

mgr inż. Grzegorz Krajewski¹
mgr inż. Wojciech Węgrzyński¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 13.06.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 19.08.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Sposób doprowadzenia powietrza kompensacyjnego a wzdłużna wentylacja pożarowa stacji metra²

The Influence of Air Supply Methods on Longitudinal Fire Ventilation of Underground Stations

Способ подачи компенсационного воздуха а продольная противопожарная вентиляция станции метро

ABSTRAKT

Cel: Przedstawienie wyników badań własnych autorów w obszarze systemów wentylacji podziemnych obiektów kolejowych na przykładzie sieci metra. Badania obejmowały przede wszystkim powiązanie wpływu sposobu doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do obszaru stacji metra ze skutecznością działania systemu wzdłużnej wentylacji tej stacji. Artykuł ma na celu zapoznanie projektantów z możliwym zastosowaniem wentylacji wzdłużnej, także w obszarze stacji podziemnych, poprzez podkreślenie wad i zalet tego rozwiązania. Artykuł zredagowano na podstawie wyników badań prezentowanych na konferencji „Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej” (Kraków 2016).

Wprowadzenie: Jednym z dopuszczonych do stosowania rozwiązań wentylacji pożarowej podziemnych stacji kolei (metra) jest system wentylacji wzdłużnej, bazujący na rozwiązaniach podobnych do tych wykorzystywanych w wentylacji tuneli. Systemy wentylacji wzdłużnej mogą zapewnić podobne warunki środowiska do systemów poprzecznych (oddymiania). Chronią one cały obszar stacji i zapewniają drogę wejścia dla ekip ratowniczo-gaśniczych. Aby spełniały te funkcje, należy poprawnie dobrać metodę doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do obszaru stacji, zarówno w sposób mechaniczny, jak i naturalny. Duże znaczenie ma również stosunek ilości powietrza doprowadzanego w sposób mechaniczny oraz grawitacyjny. W artykule autorzy prezentują wyniki przeprowadzonego krótkiego programu badań numerycznych, w ramach którego analizowano wpływ bilansu powietrza doprowadzanego na efekty działania systemu wentylacji pożarowej peronów.

Metodologia: W pracy przedstawiono w głównej mierze wyniki badań własnych autorów, wykonanych z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), które osadzono w kontekście literaturowym tematu. Dodatkowo zaprezentowano własne doświadczenia zdobyte w trakcie kilkuset testów z gorącym dymem w trakcie odbiorów II linii Metra Warszawskiego.

Wnioski: Systemy wentylacji pożarowej wzdłużnej są w stanie zapewnić porównywalne warunki środowiska w obrębie tuneli i stacji metra do systemów poprzecznych. Działanie systemu wzdłużnego można uznać za bezpieczniejsze z punktu widzenia ratowników prowadzących działania ratowniczo-gaśnicze. Kluczową rolę w określeniu skuteczności systemu mają sposób dostarczania powietrza oraz ilość powietrza, które dostarczane jest mechanicznie.

Słowa kluczowe: wentylacja pożarowa, wentylacja tuneli, wentylacja wzdłużna, metro, kompensacja

Typ artykułu: studium przypadku – analiza zdarzeń rzeczywistych

ABSTRACT

Aim: The purpose of this paper is to reveal the outcome from studies performed by the authors about smoke and heat ventilation systems for underground railway buildings using an underground railway network as an example. Research activity examined, in particular, the link between air supply methods to an underground station area with the effective performance of a longitudinal ventilation system at such a station. The intention for this publication is to increase the design credibility for longitudinal ventilation solutions, including solutions for underground stations, by highlighting associated advantages and disadvantages. This article is based on experimental study results, which were presented at an international conference “Underground Buildings and Road Safety, and the Urban Infrastructure” (Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej), Kraków 2016.

Introduction: Longitudinal ventilation systems provide one of the approved solutions for underground railway stations and are based on similar solutions applied in the ventilation of road tunnels. Such system may provide similar environmental conditions as with transverse systems, at the same time preserve areas throughout the station from smoke and ensure safe access for firefighting and rescue teams. In order to achieve this, a key issue, which must be addressed, concerns the choice of supply strategy for the delivery of air to the underground location. This may be by

¹ Instytut Techniki Budowlanej / Building Research Institute, Poland / g.krajewski@itb.pl;

² Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu / The authors contributed equally to this article;

mechanical as well as natural means. Likewise, the volume relationship between air supplied by mechanical and gravitational means has a crucial impact on the performance of the ventilation system. The authors reveal results from a short programme of numerical studies, which analysed the air flow relationship to achieve an optimum balance, and the consequential performance of fire ventilation systems on station platforms.

Methodology: The study reveals results from original research performed by the authors, which is based on the literature review in this area, using the Computational Fluid Dynamics method (CFD). Additionally, numerical study results are supported by the authors personal experience acquired through numerous hot smoke tests performed during the commissioning phase of the Warsaw Metro, Line 2.

Conclusions: Longitudinal systems can provide similar environmental conditions as traditional transverse systems. During firefighting and rescue operations, longitudinal systems provide more safety for firefighters than transverse solutions. The key role in the system performance can be attributed to the supply method and volume of air provided by mechanical means.

Keywords: fire ventilation, tunnel ventilation, longitudinal ventilation, underground railway, air supply

Article type: case study – analysis of actual events

АННОТАЦИЯ

Цель: Представить результаты собственных исследований авторов в области систем вентиляции подземных железнодорожных объектов на примере сети метро. Исследования касались, в основном, влияния способа подачи компенсационного воздуха в район станции метро на эффективность действия системы продольной вентиляции этой станции. Цель статьи заключается в ознакомлении проектантов с возможностью использования продольной вентиляции, в том также в подземных станциях, благодаря выделению преимуществ и недостатков этого решения. Статья была подготовлена на основе результатов исследований, представленных на конференции „Подземное строительство и безопасность дорожного транспорта и городской инфраструктуры” (Краков 2016).

Введение: Одним из одобренных для использования решений пожарной вентиляции подземной железнодорожной станции (метро) является продольная вентиляционная система, основанная на решениях, аналогичных тем, которые используются при вентиляции туннелей. Системы продольной вентиляции могут обеспечить похожие условия окружающей среды как поперечные системы (удаления дыма). Кроме того, они защищают всю территорию станции и обеспечивают вход для спасательно-гасящих бригад. Для того, чтобы они выполняли эти задачи, необходимо правильно выбрать метод подачи компенсационного воздуха в район станции, как механическим, так и естественным путем. Большое значение имеет также соотношение количества воздуха, подаваемого механическим и гравитационным путями. В статье авторы представляют результаты проведенной короткой программы числовых испытаний, в которых проанализировано влияние баланса приточного воздуха на эффекты работы системы противопожарной вентиляции платформ.

Методология: В статье представлены в основном результаты собственных исследований, проведенных с использованием метода вычислительной гидродинамики (CFD), представленные вместе с предметной литературой. Дополнительно, авторы представляют свой собственный опыт, полученный в ходе нескольких сот тестов с горячим дымом во время приема второй линии Варшавского метрополитена.

Выводы: Продольные системы противопожарной вентиляции могут обеспечить сопоставимые условия окружающей среды в туннелях и станциях метро, как поперечные системы. Систему продольной вентиляции можно считать более безопасной для спасателей, проводящих спасательно-гасящие действия. Ключевую роль в определении эффективности системы играют способ подачи воздуха, подаваемого механическим путём и его количество.

Ключевые слова: пожарная вентиляция, туннель, продольная вентиляция, метро, компенсация

Вид статьи: тематическое исследование – анализ реальных случаев

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych przepelnionych samochodami miastach podziemne systemy kolei miejskiej są jednym z najczęściej wykorzystywanych rozwiązań transportu publicznego. Ich główną zaletą jest możliwość transportu wielu osób na duże odległości w stosunkowo krótkim czasie. Ich zastosowanie wiąże się jednak z ryzykiem wystąpienia pożarów, dlatego bardzo ważna jest specjalna dbałość o jak najwyższy poziom zabezpieczeń przeciwpożarowych podziemnych przystanków i stacji.

