

# **Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelach drogowych wentylowanych naturalnie w warunkach pożaru**

**Grzegorz Sztarbala**

*Institut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwowych,  
e-mail: g.sztarbala@itb.pl*

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w odniesieniu do niezagłębionych, krótkich tuneli drogowych o przekroju prostokątnym wentylowanych naturalnie. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w sposób pozwalający na jednoczesne uwzględnienie oddziaływania wiatru i warunków pożaru. Struktura oddziaływującego na tunel wiatru została opisana profilem logarytmicznym, zaś pożar za pomocą modelu objętościowego. Rozważana w pracy prędkość wiatru zawierała się w zakresie od 2,0 m/s do 6,0 m/s, zaś przyjęte moce pożaru odnosiły się odpowiednio do pożaru jednego samochodu osobowego, jednego samochodu typu „van” oraz jednego autobusu. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zjawisko stratyfikacji dymu w tunelach wentylowanych naturalnie występuje tylko w warunkach bezwietrznych a system wentylacji naturalnie nie jest w stanie zapewnić wymaganego poziomu bezpieczeństwa pożarowego.

**Słowa kluczowe:** wentylacja naturalna tuneli, tunel drogowy, oddziaływanie wiatru, komputerowa mechanika płynów, pożar w tunelu

## **1. Wstęp**

Istotnym czynnikiem wpływającym na zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego obiektu budowlanego, jakim jest tunel, jest skuteczne odprowadzanie dymu i ciepła gwarantujące możliwość ewakuacji osób się tam znajdujących oraz prowadzenia działań ratowniczo – gaśniczych. Uzyskuje się to poprzez zapewnienie właściwego, pod względem prędkości i kierunku, przepływu powietrza w tunelu. W przypadku krótkich tuneli stosuje się wentylację naturalną, w której przepływ wywołany jest zjawiskiem konwekcji naturalnej i warunkami atmosferycznymi. Dym i ciepło usuwane są wówczas poprzez obie głowice tunelu. W odniesieniu do pozostałych tuneli stosuje się wentylację mechaniczną, w której kierunek i prędkość przepływu wymuszone są pracą urządzeń wentylacyjnych. W zależności od przyjętego rodzaju wentylacji mechanicznej dym i ciepło usuwane są poprzez jedną z głowic bądź transportowane kanałem wentylacyjnym pod stropem tunelu i usuwane na zewnątrz.

Przedstawiona problematyka oddziaływania wiatru na przepływ w tunelach wentylowanych naturalnie warunkach pożaru stanowi pierwszy etap podjętej przez autora tematyki badawczej w zakresie analiz rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w tunelach. W pracy zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem komputerowej mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics – CFD).

## **2. Przepływ mieszaniny dymu i powietrza w tunelu**

Rozprzestrzenianie się dymu i ciepła w tunelu uzależnione jest od wielu czynników, jednak największy wpływ ma prędkość przepływu powietrza – przy prędkości bliskiej bądź równej zeru gorąca mieszanina dymu i powietrza unoszona ku górze porywa chłodne powietrze z przestroni otaczającej źródło pożaru. Kształtująca się kolumna konwekcyjna, docierając w bezpośrednie sąsiedztwo stropu tunelu, dzieli się na dwa strumienie przemieszczające się w dwóch przeciwnych kierunkach wzdłuż stropu (rys.1.). Zasięg tych

strumieni uzależniony jest m.in. od mocy pożaru oraz intensywności mieszania się dymu i gorących gazów pożarów z napływającym chłodnym powietrzem. Wyraźny jest rozdział warstwy dymu od chłodnego powietrza. W procesie mieszania się strumienie podstropowe zwiększają swoją objętość przy jednocześnie zmniejszającej się różnicy temperatury. W obszarze, w którym nie występuje różnica temperatur, chłodny już dym przemieszcza się w kierunku jezdnii.



Rys.1. Przepływ mieszaniny dymu i powietrza w tunelu o prędkości przepływu powietrza bliskiej zeru

Wraz z pojawieniem się w tunelu ruchu powietrza z prędkością bliską bądź większą od 1,0 m/s osiowo-symetryczny charakter kolumny konwekcyjnej zostaje zaburzony. Część dymu przemieszcza się w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu powietrza w tunelu, zaś pozostała w kierunku przeciwnym. Ilość dymu przepływającego w kierunku przeciwnym do założonego kierunku przepływu uzależniona jest od mocy pożaru oraz prędkości przepływu powietrza w tunelu. Zjawisko cofania się warstwy dymu w odniesieniu do założonego kierunku przepływu powietrza w tunelu, w literaturze obcojęzycznej nosi nazwę *backlayering*.

Wzrost prędkości przepływu powietrza w tunelu powoduje zmniejszenie zasięgu strumienia dymu płynącego w przeciwnym kierunku aż do całkowitego wyeliminowania. Prędkość przepływu powietrza w tunelu, przy której zjawisko to nie występuje, określa się mianem prędkości krytycznej.

