

mgr inż. Wojciech Węgrzyński<sup>1\*)</sup>  
mgr inż. Grzegorz Krajewski<sup>1)</sup>

# Wentylacja pożarowa tuneli drogowych

*Smoke and heat ventilation of road tunnels*

DOI: 10.15199/33.2015.02.03

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono proces projektowania wentylacji pożarowej tuneli drogowych. Poruszono wszystkie aspekty projektu instalacji, począwszy od analizy ryzyka pożaru w tunelu, przez dobór i wymiarowanie systemu, jego ocenę oraz odbiór. W przypadku każdego z etapów przedstawiono wymagania ogólne wraz z odniesieniami do źródeł wiedzy zawierającymi szczegółowe informacje. Dużą wagę położono na metody badawcze elementów systemu – wentylatorów oddymiających oraz klap odcinających w systemach wentylacji pożarowej.

**Słowa kluczowe:** wentylacja pożarowa, wentylacja tuneli, tunele, analizy CFD.

**Abstract.** The article presents the design process of tunnel fire ventilation of road tunnels. In the work authors describe all of the aspects of the design process, such as the choice of the system, risk analysis, choice and dimensioning of the system, its functional assessment and commissioning. For all of the aspects, authors give general guidelines followed by references to detailed requirements. One of the focal points of the work is put on the components of the system – such as powered smoke exhaust ventilators and fire dampers.

**Keywords:** smoke and heat exhaust system, tunnel ventilation, tunnel, CFD analysis.

**B**ezpieczeństwo pożarowe obiektu budowlanego, takiego jak drogowy tunel komunikacyjny, jest sumą wielu składowych, z których jedną jest działanie systemu wentylacji pożarowej. W odróżnieniu od budynków wolno stojących, w tunelach występuje mniej dróg ewakuacji, a jednocześnie znacznie większe ryzyko pożaru, który rozwija się szybciej i osiąga znacznie wyższą moc. Projektowanie systemów wentylacji pożarowej tuneli jest procesem zdecydowanie bardziej skomplikowanym niż projektowanie analogicznych systemów w budynkach. Już pierwsza decyzja projektanta, polegająca na doborze systemu, jest trudna i składa się na nią wiele czynników, z analizą ryzyka pożaru włącznie [1]. Podobnie każdy kolejny etap projektu – wymiarowanie systemu, dobór urządzeń, weryfikacja i odbiór cechuje duża złożoność.

## Systemy wentylacji pożarowej tuneli

Systemy wentylacji tuneli drogowych zazwyczaj służą weryfikacji bytowej i pożarowej. **Wentylacja bytowa** (nazywana również codzienną) zapewnia odpowiednią jakość powietrza wewnątrz tunelu zanieczyszczonego spalinami samochodowymi. W żadnej sytuacji związanej z ruchem pojazdów wa-

runki środowiska w tunelu nie powinny stanowić zagrożenia dla jego użytkowników oraz obsługi. Przezierność powietrza w tunelu również musi być na tyle wysoka, aby możliwe było bezpieczne zatrzymanie pojazdów.

**Wentylacja pożarowa**, czyli wentylacja na wypadek pożaru lub zadymienia powinna zapewnić w tunelu warunki wystarczające do ewakuacji użytkowników oraz zminimalizować zniszczenia spowodowane pożarem (dla ludzi, pojazdów i samego tunelu). Równie istotnym celem działania systemu wentylacji pożarowej jest bezpieczeństwo ekip ratowniczych. Najważniejsze grupy systemów wentylacji pożarowej, to [2, 3]: naturalna; wzdłużna; półpoprzeczna oraz poprzeczna. Czynnością poprzedzającą dobór systemu wentylacji pożarowej jest analiza ryzyka pożaru w tunelu. Przykładową metodę takiej analizy przedstawiono w opracowaniu [1].