Podziemne stacje stanowią specyficzną formę obiektu budowlanego, który ma postać długiego pomieszczenia z niskim stropem oraz maksymalnie dwiema lub trzema drogami ucieczki dla osób ewakuujących się. Scenariusze rozwoju pożaru w pociągu wskazują, że tak ukształtowana przestrzeń może wypełnić się dymem w ciągu zaledwie kilku minut. Aby umożliwić ewakuację oraz prowadzenie działań ratowniczych w obrębie stacji, należy wykorzystać systemy ujęte we wspólne miano „wentylacji pożarowej”. Wymóg ich stosowania jest zawarty bezpośrednio w przepisach techniczno-budowlanych dotyczących stacji metra [1].

Artykuł zredagowano na podstawie wyników badań prezentowanych na konferencji „Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej” (Kraków 2016) [2].

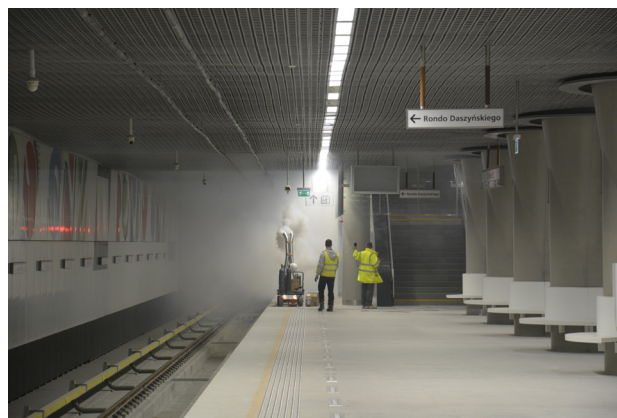
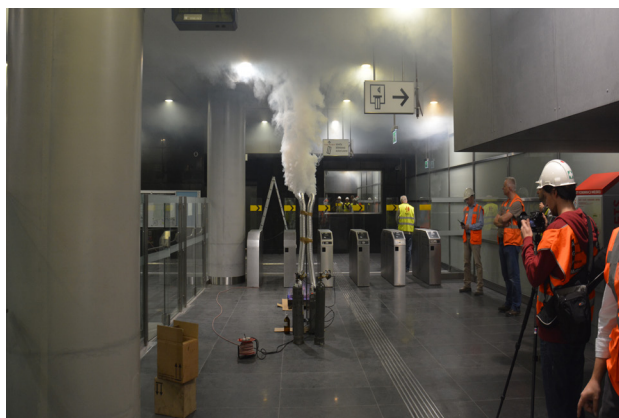
2. Systemy wentylacji pożarowej stacji metra

W ocenie autorów można wyróżnić trzy zasadnicze rodzaje wentylacji przestrzeni stacji metra:

- a) poprzeczną wentylację oddymiającą – rozwiązanie zaprojektowane w oparciu o zasady takie jak w przypadku budynków, z uwzględnieniem osiowosymetrycznej lub rozplywającej się kolumny konwekcyjnej dymu i równań opisujących przepływ dymu w danym układzie architektonicznym;
- b) poprzeczną wentylację oddymiającą wraz z pełnym wygrodeniem torowiska od przestrzeni peronu – rozwiązanie analogiczne do a), jednak z założeniem fizycznego odseparowania przestrzeni peronów, w której może dojść do pożaru pociągu, przez co do obszaru, w którym prowadzona będzie ewakuacja osób dociera zdecydowanie mniejsza ilość dymu;
- c) wentylację wzdłużną – transport dymu odbywa się wzdłuż peronu z wykorzystaniem punktów wyciągu w tunelach bądź na krańcach stacji.

Chociaż powyższe rozwiązania można traktować jako różne organizacje systemu oddymiania, składające się z podobnych elementów wykonawczych, należy pamiętać, że cechują je zasadnicze różnice w skuteczności działania, mierzonej warunkami środowiska, jakie poszczególne rozwiązania techniczne są w stanie zapewnić w czasie pożaru. W niniejszym artykule autorzy poruszają zagadnienia związane z działaniem systemów wentylacji wzdłużnej oraz wpływem zmiany lokalizacji niektórych elementów systemów na ich skuteczność.

Działanie systemu wentylacji wzdłużnej w trakcie pożaru można podzielić na dwa okresy. W pierwszym (czas ewaku-



Ryc. 1. Ilustracja działania wentylacji poprzecznej (po lewej stronie) oraz wzdłużnej (po prawej stronie), archiwum autorów
 Fig. 1. Illustration of transverse ventilation (left) and longitudinal ventilation (right) system

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

acji osób) system nie pracuje – dym może rozpyływać się pod stropem stacji przez określony czas, nie powodując przy tym zagrożenia dla osób ewakuujących się. Po zakończeniu ewakuacji (upłynięciu wcześniej wyznaczonego czasu, zazwyczaj od 4 do 8 minut) wentylatory wyciągowe i nawiewne zostają uruchomione, kierując dym w jednym, wcześniej wybranym kierunku. System po zakończeniu ewakuacji ma zapewnić utrzymanie co najmniej połowy obszaru stacji (w rzucie horyzontalnym, ryc. 1) oraz drogi wejścia do obszaru stacji w stanie niezadymionym. Co ważne, nie jest możliwe zaprojektowanie systemu wentylacji pożarowej stacji metra w oderwaniu od oddziałującej na nią sieci tuneli czy fizycznych połączeń z obszarem zewnętrznym (bezpośrednich lub przez galerię). Strumienie powietrza doprowadzane lub napływające każdą z tych dróg mogą oddziaływać korzystnie lub niekorzystnie na przepływ dymu w samej stacji, a kontrola nad tym oddziaływaniem ma kluczowy wpływ na prawidłowe działanie systemu wentylacji.

Poza oczywistymi różnicami w działaniu rozwiązań techniczno-budowlanych wentylacji pożarowej stacji metra, każde z nich ma za zadanie zapewnić oddymienie drogi ewakuacji oraz umożliwić służbom ratowniczo-gaśniczym bezpieczne podjęcie działań ratowniczych, co zilustrowano na ryc. 1. W ocenie autorów, literatura opisująca systemy wentylacji pożarowej jest bogata, a referencjami wartymi wymienienia są [3–7]. Przedstawiono w nich ogólne zasady związane z oddymianiem obiektów budowlanych. W odniesieniu do systemów wentylacji pożarowej tuneli kolejowych warto wymienić publikacje poświęcone projektowaniu systemów wentylacji pożarowej [8–12] oraz publikacje [13–15], w których przedstawiono wyniki ciekawych eksperymentów numerycznych dotyczących systemów wentylacji oddymiającej tunelu. W odniesieniu do systemów wentylacji tuneli drogowych, porównanie popularnych metod projektowania systemów wentylacji pożarowej zawarto w pozycji [16]. Bogatym opracowaniem omawiającym aspekty techniczne i projektowe systemów wentylacji pożarowej w przestrzeniach garaży zamkniętych, które często przypominają obszary tuneli drogowych, są wytyczne ITB nr 493/2015 [17–18]. W niniejszej pracy wiedzę zawartą w przedstawionych źródłach wiedzy rozwinięto o rozważania dotyczące strategii doprowadzenia powietrza kompensacyjnego oraz doświadczenia praktyczne autorów z odbiorów technicznych systemów wentylacji II linii Metra Warszawskiego.

