, prędkości przepływu, stężenia dymu itp., znane dla każdej objętości w badanym układzie, w każdym momencie trwania analizy. Dzięki temu analizy CFD są tak dobrym narzędziem w rękach inżyniera, pozwalając zaglądnąć w dowolne miejsce w badanym budynku i w kilka sekund ocenić warunki środowiska tam panujące. Wykorzystanie modeli numerycznych w przewidywaniu rozwoju pożarów w obiektach budowlanych nakreślił niemal 40 lat temu Emmons [14], przy czym dopiero gwałtowny przyrost mocy komputerów w ostatnich 25 latach umożliwił wykorzystanie komputerowych modeli CFD jako podstawowego narzędzia inżynierskiego w obszarze bezpieczeństwa pożarowego tuneli. Za kamień milowy tego procesu można uznać opracowanie przez amerykański ośrodek NIST oprogramowania *Fire Dynamics Simulator* (FDS) [15], będącego ogólnodostępnym, otwartym i darmowym modelem CFD na potrzeby inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Chociaż FDS jest dzisiaj standardowym narzędziem w ocenie rozwoju pożaru, jego wykorzystanie w budownictwie tunelowym może być trudne lub wręcz niemożliwe, co ma związek z ograniczeniami w rozwiązaniu ciśnienia oraz dyskretyzacji przestrzeni. Wykorzystanie metod numerycznych w projektowaniu systemów wentylacji

omawiano w literaturze branżowej wielokrotnie. Doświadczenia w stosowaniu metody CFD zawarto w [16, 17], a wpływ doboru modeli i warunków brzegowych opisano m.in. w [18].

Najważniejszym parametrem wpływającym na wynik obliczeń numerycznych jest moc pożaru, tj. ilość ciepła wydzielana w pożarze w jednostce czasu, determinująca także ilość powstających produktów spalania i zagrożenia z nim związane. Nie ma jednej uniwersalnej wartości tego parametru. Przykładowo, w przypadku podziemnej infrastruktury kolejowej, zgodnie z rozporządzeniem [10], moc pożaru wykorzystana w analizie CFD dla podziemnej stacji metra nie powinna być niższa niż 15 MW. W obiektach drogowych moc pożaru wynosi zazwyczaj 30 MW (przy zastosowaniu urządzeń gaśniczych) lub 100 MW przy ich braku, chociaż spotykane są także inne wartości zaczerpnięte z różnych zagranicznych źródeł normatywnych. Przepisy techniczno-budowlane nie definiują szybkości przyrostu mocy pożaru, przez co w różnych analizach rzeczywista moc pożaru w chwili oceny wyników może być różna. Inną komplikacją stanowi często definiowana w Programach Funkcjonalno-Użytkowych „ilość dymu” powstałego w pożarze. Jest to zaczerpnięcie z nieco przestarzałych wytycznych niemieckich, nie odnoszących się do modelowania CFD. W przypadku analiz numerycznych CFD, osoba prowadząca analizę definiuje moc źródła pożaru, a „ilość dymu” jest wynikiem obliczeń – wypadkową unoszenia się konwekcyjnego strumienia ciepła nad pożarem i mieszania z otaczającym powietrzem. Prowadzący analizę nie ma bezpośredniego wpływu na tę ilość, w odróżnieniu do obliczeń analitycznych czy wykorzystania modeli jednowymiarowych. Stąd, często spotykana definicja ilości dymu wyrażona w m^3/s nie ma sensu, w odniesieniu do zaawansowanych modeli numerycznych. Jednocześnie, rzadko spotyka się definicję

parametrów dymotwórczości źródła pożaru (współczynnik generacji sadzy Y_{soot} , efektywne ciepło spalania $H_{c,eff}$), które są definiowane przez użytkownika modelu CFD i mają wielki wpływ na wynik analizy. Za przykład takiej definicji w odniesieniu do pożarów pojazdów można podać wartości $Y_{soot} = 0.1$ [19] i $H_{c,eff} = 25$ MJ/kg [1].