**Wentylacja naturalna** to rodzaj systemu, w którym dym usuwany jest z tunelu wyłącznie przez działanie naturalnych sił wyporu powstałych pomiędzy gorącą warstwą dymu a otaczającym powietrzem, czasem w niewielkim stopniu wspomaganym przez ruch powietrza wywołany ruchem pojazdów. Z analizy literatury naukowej oraz przeprowadzonych badań własnych wynika, że w odległości ponad 100 – 200 m od źródła pożaru dym wychładza się w takim stopniu, że opada do strefy, w której mogą przebywać ludzie. Ponadto najnowsze badania pokazują, że

w określonych przypadkach niekorzystnego oddziaływania wiatru usunięcie dymu z tunelu w sposób naturalny może być niemożliwe [4, 5].

**Wentylacja wzdłużna** to rodzaj systemu wykorzystującego wentylatory strumieniowe rozmieszczone pod stropem tunelu w celu wywołania przepływu powietrza w zadanym kierunku, z prędkością, która zapobiega zjawisku cofania się dymu (tzw. prędkością krytyczną przepływu powietrza). 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. Dym usuwany jest z tunelu przez jego portale lub punkty wyciągowe zlokalizowane w ścianach lub stropie co 750 – 1500 m. Od strony nawiewu powietrza kompensacyjnego tunel jest wolny od dymu. Dzięki temu możliwa jest zarówno ewakuacja, jak i prowadzenie akcji ratowniczo-gaśniczej. W związku z tym, że dym transportowany jest całym przekrojem poprzecznym tunelu, wentylacja wzdłużna nie zapewnia warunków ewakuacji w obszarze pomiędzy źródłem pożaru a portalem, którym dym jest usuwany, dlatego też w czasie niezbędnym na ewakuację system wentylacji pożarowej powinien być wyłączony, aby umożliwić ewakuację osobom znajdujących się „za” źródłem pożaru. System wentylacji wzdłużnej nie znajduje więc zastosowania w dwukierunkowych tu-

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwych

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
w.wegrzynski@itb.pl

nelach oraz tunelach miejskich o dużym prawdopodobieństwie powstania zatorów komunikacyjnych.

**Wentylacja półpoprzeczna** to system łączący punktowy sposób wyciągu dymu przez kraty wyciągowe równomiernie rozmieszczone co 50 – 120 m ze sposobem dostarczania powietrza kompensacyjnego całym przekrojem tunelu. Działanie systemu powoduje utrzymanie się dymu na krótkim odcinku tunelu pomiędzy źródłem pożaru a aktywnym punktem wyciągowym. Podobnie jak w przypadku systemów wentylacji wzdłużnej, uruchomienie systemu powinno nastąpić po określonym czasie, umożliwiając ewakuację osobom zagrożonym w tunelu. Ze względu na krótszy odcinek, jaki ma do przebycia dym, czas ten może być krótszy niż w przypadku systemu wentylacji wzdłużnej. Z obydwu stron, tj. przed miejscem pożaru oraz za punktem wyciągu dymu, nie powinno występować zadymienie, dzięki czemu możliwa jest zarówno ewakuacja interwencyjna, jak i prowadzenie akcji ratowniczo-gaśniczej.

**Wentylacja poprzeczna** to system, w którym dym usuwany jest punktowo w określonych miejscach pod stropem kondygnacji, a powietrze kompensacyjne dostarczane równomiernie w całej długości lub na wybranym odcinku tunelu. Rozprzestrzenianie się dymu ograniczane jest do niewielkiego odcinka pomiędzy źródłem pożaru a punktem wyciągu. Dzięki równomiernemu dostarczaniu powietrza kompensacyjnego z niedużą prędkością ograniczane jest mieszanie się dymu z powietrzem. System poprzeczny zapewnia lepsze warunki środowiska w pobliżu pożaru niż systemy wzdłużne lub półpoprzeczne i jest zalecany szczególnie w tunelach dwukierunkowych, miejskich lub o dużym ryzyku powstania zatorów komunikacyjnych.

### Dobór systemu, kryteria projektowe

Szczegółowe porównanie najbardziej popularnych metod doboru systemów wentylacji pożarowej tuneli przedstawiono w publikacji [3]. Do głównych źródeł wiedzy w tym obszarze należą: austriackie wytyczne RVS 09.02.31 [6]; niemieckie wytyczne RABT [7]; szwajcarskie wytyczne ASTRA 13001 [8].