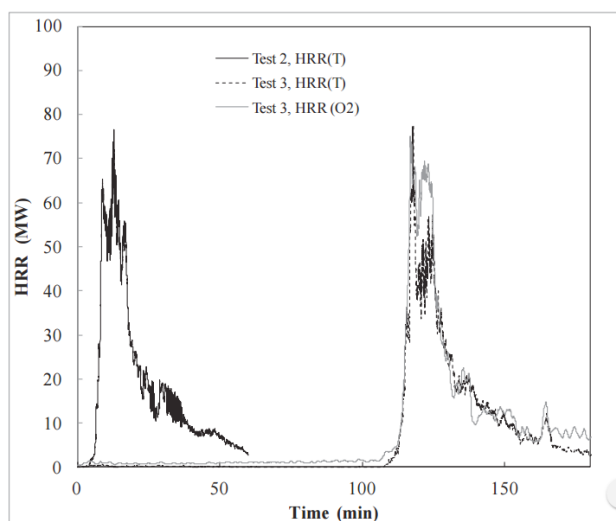
3. Wymagania przepisów techniczno-budowlanych

W krajowych przepisach techniczno-budowlanych wymóg stosowania systemów wentylacji pożarowej oraz ich podstawowe wymagania zawarto w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r., w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie [1]. W załączniku 1 do Rozporządzenia [1] postawiono wymaganie funkcjonalne względem systemu wentylacji, polegające na obowiązku zapobieżenia zadymieniu stacji, wyjść ewakuacyjnych i pomieszczeń, w których znajdują się urządzenia bezpieczeństwa. Ponadto wszystkie tunele o długości ponad 300 metrów przylegające do stacji powinny być wyposażone w wentylację mechaniczną. Zgodnie z wymogiem rozporządzenia do celów projektowych należy wyznaczyć możliwą moc pożaru w obiekcie, jednak nie mniejszą niż 15 MW. Ustawodawca pozostawia określenie szybkości przyrostu tej mocy projektantom, bez określenia wartości minimalnej lub maksymalnej. Jak wskazuje doświadczenie praktyczne, taka dowolność może być podstawą do nadużyć poprzez przyjęcie jako warunek brzegowy analizy wolnego rozwoju pożaru. Wyniki takiej analizy będą wskazywały na wyższą niż rzeczywista skuteczność działania systemu wentylacji [19]. Za najlepszy punkt odniesienia w kontekście rozwoju pożaru pociągu metra można uznać publikację [20], w której przedstawiono wyniki programu badań „The Metro Project” realizowanego wspólnie w Szwecji i Norwegii. Autorzy programu przeprowadzili dwa pożary w pełnej skali wagonu metra (z pozostawionymi w środku bagażami), ryc. 2. Wynikiem badań są krzywe HRR, przedstawione na ryc. 3, obrazujące rozwój pożaru pociągu wraz z pozostawionymi w nim bagażami. Należy zauważyć, że wyniki dwóch przeprowadzonych eksperymentów są ze sobą zbieżne, przy czym zaobserwowano istotne przesunięcie w czasie momentu rozwoju pożaru w każdym z nich. Szczytowa wartość mocy pożaru uzyskana w czasie badania wynosiła ponad 70 MW, co kilkakrotnie przewyższa moc pożaru rekomendowaną w polskich przepisach techniczno-budowlanych. Ważna jest także szybkość przyrostu mocy zmierzona w trakcie badania, która wskazuje, że badania numeryczne związane z pożarami pociągów metra powinny przebiegać co najmniej według tzw. krzywej szybkiego rozwoju pożaru (ang. Fast). Wiedzę dotyczącą doboru pożarów projektowych w tunelach, przede wszystkim drogowych, przedstawiono w publikacjach [9], [21–22], a przykłady pożarów historycznych w pozycjach [10], [23].



Ryc. 2. Wagon metra typu X1 wykorzystany w badaniach oraz rozmieszczenie bagaży wewnątrz wagonu [20]

Fig. 2. Underground Metro X1 used in the tests showing luggage located inside of the train [20]



Ryc. 3. Krzywe HRR pochodzące z badań oraz widok płonącego pociągu metra [20]

Fig. 3. HRR curves from the tests and a illustration of a burning underground train [20]



W rozporządzeniu [1] zawarto podstawowe wymagania stawiane systemom wentylacji pożarowej w obiektach budowlanych metra, sformułowane w sposób problemowy, a nie nakazowy. W przepisach tych zdefiniowano wartości krytyczne warunków środowiska, będące pośrednio kryteriami oceny skuteczności działania systemu wentylacji pożarowej:

- temperatura powietrza powyżej 60°C na wysokości mniejszej lub równej 1,80 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- gęstość strumienia promieniowania cieplnego o wartości $2,50 \text{ kW/m}^2$ 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%.

Skuteczność działania systemu powinna być wyznaczona przez porównanie dostępnego i wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji, przy czym dla wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji, wyznaczonego z wykorzystaniem narzędzi inżynierskich, należy przyjąć współczynnik bezpieczeństwa nie mniejszy niż 1,30.

Rozporządzenie [1] nie definiuje klasy rozwiązania techniczno-budowlanego w odniesieniu do norm badawczych czy klasyfikacyjnych do zastosowania w obszarze stacji metra

– lecz oczekiwany skutek działania systemu. Przypomina to przepis funkcjonalny zawarty w §270.1 przepisów techniczno-budowlanych dla budynków [24] dotyczący systemów wentylacji oddymiającej. W ocenie skuteczności działania systemu ważny jest umowny podział czasu trwania pożaru na dwa okresy – tj. czas ewakuacji (wyznaczany za pomocą np. modeli komputerowych z uwzględnieniem marginesu bezpieczeństwa nie mniejszego niż 1,30) oraz czas prowadzenia działań ratowniczo-gaśniczych. Przepis nie definiuje warunków niezbędnych dla prowadzenia działań – za takie należy uznać udostępnienie co najmniej jednej drogi dostępu do źródła pożaru, w wystarczający sposób oddymionej oraz temperatury w jej obszarze pozwalającej na prowadzenie rutynowych działań ratowniczych. Warunki te, w przypadku pożaru w pełni rozwiniętego o mocy 15 MW, mogą być bardzo trudne do uzyskania przez system poprzeczny – wymaga to zdecydowanego przewymiarowania instalacji względem wydajności niezbędnej dla zapewnienia warunków ewakuacji. Z drugiej strony, w przypadku systemów wentylacji wzdłużnej, uzyskanie warunków umożliwiających prowadzenie działań ratowniczych jest podstawowym skutkiem działania systemu. Transport powietrza wzdłuż stacji (tj. przez cały obszar stacji, aż do punktu wyciągowego zlokalizowanego przy jednym z jej portali) wymusza jednokierunkowy przepływ dymu i ciepła, wraz z utrzymaniem wolnej od dymu drogi, którą powietrze napływa. Oczywiście, uzyskanie powyższego efektu wymaga odpowiedniego zwymiarowania wydajności

systemu wentylacji, co w szczególności opisano m.in. w Instrukcji ITB nr 490/2013, poświęconej systemom wentylacji pożarowej metra [8].

Poza odpowiednim doborem wydajności systemu wentylacji pożarowej, równie istotne jest określenie sposobu doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do przestrzeni stacji. W stacjach chronionych wzdłużnym systemem wentylacji pożarowej, dobór sposobu zapewnienia dopływu świeżego powietrza może być uznany za krytyczny aspekt projektu. Doprowadzenie powietrza w sposób naturalny zapewnia osobom ewakuującym się dostęp do przestrzeni niezadymionej. Może jednak wpływać na przepływ usuwanego dymu, zarówno w sposób pozytywny, jak i negatywny. Główne drogi dostarczenia powietrza kompensacyjnego stanowią:

- portale tuneli,
- punkty nawiewu powietrza w tunelach (punkty wyciągowe w trybie rewersu),
- punkty nawiewu powietrza na stacjach (punkty wyciągowe w trybie rewersu),
- wejścia do stacji.