Weryfikacja skuteczności wykonanego systemu wentylacji

Prawidłowy projekt systemu wentylacji pożarowej, nawet ten potwierdzony najlepszą analizą numeryczną CFD, wciąż nie jest gwarancją skutecznego działania systemu wentylacji. Zarówno w przypadku formalnych odbiorów organów państwa, jak i własnej kontroli inwestora czy wykonawcy, narzędziem pozwalającym ocenić wykonanie instalacji zgodnie z projektem oraz wymaganiami dokumentów i norm stanowiących podstawę projektu, skuteczność jej działania oraz poprawność współdziałania z pozostałymi systemami bezpieczeństwa pożarowego w obiekcie, są próby z gorącym dymem. Badanie to polega na wytworzeniu w obiekcie kontrolowanego pożaru o ograniczonej mocy, z jednoczesną generacją dużej ilości sztucznego aerozolu imitującego dym. Ponieważ powstała mieszanina ma temperaturę wyższą o kilkadziesiąt °C od temperatury otoczenia, sztuczny dym tworzy warstwę podsufitową, w dobry sposób odzwierciedlając proliferację zadymienia w rzeczywistym pożarze. Przebieg próby z gorącym dymem w sposób możliwie wierny odwzorowuje przebieg rzeczywistego pożaru, nie stwarzając zagrożenia dla obiektu czy jego instalacji.

Próby z gorącym dymem pozwalają zweryfikować scenariusz działania systemów bezpieczeństwa obiektu, osza-



Rys. 3. Źródło gorącego dymu o mocy około 1 MW wykorzystane w próbie z gorącym dymem w tunelu

cować skuteczność systemu wentylacji i wykryć nieprawidłowości (np. niedoskonałości budowlane), które w istotny sposób wpływają na przepływ powietrza w budynku. Problematykę prowadzenia testów z gorącym dymem w garażach zamkniętych omówiono w wytycznych ITB 493/2015 [1]. Metoda w nich opisana jest hybrydą dwóch metodologii, tzn. łączy zalety czystych prób ze źródłem pożaru o dużej mocy według tzw. metody australijskiej [20] z metodą jakościowej oceny wyników próby o dużej użyteczności dla organów administracyjnych i funkcjonariuszy Straży Pożarnej. Zestaw urządzeń do prowadzenia prób składa się z zestawu tac grzewczych z ciekłym paliwem, generatorów gorącego dymu odpornego na temperatury do 200°C (rys. 3). W czasie typowej próby z gorącym dymem nie jest możliwa jednoznaczna ocena zasięgu widzialności czy innych parametrów związanych z zadymieniem badanego obszaru. Aerozol znacznikowy charakteryzuje się innymi właściwościami optycznymi niż dym powstały w pożarze, ponadto odniesienie jego masowego stężenia w danym miejscu do masowego stężenia dymu w prawdziwym pożarze jest niezwykle trudne.

Co ważne, w metodzie wykorzystywanej przez ITB mniejszy nacisk kładzie się na faktyczną ocenę skuteczności działania systemów wentylacji pożarowej, a większy na poprawność działania systemu detekcji pożaru i integracji urządzeń pożarowych. Możliwy jest pomiar czasu potrzebnego na uruchomienie poszczególnych składowych systemu (pomiar czasu opóźnienia), a nawet czasu detekcji pożaru. Na podstawie badań porównawczych prowadzonych w ITB określono, że czas reakcji czujek pożaru różnego typu na dym powstały w czasie próby z gorącym dymem, w komorze testowej TF, jest wielokrotnie krótszy niż ich czas reakcji na którykolwiek z pożarów testowych (działanie niemal natychmiastowe). W razie wykrycia nieprawidłowości w działaniu prowadzone są działania naprawcze, m.in. nadanie poszczególnym sygnałom różnych priorytetów, zmiany w bilansie powietrza usuwanego i nawiewanego czy zmiany w podziale obiektu na strefy detekcji.