Poszczególne przepisy różnią się szczegółowymi wymaganiami stawia-

nymi systemom w różnych rodzajach tuneli, ale podstawowe wymagania są zbieżne. **Systemy wentylacji pożarowej wzdłużnej zalecane są w tunelach jednokierunkowych (o odrębnych nawach), o niewielkiej długości i małym prawdopodobieństwie zatorów komunikacyjnych. W tunelach miejskich, długich czy dwukierunkowych powinna być stosowana wentylacja poprzeczna lub półpoprzeczna.** Wynika to bezpośrednio ze sposobu działania systemów wentylacji – systemy wzdłużne zapewniają warunki ewakuacji w krótkim czasie, po którym na całej długości od miejsca pożaru do portalu wjazdowego wystąpi duże zadymienie. W inny sposób działają systemy poprzeczne i półpoprzeczne, które pozwalają ograniczyć zagrożenie do względnie krótkiego odcinka tunelu, gwarantując bezpieczeństwo użytkownikom przebywającym po obydwu stronach pożaru.

Systemy wentylacji pożarowej tuneli, w porównaniu z systemami spotykanymi w budynkach, charakteryzują się bardzo dużą wydajnością, często przekraczającą 100 – 120 m<sup>3</sup>/s. Wynika to z wysokiego ryzyka pożaru w tunelu, o mocy przekraczającej nawet 100 MW (w budynkach pożary rzadko przekraczają moc 8 MW). Przy oddziaływaniu pożaru o tak wysokiej mocy, prędkość przepływu dymu wywołana działaniem sił wyporu jest tak duża, że wymagana prędkość powietrza nawiewanego, która jest w stanie zatrzymać to rozprzestrzenianie, musi być również odpowiedniej wielkości. Wymagana prędkość przepływu powietrza wynosi 2,50– 3,00 m/s [6 – 8], w zależności od mocy i lokalizacji pożaru oraz parametrów architektonicznych tunelu. Tak wysoka prędkość, przemnożona przez pole przekroju poprzecznego tunelu daje wydajność systemu wymaganą do powstrzymania rozwoju pożaru. Prędkość krytyczna, określona na drodze analiz inżynierskich, nie jest oczywiście jedynym i ostatecznym kryterium, które służy projektantowi systemu. Weryfikacja działania systemu odbywa się najczęściej z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD). Zasady prowadzenia tego typu analiz wraz z proponowanymi kryteriami oceny przedstawiono w sposób szczegółowy w publikacji [9].

Dobry projekt nie gwarantuje skutecznego działania systemów bezpie-

czeństwa pożarowego. W czasie pożaru muszą ze sobą w pełni współpracować wszystkie systemy automatyki pożarowej sterowane z poziomu systemu sygnalizacji pożaru w tunelu. Systemy te powinny uwzględniać wszystkie możliwości opisane w scenariuszu pożarowym, np. zmianę warunków na skutek otworzenia przeciwpożarowych drzwi awaryjnych [15] itp. Współpraca ta, opisana w scenariuszu pożarowym obiektu oraz matrycy sterowań, może zostać sprawdzona podczas tzw. prób z gorącym dymem. Poza ogólną oceną systemu detekcji pożaru czy oceną poprawności sterowania automatyką pożarową, w trakcie próby z gorącym dymem [10] szczególnie wnikliwej ocenie podlegają systemy wentylacji pożarowej tunelu. Powinny być one przeprowadzone przed oddaniem tunelu do użytkowania i potwierdzać wykonanie badanych instalacji wentylacji pożarowej, sygnalizacji pożaru i innych powiązanych instalacji zgodnie z projektem oraz wymaganiami norm i dokumentów stanowiących podstawę projektu. Próby z gorącym dymem mogą mieć charakter stacjonarny lub mobilny, dzięki czemu umożliwiają także zbadanie skuteczności działania najnowocześniejszych systemów detekcji pożaru, pozwalających ustalić, czy źródło pożaru się przemieszcza.