Lokalizacja punktów nawiewu kompensacyjnego nie jest jedyną determinantą sposobu napowietrzania systemu metra – rozwiązania będą różniły się dla stacji znajdujących się na różnych głębokościach, czy w odległych od siebie częściach metra. Sposób napowietrzania powinien być zawsze wynikiem analiz inżynierskich – co najmniej z wykorzystaniem jednowymiarowego modelu przepływu (1-D). Autorzy artykułu, w swojej codziennej pracy wykorzystują do tego celu kompletne trójwymiarowe (3-D) modele sieci metra wraz z ich najbliższym otoczeniem, rozwiązywane z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) [25–26].

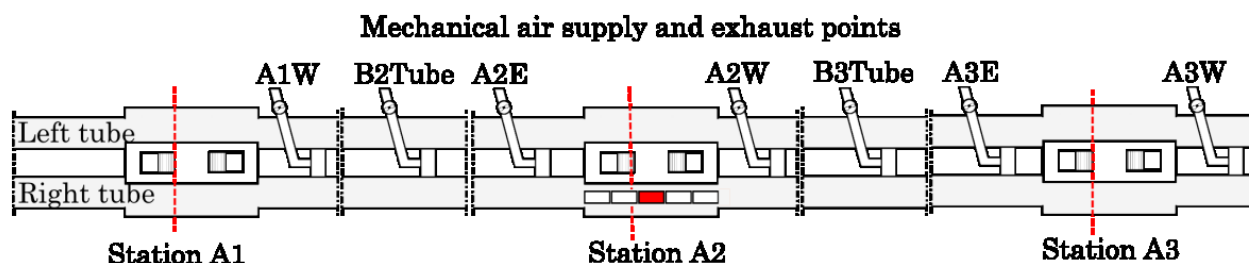
Ilość powietrza dostarczana do systemu może być kontrolowana poprzez regulację mechanicznych punktów nawiewu kompensacyjnego. Punkty grawitacyjne (np. wejścia) będą działały jako wolny wypływ z systemu, uzupełniając różnicę powstałą pomiędzy ilością powietrza usuwanego i nawiewanego mechanicznie. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że w przypadku stacji metra znajdującej się na głębokości kilkudziesięciu metrów, doprowadzenie powietrza w sposób grawitacyjny może być problematyczne. Należy mieć na uwadze także naturalne ruchy powietrza w tunelu, które mogą silnie oddziaływać na bilans powietrza kompensacyjnego. W takim wypadku właściwe jest wykorzystanie większej liczby punktów nawiewu/wyciągu, także zlokalizowanych w odległych stacjach – tylko w celu kontroli przepływu powietrza w całym systemie. W niektórych przypadkach ten sam efekt można osiągnąć wykorzystując kurtyny powietrzne [27].

4. Badania numeryczne nad napowietrzaniem w systemach wzdłużnych

Aby zilustrować skuteczność działania systemu wentylacji wzdłużnej stacji metra przeprowadzono serię obliczeń numerycznych dla scenariusza pożaru pociągu zatrzymanego na stacji metra. Różnice pomiędzy scenariuszami badawczymi polegały na zróżnicowaniu lokalizacji punktów wyciągu dymu oraz zróżnicowaniu sposobu doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do obszaru stacji, przy zachowaniu niezmiennego wydatku objętościowego systemu usuwania dymu ze stacji. Sposób doprowadzenia powietrza oraz lokalizację punktów wyciągu i nawiewu kompensacyjnego dla poszczególnych scenariuszy przedstawiono w tabeli 1. Oznaczenia wykorzystane w dalszej części publikacji przedstawiono na ryc. 4. Fragment modelu numerycznego wykorzystanego w pracy zaprezentowano na ryc. 5.

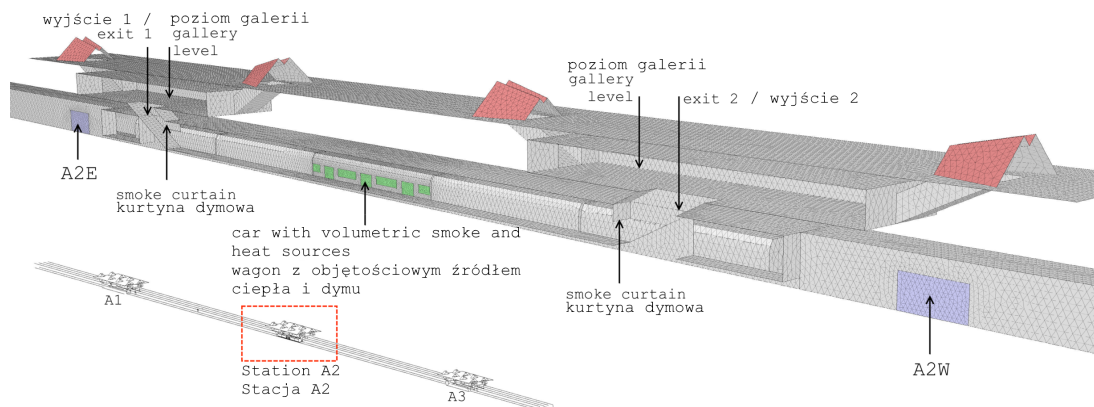
W badaniach nie uwzględniono wpływu wiatru, co jest uproszczeniem prowadzonych rozważań. Oddziaływanie wiatru, w szczególności w obszarze portali tuneli, może mieć wpływ na przepływ dymu wewnątrz tunelu. W przypadku systemów metra zlokalizowanych na dużej głębokości z wieloma miejscami połączenia z zewnątrz (wyjścia, portale) oddziaływanie to ma mniejszy wpływ na działanie systemu, niż w przypadku np. tuneli drogowych. Wniosek ten autorzy opierają na obserwacjach, które poczyniono w trakcie prowadzonych prób z gorącym dymem w istniejącym systemie metra. Próby prowadzono przez okres 7 miesięcy, w zróżnicowanych warunkach pogodowych. Oddziaływanie wiatru wpływające na skuteczność działania systemów obserwowano wyłącznie na poziomach galerii handlowych. W obszarze samych stacji oddziaływanie wiatru nie było odczuwalne, co można przypisać działaniu poziomu galerii jako „wiatrołapu”. Należy zauważyć, że badany tunel z obydwu stron zakończono zamkniętymi komorami, a nie portalami łączącymi ten obszar z powierzchnią. W systemach położonych na niewielkiej głębokości lub częściowo otwartych niekorzystne oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelu można ograniczyć poprzez właściwy bilans powietrza dostarczanego w sposób mechaniczny i grawitacyjny oraz poprzez uruchomienie systemu wentylacji pożarowej w odległych miejscach sieci (np. na sąsiednich stacjach). Uwzględnieniu wpływu wiatru w analizach numerycznych systemów wentylacji pożarowej poświęcono publikację [28].

Pożar zlokalizowano w centralnej części stacji A2, którą podzielono na dwie symetryczne strefy dymowe. Każdy scenariusz działania systemu weryfikowano dla trzech różnych



Ryc. 4. Uproszczony schemat modelu numerycznego wykorzystanego w analizie
Fig. 4. Simplified outline of numerical model used during research

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Fragment modelu numerycznego wykorzystanego w analizie (obszar stacji)

Fig. 5. Part of numerical model used in the analysis (station)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 1. Matryca scenariuszy badań numerycznych

Table 1. Scenario matrix for the analysis

Scenariusz Scenario	Wyciąg Exhaust	Nawiew Supply	Komentarz Comment
1	A2W	B2T	50% nawiewu przez wejście stacji A2
2	A2W + B3T	B2T	50% of supply through station A2 entrance
3	B3T	B2T	50% of supply through station A2 entrance
4	A2W	B2T	50% nawiewu przez wejście stacji A2
5	B3T	A2E + B2T	50% of supply through station A2 entrance
6	A2W (L)	A2E + B2T	10% nawiewu przez wejście stacji A2
7	B3T (L)	A2E + B2T	10% of supply through station A2 entrance

mocy pożaru 5 MW, 15 MW oraz 25 MW. Oceny dokonywano po 5 minutach od momentu osiągnięcia przez pożar zakładanej mocy całkowitej, przy założeniu, że warunki przepływu powietrza w stacji po tym czasie są ustalone, a zatem będą niezmiennie bez względu na moment podjęcia działań gaśniczych przez ekipy ratownicze. Z uwagi na sposób uruchamiania systemu wentylacji opisany w rozdziale 2, nie oceniano warunków ewakuacji – ponieważ system uruchamiany jest z opóźnieniem, nie wpływa on bezpośrednio na te warunki. Oceniano jednak możliwość zadymienia odległych przestrzeni (np. galerii stacji), których użytkownicy mogą zostać zaskoczeni przez gwałtowne zadymienie.