Podsumowanie

Wentylacja pożarowa jest kluczowym elementem strategii bezpieczeństwa każdego drogowego obiektu inżynierskiego. Odprowadzanie dymu z tunelu drogowego jest niezbędne dla zapewnienia możliwości bezpiecznej ewakuacji, jak i podjęcia działań ratowniczo-gaśniczych. Wentylacja służy także odprowadzeniu ciepła z obiektu, przez co zmniejsza konsekwencje pożaru poza obszarem bezpośredniego oddziaływania ognia. Choć w niniejszej publikacji aspekt ten nie był omawiany, systemy wentylacji pożarowej zazwyczaj pełnią rolę systemów sanitarnych, służących odprowadzaniu nadmiaru spalin w czasie normalnego użytkowania tunelu. Z doświadczeń autora, wymagania dla pracy w warunkach

pożaru są niemal zawsze tymi, które definiują rodzaj i wielkość zastosowanego systemu.

Bibliografia

- [1] Węgrzyński W, Krajewski G (2015) Systemy wentylacji pożarowej garaży. Projektowanie, ocena, odbiór, 493/2015. Instytut Techniki Budowlanej
- [2] (2008) RVS 09.02.31 Tunnel Ventilation - Basic Principles
- [3] Road and Transportation Research Association (2006) Regulations for the equipment and operation of road tunnels. RABT
- [4] ASTRA 13001 (2008) Ventilation des tunnels routiers. Choix du système, dimensionnement et équipement
- [5] (2021) WR-M-42 Wytyczne projektowania wentylacji drogowych tuneli
- [6] Fridolf K, Nilsson D, Frantzich H (2015) Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice
- [7] Ronchi E, Kuligowski ED, Nilsson D, Peacock RD, Reneke PA (2016) Assessing the Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models. *Fire Technol.* doi: 10.1007/s10694-014-0432-3
- [8] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M (2016) Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunn Undergr Sp Technol* 53: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.003>
- [9] Fridolf K, Andrée K, Nilsson D, Frantzich H (2014) The impact of smoke on walking speed. *Fire Mater* 38:744–759: <https://doi.org/10.1002/fam.2217>
- [10] Ministerstwo Infrastruktury (2011) Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie. DzU 2011 nr 144 poz 859
- [11] Lenartowicz R, Fangrat J (2016) Instalacje zasilające urządzenia bezpieczeństwa pożarowego. Tom 1: Układy połączeń i urządzenia zasilające. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa
- [12] Lenartowicz R, Fangrat J (2016) Instalacje zasilające urządzenia bezpieczeństwa pożarowego. Tom 2: Oprzewodowanie i urządzenia przeciwpożarowe. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa
- [13] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (z późniejszymi zmianami)
- [14] Emmons HW (1979) The prediction of fires in buildings. *Symp Combust* 17:1101–1111: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(79\)80105-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(79)80105-8)
- [15] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschenk C, Overholt K (2017) Fire Dynamics Simulator User's Guide, Sixth Edition
- [16] Węgrzyński W, Krajewski G (2014) Doświadczenia z wykorzystania narzędzi inżynierskich do oceny skuteczności funkcjonowania systemów wentylacji oddymiającej. *Mater Bud*
- [17] Krajewski G, Węgrzyński W (2014) Wykorzystanie narzędzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w projektowaniu i odbiorze systemów wentylacji pożarowej garaży zamkniętych. *BITP* 141–156
- [18] Węgrzyński W, Krajewski G (2014) Dobór modeli oraz warunków brzegowych a wynik analizy numerycznej rozprzestrzeniania się dymu i ciepła. *Mater Bud*
- [19] Węgrzyński W, Vigne G (2017) Experimental and numerical evaluation of the influence of the soot yield on the visibility in smoke in CFD analysis. *Fire Saf J* 91:389–398: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.053>
- [20] AS (1999) Smoke Management Systems - Hot Smoke Test