### Wymagania dotyczące wentylatorów oraz kłap odcinających

Wentylatory strumieniowe i wyciągowe wykorzystywane w tunelach badane są wg normy zharmonizowanej PN-EN 12101-3 [11]. Klasy temperaturowe skuteczności działania wentylatora w wysokiej temperaturze, możliwe do osiągnięcia wg tej normy, dzielą się na 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C oraz 842 °C, przy czym w tunelach najczęściej spotykaną klasą jest 400 °C oraz niewymieniana w normie klasa 250 °C. Czas działania urządzeń to 60 min, 90 min lub 120 min, przy czym dokładne kombinacje klasy temperaturowej oraz czasu działania definiuje norma klasyfikacyjna PN-EN 13501-4 [12]. Badaniom poddaje się wybrane wentylatory z typoszeregu, zgodnie z zaleceniami Załącznika A do PN-EN 12101-3 [11]. Możliwość rozszerzenia typoszeregu wentylatorów badanych na inne znajdujące się w ofercie producenta

zależy od określenia podobieństwa pomiędzy wirnikami wentylatorów (geometrycznym lub statycznym), komora silnika i sposobem jego chłodzenia czy podobieństwem materiałowym. Nie zawsze możliwe jest opisanie wszystkich wentylatorów w typoszeregu jednym zestawem wspomnianych parametrów. W przypadku tuneli komunikacyjnych szczególnie istotna jest optymalizacja wybranych wentylatorów do konkretnego zabezpieczanego obiektu wybiegająca poza standardowe rozwiązania dostępne w katalogu producenta. Taka optymalizacja obejmuje [13]: średnicę wirnika i wymiar wału, na którym go osadzono; liczbę łopatek, ich materiał i szerokość; profil łopatek; dopuszczalną regulację kąta nachylenia łopatek w sposób hydrauliczny; parametry prądowe i prędkość obrotową silnika.

Szczególną rolę w produkcji wentylatorów wyciągowych odgrywa sposób chłodzenia silnika. Zastosowanie zewnętrznego źródła powietrza dostarczanego do komory silnika może w istotny sposób poprawić jego działanie w wysokiej temperaturze bez konieczności stosowania wysokotemperaturowych łożysk, smarów i izolacji obwodów elektrycznych silnika. W przypadku doboru indywidualnego rozwiązania, wykraczającego poza zakres certyfikatu CE producenta dla konkretnego układu przepływów w tunelu, niezbędne jest przeprowadzenie wszystkich badań opisanych w PN-EN 12101-3 dla tego konkretnego typu wentylatora. Wielkogabarytowe kłapy odcinające wykorzystywane w systemach wentylacji tuneli często wykraczają poza zakres normy PN-EN 1366-10 [14]. Taki stan rzeczy spowodował, że dostępne na światowym rynku wielkogabarytowe kłapy odcinające do zastosowania w tunelach, były przebadane wyłącznie jako element montowany w spodzie kanału wyciągowego, na podstawie norm opisujących procedurę badań przegród budowlanych. W 2012 r. w Zakładzie Badań Ogniwych ITB przygotowano procedurę do normy PN-EN 1366-10 pozwalającą przeprowadzić badanie kłap odcinających o dowolnej wielkości, na którą uzyskano niezbędną akredytację Polskiego Centrum Akredytacji. W ramach procedury akredytacyjnej przeprowadzono badania: pewności działania, szczelności w temperaturze otoczenia oraz odporności ogniowej

i szczelności w wysokiej temperaturze.

**Badanie pewności działania** prowadzone jest wg PN-EN 1366-10 [14] i polega na wykonaniu 10 000 cykli otwarć i zamknięć kłapy (przepustnicy). W trakcie badania weryfikowana jest niezawodność działania wszystkich elementów urządzenia. Prowadzony jest pomiar czasu oraz obserwacje, czy żaden z elementów nie ulegnie uszkodzeniu. Badanie może mieć negatywny wpływ na wyniki osiągnięte w badaniu szczelności w temperaturze otoczenia, które wykonuje się na najmniejszej i największej klapie odcinającej w deklarowanym typoszeregu.