Całkowitą wydajność systemu wentylacji pożarowej dla badanej stacji metra przyjęto jako 300 m³/s, opierając się na wcześniejszych komercyjnych analizach prowadzonych przez autorów. Wydajność ta jest wystarczająca do uzyskania warunków środowiska wymaganych przez rozporządzenie [1], co udowodniono prowadzonymi obliczeniami numerycznymi, opisanymi w rozdziale 5. Jednocześnie przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, iż nawet przy tak dużej wydajności dla błędnie zaprojektowanego doprowadzenia powietrza kompensacyjnego system wentylacji jest nieskuteczny. Określenie wpływu wydajności wyciągu dymu na skuteczność działania systemu wentylacji, czy przeprowadzenie optymalizacji tego wyciągu nie było przedmiotem tej pracy – praktyczne informacje związane z prawidłowym określaniem wydajności dla systemów wentylacji wzdłużnej w obiektach infrastruktury kolejowej można odnaleźć m.in. w publikacjach [8], [10-11].

Wszystkie analizy prowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent [29] dla warunków zmiennych w czasie. Wykorzystany model numeryczny został opisany przez autorów we wcześniejszej publikacji dotyczącej wykorzystania zaawansowanych narzędzi inżynierskich w ocenie skuteczności działania wentylacji pożarowej garaży [30]. W opisanych w niniejszej pracy analizach autorzy korzystają z układu równań różniczkowych zachowania masy, energii, pędu (układ równań Naviera-Stokesa) oraz modelu transportu składników mieszaniny, które opisano w szczegółach w [31-32]. W celu rozwiązania przepływu turbulentnego wynożono model RANS (Reynolds Avaraged Navier-Stokes) k-ε, w tzw. wariacie standard wraz z wykorzystaniem sub-modelu „enhanced wall treatment” wpływającego na rozwiązanie przepływu powietrza w pobliżu ścian modelu. Do opisu promieniowania cieplnego emitowanego przez pożar oraz warstwę dymu wykorzystano model promieniowania P1. Ściany stacji modelowano jako wykonane z żelbetu, podczas gdy ściany pociągu jako wykonane z izolowanej blachy stalowej.

Dyskretyzacji przestrzeni dokonano za pomocą niestrukturalnej, tetrahedralnej siatki numerycznej. Wymiar boku elementu kontrolnego wynosił do 15 cm w wagonie objętym pożarem, do 50 cm w obszarze oddymianej stacji oraz do 100 cm w pozostałym obszarze domeny obliczeniowej. Wykorzystany w analizie model CFD jest powszechnie używany w obszarze analiz związanych z bezpieczeństwem pożarowym i stanowi podstawowe narzędzie w procesie projektowania

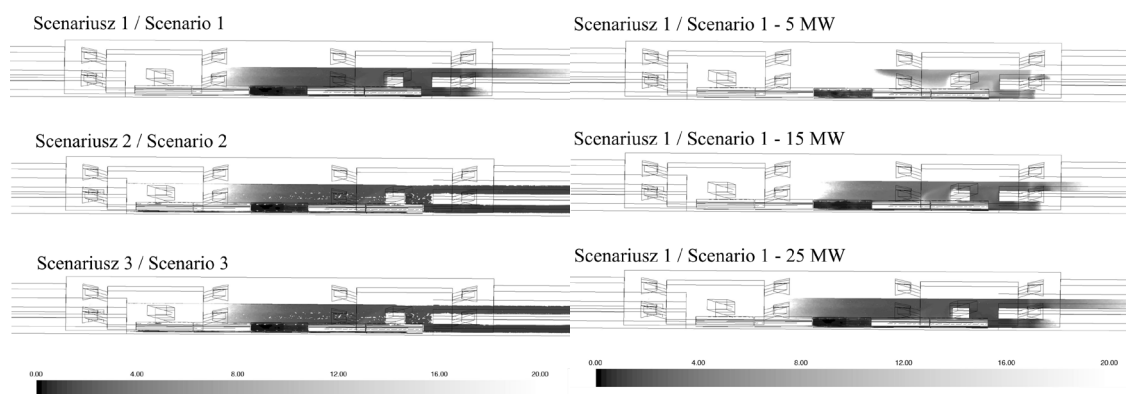
systemów wentylacji pożarowej obiektów podziemnych. Próbę walidacji narzędzia z wykorzystaniem modelu w skali oraz podobieństwa liczby Froude'a autorzy przedstawili w publikacji [33], innymi źródłami opisującymi przydatność analiz CFD w ocenie przepływu dymu są m.in.: [10], [21], [34-35].

5. Wyniki badań numerycznych

Przeprowadzono 21 analiz numerycznych dla 7 różnych scenariuszy doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do obszaru oddymianej stacji metra (zob. tabela 1). Wyniki prowadzonych badań oceniano z uwagi na przewidywany zasięg widzialności znaków w dymie (z powodu ograniczenia w objętości pracy nie opisano wyników oceny względem pozostałych wartości krytycznych zawartych w rozporządzeniu [1]). Zasięg widzialności w dymie jest uznawany za najważniejsze z kryteriów oceny systemów wentylacji pożarowej [36]. Wyniki symulacji wskazują, że w obszarze bez dymu temperatura powietrza była zbliżona do temperatury otoczenia. Na potrzeby niniejszej pracy, za uzasadnione uproszczenie można przyjąć, że kryteria oceny związane z prowadzeniem działań ratowniczo-gaśniczych (temperatura powietrza poniżej 60°C na wysokości 1,80 m, temperatura dymu na wysokości ponad 2,50 m poniżej 200°C oraz gęstość strumienia promieniowania poniżej 2,50 kW/m²) są spełnione, w obszarze w którym spełnione jest kryterium widzialności w dymie.

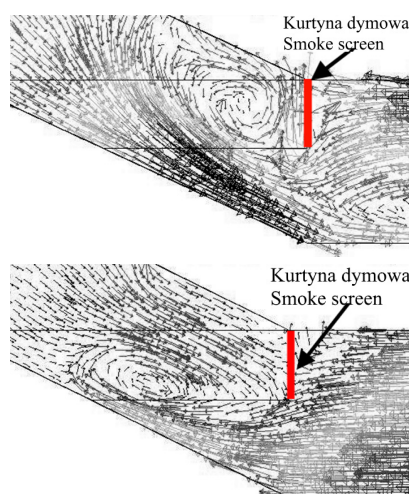
Dla pierwszych trzech scenariuszy weryfikowano wpływ zmiany lokalizacji punktu wyciągu na skuteczność działania systemu wentylacji pożarowej. Oceniano także możliwość wykorzystania dwóch mniejszych punktów zamiast pojedynczego o dużej wydajności. Wraz ze zmianą lokalizacji punktu usuwającego dym nie zaobserwowano zmiany w jakości warunków środowiska na samej stacji, przy czym przepływy w przyległych tunelach oraz galerii stacji różniły się w każdym scenariuszu (ryc. 6). W przypadku scenariuszy wykorzystujących punkty wyciągowe w samym tunelu dym nie przemieścił się poza lokalizację punktu wyciągowego, przy czym w scenariuszu 1 przy mocy pożaru 25 MW zaobserwowano niewielki ruch dymu w kierunku jednego z tuneli. We wszystkich trzech scenariuszach dym nie dotarł do galerii – zatrzymał się na kurtynie dymowej i był odpychany od drogi ewakuacji strumieniem napływającego powietrza kompensacyjnego (ryc. 7). W analogicznym scenariuszu 4, w którym około 90% usuwanego powietrza dostarczano w sposób mechaniczny, dym przeniknął do galerii stacji po około 5 minutach analizy, co przedstawiono na ryc. 8. Taki przepływ dymu może stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia pasażerów, gdyż mogą oni nie spodziewać się gwałtownego napływu dymu ze źródła pożaru, którego nie widzą lub którego nie są świadomi.

W scenariuszu nr 5 oceniano możliwe skutki wykrycia pożaru w błędnej strefie detekcji. W przypadku systemów po-



Ryc. 6. Porównanie zasięgu widzialności (0 – 20 m i więcej) na wysokości 2,00 m powyżej poziomu peronu
Fig. 6. Visibility range comparison (0 – 20 m, and more) at a height of 2,00 m above the platform

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 7. Wpływ obecności kurtyny dymowej na przepływ dymu przez schody stacji dla 5 MW i 25 MW
Fig. 7. The influence of a smoke screen on the flow of air along a station staircase at 5 MW and 25 MW

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 8. Wpływ dymu na galerię stacji w scenariuszu 4 (25 MW)
Fig. 8. Smoke penetration across the station passageways in scenario 4 at 25 MW
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

przeczynnych, dla których nie zrealizowano fizycznego oddzielenia stref detekcji (np. kurtynami dymowymi), oczekuje się, że system z równą skutecznością poradzi sobie z zagrożeniem pożarowym, nawet w przypadku błędnego wykrycia pożaru. Cel w obszarze peronu został osiągnięty (ryc. 9), przy czym podobnie jak w scenariuszu 4, doszło do zadymienia galerii stacji, przy mocy pożaru 25 MW. W tym wypadku akceptacja takiego stanu jest możliwa, jednak musi być wynikiem analizy ryzyka i prawdopodobieństwa błędnego wykrycia pożaru.

W przypadku scenariuszy, w których wykorzystywano pojedynczy punkt wyciągowy w jednym z tuneli, oczekiwano zadymienia jedynie ¼ obszaru stacji, lecz efekt ten udało się osiągnąć wyłącznie dla mocy pożaru 5,00 MW, ryc. 10. W przypadku pożarów o większej mocy efekt tracił na sile, a zadymieniu ulegała coraz większa część stacji. Pozytywny efekt podziału stacji na 4 części obserwowano w trakcie prób z gorącym dymem – jednak należy mieć na uwadze, że takie próby prowadzi się ze źródłem o mocy nieprzekraczającej 2,00 MW.

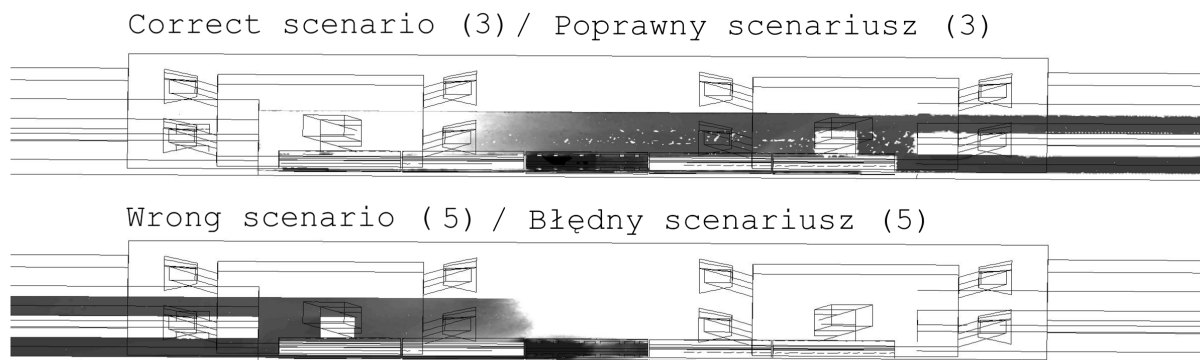
W symulacjach oraz w trakcie prób rzeczywistych zaobserwowano także przepływ dymu w kierunku sąsiedniej stacji. W trakcie symulacji po 20 minutach dym znajdował się w około 70% długości jednego z tuneli (ryc. 11), podczas gdy w badaniach rzeczywistych dym osiągał sąsiednią stację po upływie około 15-25 minut.

6. Wnioski

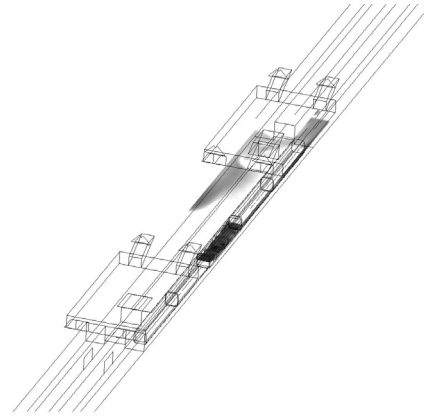
Systemy wzdłużne mogą być skutecznym rozwiązaniem wentylacji pożarowej stacji metra. Dobry projekt wymaga szerokiej, wielopłaszczyznowej analizy parametrów, takich jak lokalizacja punktu nawiewu powietrza, bilans powietrza oraz lokalizacja przegród dla przepływu dymu. Nawet w przypadku pożaru o mocy 25 MW, system wzdłużny był w stanie zapewnić bezpieczną drogę dojścia dla ekip ratowniczo-gaśniczych, co było możliwe dzięki dostarczaniu powietrza przez galerię stacji. Uzyskane wyniki analiz numerycznych potwierdzają obserwacje autorów publikacji z prób z gorącym dymem w istniejącym systemie metra.

Przeprowadzone badania potwierdziły także, że analiza wyłącznie dla zimnych przepływów nie jest wystarczająca do oceny działania systemu – bilans powietrza oraz kierunki przepływów zmieniały się wraz z rosnącą mocą pożaru, co uwidoczniło w porównaniu wyników analiz numerycznych dla różnych mocy pożaru.

Do wykonania skutecznego systemu wentylacji wzdłużnej metra, konfiguracji tuneli oraz stacji zbliżonych do przedstawionych w niniejszej pracy, za wystarczające można uznać wykorzystanie trzech punktów wyciągu dla każdej stacji (po jednym w każdym przyległym tunelu oraz na co najmniej jednej głowicy stacji – ryc. 12. Wprowadzenie dodatkowego czwartego punktu (punkty wyciągowe na obydwu krańcach

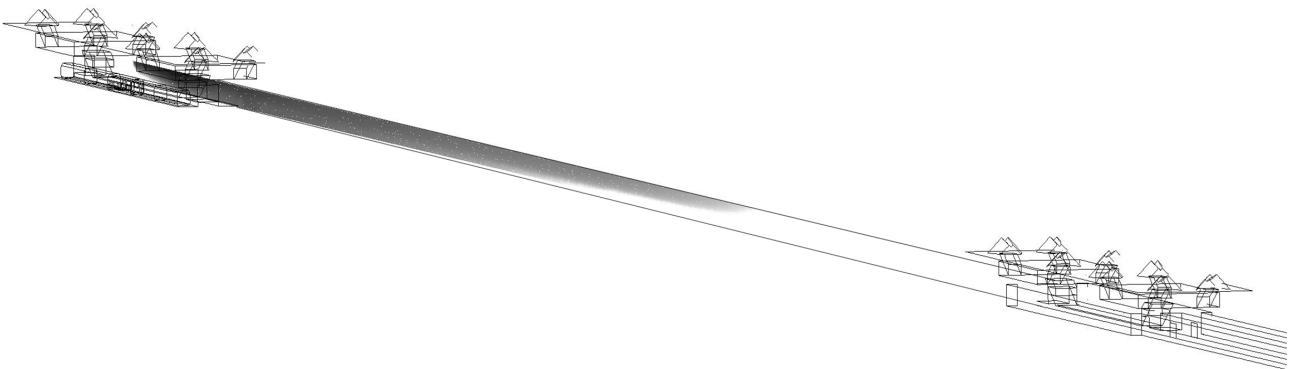


Ryc. 9. Efekt działania systemu dla błędnego scenariusza detekcji
Fig. 9. Consequence of system operation in an incorrect scenario mode
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