**Badanie szczelności w temperaturze otoczenia** wykonywane jest przez wytworzenie odpowiedniej wielkości podciśnienia po jednej stronie kłapy odcinającej. W tym wariancie w przewodzie przyłączeniowym utrzymywano różnicę ciśnienia na poziomie  $1500 \pm 45$  Pa. Regulację podciśnienia prowadzono za pomocą wentylatora wyciągowego ze zmienną prędkością obrotową. Pomiar należy prowadzić przez 20 min. Kryterium szczelności jest oceniane na podstawie objętościowego przepływu powietrza w przeliczeniu na  $m^2$  powierzchni kłapy na godzinę. Badanie wykonywane jest na dwóch skrajnych klapach z typoszeregu.

**Badanie odporności ogniowej i szczelności w wysokiej temperaturze** wykonywane jest z wykorzystaniem dwóch kłap odcinających. Jedna z nich znajduje się w komorze pieca, gdzie poddana jest bezpośrednio oddziaływaniu wysokiej temperatury, a druga zamontowana jest na kanale odprowadzającym gorące gazy z pieca. Kłapy są odpowiednio w pozycji otwartej i zamkniętej. Kanał odprowadzający spaliny jest podłączony do wentylatora wywołującego podciśnienie 500 Pa. Ponadto prowadzony jest pomiar stężenia tlenu przed i za klapą odcinającą, w celu oceny jej szczelności. W tunelach drogowych zaleca się wykorzystanie kłap odcinających badanych zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1366-10.

## Podsumowanie

Na skuteczne działanie systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych składa się wiele czynników: poprawny wybór systemu i dobór jego parametrów; odpowiedni dobór urządzeń

wchodzących w skład systemu, ich weryfikacja z wykorzystaniem narzędzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego oraz profesjonalny odbiór. Systemy wentylacji pożarowej tuneli powinny podlegać szczególnemu nadzorowi na każdym etapie powstania obiektu budowlanego.

## Literatura

- [1] Węgrzyński W., Krajewski G., Ocena ryzyka pożaru w kontekście projektu systemu wentylacji pożarowej tunelu drogowego, Logistyka nr 4, 2014, str. 10979 – 10987.
- [2] Węgrzyński W., Krajewski G., Sztarbała G., Kamień Miłowy 3 – Opracowanie wytycznych i procedur projektowania systemów wentylacji pożarowej podziemnych obiektów komunikacyjnych oraz środków ewakuacji, POIG. 01.01.02-10-106/09-04, Warszawa 2012.
- [3] Krajewski G., Węgrzyński W., Porównanie wybranych metod doboru systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych, Materiały Budowlane nr 10/2014, str. 155 – 157.
- [4] Sztarbała G., Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelu w warunkach pożaru, Rozprawa Doktorska, Warszawa 2012.
- [5] Sztarbała G., Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelach drogowych wentylowanych naturalnie w warunkach pożaru, Budownictwo i Architektura nr 12/2013.
- [6] RVS 09.02.31 Tunnel Ventilation – Basic Principles, 2008.
- [7] RABT, Regulations for the equipment and operation of road tunnels, 2006.
- [8] ASTRA 13001, Ventilation des tunnel rotiers, Choix du système, dimensionnement et équipement, Edition 2008.
- [9] Krajewski G., Sulik P., Węgrzyński W., „Metody numeryczne w projektowaniu systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych”, Logistyka nr 6/2014.
- [10] Węgrzyński W., Krajewski G., „Próby z gorącym dymem jako narzędzie w procesie regulacji i odbioru systemów bezpieczeństwa pożarowego tuneli drogowych”, Logistyka nr 6/2014.
- [11] PN-EN 12101-3:2004, Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła – Część 3: Wymagania techniczne dotyczące wentylatorów oddymiających.
- [12] PN-EN 13501-4+A1:2010 Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków – Część 4: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej elementów systemów kontroli rozprzestrzeniania dymu.
- [13] Vemden F., High temperature testing and certification of fans for tunnel ventilation, Tunnel safety and ventilation, Graz 2014.
- [14] PN-EN 1366-10:2011, Badania odporności ogniowej instalacji użytkowych – Część 10: Kłapy odcinające w systemach wentylacji pożarowej.
- [15] Sulik P., Sędlak B., Izydorczyk D., Odporność ogniowa i dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych na wyjściach awaryjnych z tuneli – badania i klasyfikacja, Logistyka nr 6/2014, str. 10105 – 10113.