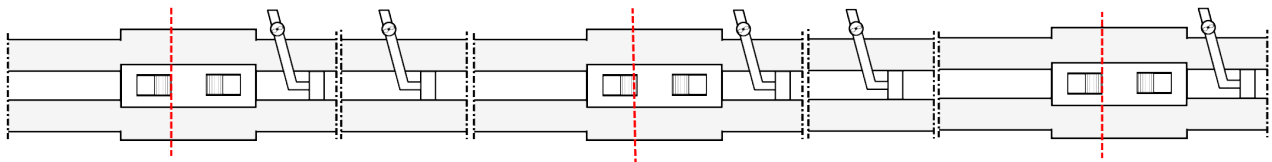
Ryc. 10. Zadymienie ¼ obszaru stacji obserwowane w przypadku prób z gorącym dymem oraz w analizie numerycznej dla małej mocy pożaru
Fig. 10. 25% of station area filled with smoke, observed during hot smoke tests and numerical analysis of small fire intensity

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 11. Dym przemieszczający się w kierunku sąsiedniej stacji, 20 minuta analizy
Fig. 11. Movement of smoke in the direction of a neighboring station – 20th minute of analysis

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Ryc. 12. Konfiguracja szachtów wyciągowych wystarczająca do realizacji systemu wzdłużnego
Fig. 12. Shaft configuration providing sufficient exit points for longitudinal ventilation

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

stacji) nie wpływa w sposób istotny na skuteczność działania systemu, co przedstawiono w scenariuszach 1-3.

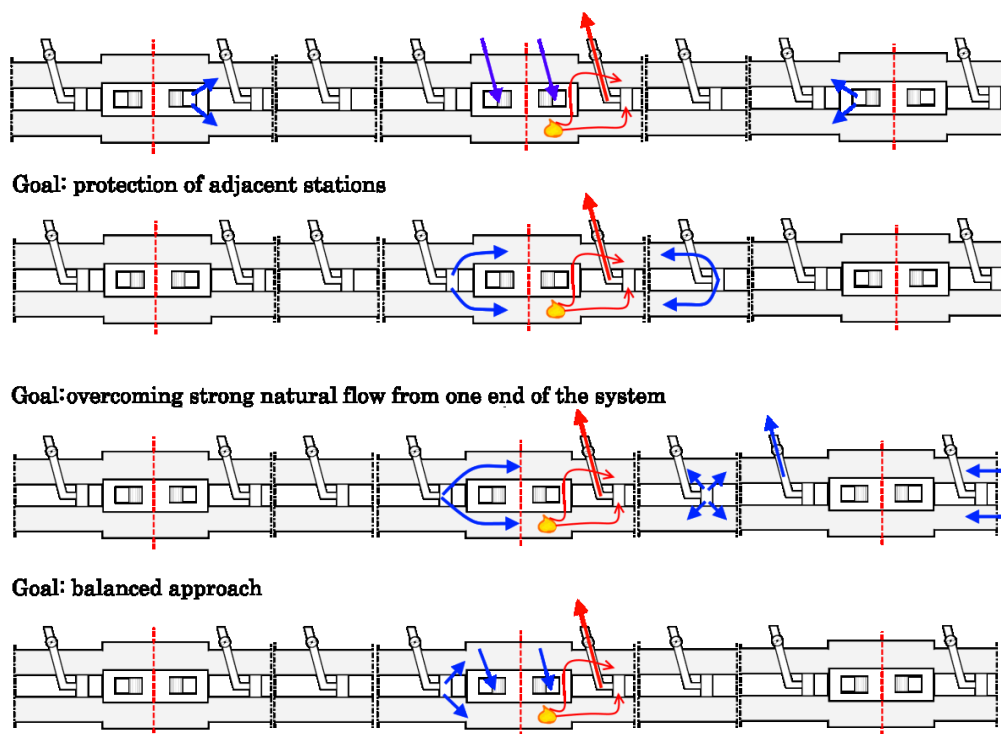
Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych oraz obserwacji w czasie odbiorów technicznych linii metra autorzy wskazują trzy sposoby kompensacji powietrza dla systemów wentylacji wzdłużnej stacji metra, zależne od oczekiwanego celu projektowego, co zilustrowano także na ryc. 13.

1. Cel: ochrona dróg ewakuacji stacji – najskuteczniejszy był system kompensacji około 50% powietrza w sposób mechaniczny i doprowadzenie powietrza przede wszystkim drogami ewakuacji stacji (analizowany scenariusz 4). Z obserwacji praktycznych w czasie odbiorów linii metra wynika, iż wskazane jest doprowadzenie powietrza poprzez systemy wentylacji na stacjach sąsiednich, do stacji oddymianej.
2. Cel: ochrona sąsiednich stacji / tuneli – napowietrzanie stacji i usuwanie dymu poprzez najbliższe punkty nawiewu mechanicznego powodowało zatrzymanie dymu,

który nie przedostawał się do sąsiednich stacji;

3. Cel: poprawne działanie systemu przy silnym przepływie wzdłużnym powietrza w systemie (np. przy dużej różnicy wysokości) – uruchomienie systemu wentylacji pożarowej w odległych częściach systemu (np. na sąsiednich stacjach) powoduje zatrzymanie przepływu powietrza wzdłuż tunelu metra, co pozwala na skuteczną pracę systemu w obrębie stacji objętej pożarem;

W przypadku braku możliwości jednoczesnego sterowania systemami wentylacji pożarowej wielu stacji, za zbilansowane podejście, wykorzystujące systemy wyłącznie jednej ze stacji metra, można uznać połączone napowietrzanie mechaniczne z punktu nawiewnego w tunelu wraz z doprowadzeniem części powietrza w sposób naturalny przez galerię tej stacji. Doprowadzenie powietrza w ten sposób powinno pozwolić na jednoczesne zabezpieczenie dróg ewakuacji stacji, jak i uzyskanie warunków środowiska umożliwiających podjęcie działań ratowniczo-gaśniczych. Dym może przedostać



Ryc. 13. Rekomendowane strategie napowietrzania stacji
Fig. 13. Recommended air supply strategies for the station

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

się do sąsiedniej stacji, lecz czas po jakim to nastąpi wynosi kilkanaście do kilkudziesięciu minut.

Przedstawione wyniki badań mogą znaleźć wykorzystanie praktyczne w systemach metra zbliżonych do analizowanego przykładu – stacje podziemne z pojedynczym peronem, połączone tunelami, z wyjściem na zewnątrz prowadzącym przez pośredni poziom galerii. W przypadku stacji o innej architekturze (np. o suficie na wysokości powyżej 6 m), wielu peronach czy stacjach o bezpośrednim wyjściu na zewnątrz, wykorzystanie wniosków zawartych w pracy wymaga indywidualnej analizy. Na szczególną uwagę zasługują stacje, na których krzyżują się różne linie metra – przepływy powodowane ruchem pociągów w wyniku powstającego efektu tłoka mogą zakłócać przepływ powietrza w sąsiedniej linii – podobne zjawisko obserwowano w miejscu połączenia dwóch linii Metra Warszawskiego.

Podziękowania

Autorzy dziękują Organizatorom oraz Radzie Naukowej cyklicznej konferencji „Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej” za stworzenie unikalnej w skali kraju, niezwykle cennej, platformy wymiany wiedzy związanej z bezpieczeństwem pożarowym obiektów podziemnych.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie (Dz. U. 2011 Nr 144, poz. 859).
- [2] Węgrzyński W., Krajewski G., *Strategia kompensacji systemów wentylacji wzdłużnej stacji metra*, [w:] *Budownictwo podziemne i bezpieczeństwo w komunikacji drogowej i infrastrukturze miejskiej*, Kraków 2016.
- [3] Mizieliński B., Kubicki G., *Wentylacja pożarowa Oddymianie*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.
- [4] Brzezińska D., *Wentylacja pożarowa obiektów budowlanych*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2015.
- [5] Milke J.A., *Smoke Control by Mechanical Exhaust or Natural Venting*, [in:] *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer New York, New York 2016, 1824–1862.
- [6] Klote J.H., *Smoke Control*, [in:] *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer New York, New York 2016, 1785–1823.
- [7] Klote J.H., Milke J.A., *Principles of Smoke Management*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta 2002.
- [8] Sztarbała G., *Projektowanie systemów wentylacji pożarowej sieci metra*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2014.
- [9] Ingason H., Li Y.Z., Lönnemark A., *Tunnel Fire Dynamics*, Springer, New York 2015.
- [10] Beard A., Carvel R., *The handbook of tunnel fire safety*, Thomas Telford Publishing, London 2005.
- [11] NFPA, *NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2017.
- [12] Węgrzyński W., Krajewski G., *Wentylacja pożarowa tuneli drogowych*, „Materiały Budowlane” 2015, 2, 14-16.
- [13] Meng N., Hu L., Wu L., Yang L., Zhu S., Chen L., Tang W., *Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station*, “Tunn. Undergr. Sp. Technol” 2014, 40, 151-159.
- [14] Harish R., Venkatasubbaiah K., *Effects of buoyancy induced roof ventilation systems for smoke removal in tunnel fires*, “Tunn. Undergr. Sp. Technol.” 2014, 42, 195-205.
- [15] Colella F., Rein G., Carvel R., Reszka P., Torero J.L., *Analysis of the ventilation systems in the Dartford tunnels using a multi-scale modelling approach*, “Tunn. Undergr. Sp. Technol.” 2010, 25, 423-432.
- [16] Krajewski G., Węgrzyński W., *Porównanie wybranych metod doboru systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych*, „Materiały Budowlane” 2014, 10, 155-157.

- [17] Węgrzyński W., Krajewski G., *Systemy wentylacji pożarowej garaży. Projektowanie, ocena, odbiór*, 493/2015 ed., Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2015.
- [18] Krajewski G., Węgrzyński W., *Projektowanie wentylacji pożarowej garaży*, „Materiały Budowlane” 2015, 7, 56-58.
- [19] Węgrzyński W., Krajewski G., *Dobór modeli oraz warunków brzegowych a wynik analizy numerycznej rozprzestrzeniania się dymu i ciepła*, „Materiały Budowlane” 2014, 10, 144-146.
- [20] Ingason H., Kumm M., Nilsson D., Lönnemark A., Li Y.Z., Fridolf K., Åkerstedt K., Nyman H, Dittmer T, Forsen R., Janzon B., Meyer G., Bryntse A., Carlberg T., Newlove-Eriksson L., Palm A., *The METRO project - Final report*, [in:] SiST 20128, Västerås: School of Sustainable Development of Society and Technology, Mälardalen University, 2012.
- [21] Li Y.Z., Fan C.G., Ingason H., Lönnemark A., Ji J., *Effect of cross section and ventilation on heat release rates in tunnel fires*, “Tunnelling and Underground Space Technology” 2016, 51, 414-423.
- [22] Carvel R., Ingason H., *Fires in Vehicle Tunnels*, in: *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer New York, New York 2016, 3303-3325.
- [23] Chojnacki K., Fabryczewska A., *Bezpieczeństwo pożarowe w tunelach*, „Górnictwo i Geoinżynieria” 2005, 29, 145-156.
- [24] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 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.).
- [25] Węgrzyński W., Krajewski G., *Doświadczenia z wykorzystania narzędzi inżynierskich do oceny skuteczności funkcjonowania systemów wentylacji oddymiającej*, „Materiały Budowlane” 2014, 7, 26-29.
- [26] Krajewski G., Sulik P., Węgrzyński W., *Metody numeryczne w projektowaniu systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych*, „Logistyka” 2014, 6.
- [27] Krajewski G., Węgrzyński W., *Air curtain as a barrier for smoke in case of fire: Numerical modelling*, “Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.” 2015, 63, 145-153.
- [28] Węgrzyński W., Krajewski G., *Combined Wind Engineering, Smoke Flow and Evacuation Analysis for a Design of a Natural Smoke and Heat Ventilation System*, “Procedia Eng” 2016.
- [29] ANSYS, ANSYS Fluent 14.5.0 - Technical Documentation, 2014.
- [30] Krajewski G., Węgrzyński W., *The use of Fire safety Engineering in the design and commissioning of car Park Fire ventilation systems*, BiTP Vol. 36 Issue 4, 2014, pp. 141-156.
- [31] Sztarbała G., *Computational fluid dynamics as a tool of fire engineers – good practice*, [in:] *Proc. EuroFire 2011 5th Eur. Conf. Fire Saf. Eng. Trends Pract. Appl.* 1, 2011.
- [32] McGrattan K., McDermott R., Floyd J., Hostikka S., Forney G., Baum H., *Computational fluid dynamics modelling of fire*, “Int. J. Comput. Fluid Dyn.” 2012, 26349–361.
- [33] Węgrzyński W., Krajewski G., *Wykorzystanie badań w skali modelowej do weryfikacji obliczeń CFD wentylacji pożarowej w tunelach komunikacyjnych*, „Bud. Górnicze i Tunelowe” 2014, 1–7.
- [34] Li Y.Z., Ingason H., *Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler*, “Fire Saf. J.” 2013, 61, 298–313.
- [35] Giesen B.J.M. v.d., Penders S.H.A., Loomans M.G.L.C., Rutten P.G.S., Hensen J.L.M., *Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures*, “Environ. Model. Softw.” 2011, 26, 191–200.
- [36] Levy C., *Assessing Variability in Engineer Selection of Tenability Criteria*, [in:] *SFPE Eur. Conf. Fire Saf. Eng.*, SFPE, 2015.

* * *

mgr inż. Wojciech Węgrzyński – absolwent Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarnej, doktorant w Instytucie Techniki Budowlanej. Od 2010 roku zatrudniony w Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej. Obecnie pełni funkcję Kierownika Pracowni Kontroli Dymu, Sygnalizacji i Automatyki Pożarowej. Obszarem zainteresowań naukowych autora są zjawiska związane z przepływem dymu i wentylacją pożarową, rozwojem pożaru oraz narzędzia inżynierskie wykorzystywane w ich analizie. Współautor Instrukcji ITB nr 493/2015, dotyczącej systemów wentylacji pożarowej garaży podziemnych.

mgr inż. Grzegorz Krajewski – pracownik Zakładu Badań Ogniwych Instytutu Techniki budowlanej od 2007 r. Ukończył wydział Inżynierii Środowiska na Politechnice Warszawskiej. Specjalizuje się w zakresie analiz numerycznych z wykorzystaniem metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) w szczególności w obszarze rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz oddziaływania warunków środowiska zewnętrznego na obiekty budowlane (przepływy wewnętrzne, aerodynamika obiektów budowlanych). Współautor opracowań z projektów badawczo-rozwojowych oraz szeregu artykułów i publikacji naukowo technicznych na konferencjach krajowych i zagranicznych o tematyce związanej z bezpieczeństwem pożarowym, inżynierią wiatrową oraz analizami numerycznymi. Współautor Instrukcji ITB nr 493/2015, dotyczącej systemów wentylacji pożarowej garaży podziemnych.