### 3. System wentylacji naturalnej tuneli drogowych

Przepływ powietrza oraz mieszaniny dymu i powietrza w tunelu wentylowanym naturalnie w warunkach wywołany jest warunkami atmosferycznymi oraz zjawiskiem konwekcji naturalnej spowodowanej rozwojem pożaru. Istotnym czynnikiem wpływającym na skuteczność odprowadzania mieszaniny dymu i powietrza oraz ciepła jest prędkość przepływu powietrza oraz jego intensywność turbulencji wewnątrz tunelu oraz w sąsiedztwie głowic tunelu. Duża zmienność prędkości przepływu powietrza oraz kierunku jest zjawiskiem szczególnie niepożądanym. Może ona powodować zaburzenie zakładanego rozdziału warstwy dymu od warstwy chłodnego powietrza [1], [2], [3], co w konsekwencji może powodować nieskuteczne odprowadzanie dymu i ciepła z tunelu.

Dopuszczalna długość tunelu wyposażonego w system wentylacji naturalnej jest zróżnicowana w poszczególnych krajach i wynika z obowiązujących w nich uregulowań prawnych. W Polsce, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej [4], [5], tunele jednokierunkowe, niezagłębione, o małym natężeniu ruchu, o długości do 600 m i zagłębione o długości do 400 m mogą być wentylowane naturalnie. W przypadku tuneli o dużym natężeniu ruchu, z zatorami, dopuszczalną długość tunelu z wentylacją naturalną ogranicza się do 200 m.

W Dyrektywie 2004/54/WE [6] dotyczącej tuneli w sieci transeuropejskiej nie podano informacji o dopuszczalnej długości tuneli wentylowanych naturalnie. Na podstawie wymogu stosowania wentylacji mechanicznej w odniesieniu do tuneli o długości powyżej 1000 m i natężeniu ruchu powyżej 2000 pojazdów na dzień, licząc na jeden pas ruchu, można wnioskować, że tunele krótsze mogą być wentylowane naturalnie.

## 4. Obliczenia numeryczne

### 4.1. Wprowadzenie

Celem zaprezentowanych obliczeń numerycznych była ocena oddziaływania wiatru na przepływ powietrza w tunelu w warunkach pożaru. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w odniesieniu do dwóch niezagłębionych, krótkich tuneli drogowych o przekroju prostokątnym wentylowanych naturalnie, w odniesieniu, do których wielkość i obszar oddziaływania wiatru na przepływ powietrza powinien być największy.

Ponadto założono, że we wnętrzu tunelu nie będą znajdowały się żadne pojazdy ograniczające pole przekroju poprzecznego. Przyjęta w badaniach struktura wiatru opisana została profilem logarytmicznym, którego kształt zależał od przyjętej wartości prędkości referencyjnej  $u_{ref}$  na wysokości 10,0 m powyżej terenu i aerodynamicznego współczynnika szorstkości terenu  $z_0$ . Rozważany zakres prędkości referencyjnej wiatru zawiera się w przedziale od 2,0 m/s do 6,0 m/s i odpowiada wartościom średnio-rocznym prędkości wiatru w Polsce na wysokości 10 m w terenie płaskim otwartym [7], [8].

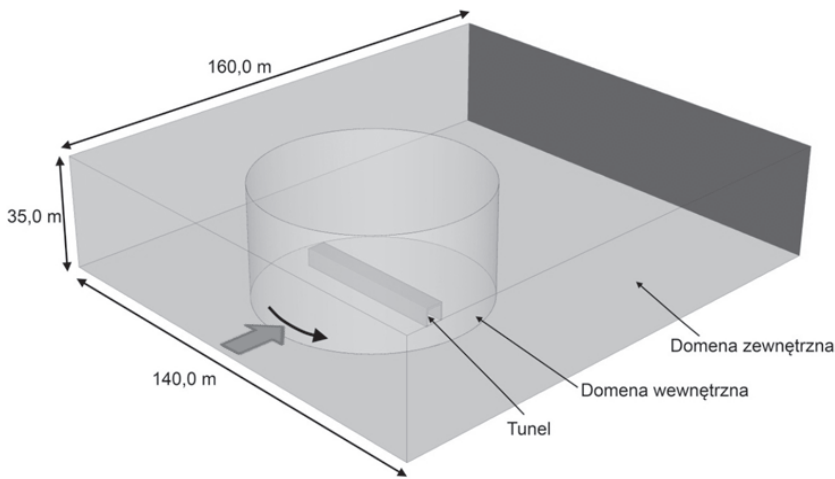
Przyjęte w obliczeniach numerycznych tunele miały następujące wymiary geometryczne:

- tunel „A” – wymiary wewnętrzne: 5,00 m x 5,00 m (szer. x wys.), wymiary zewnętrzne: 6,00 m x 5,50 m (szer. x wys.), długość: 50,00 m;
- tunel „B” – wymiary wewnętrzne: 10,00 m x 5,00 m (szer. x wys.), wymiary zewnętrzne: 11,00 m x 5,50 m (szer. x wys.), długość: 50,00 m.

W odniesieniu do każdego z wymienionych tuneli przeprowadzono obliczenia numeryczne przy kącie natarcia wiatru wynoszącym  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$ ; aerodynamicznym współczynnikiem szorstkości terenu  $z_0 = 1,00$  m, co odpowiada terenowi miejskiemu oraz trzech wartości całkowitego strumienia wyzwalanego ciepła HRR [ang. *Heat Release Rate*] wynoszących 5,00 MW, 10,00 MW i 20,00 MW. Przyjęte moce pożaru opisują odpowiednio: pożar jednego samochodu osobowego, pożar samochodu typu „van” oraz pożar jednego autobusu [9].

### 4.2. Opis domeny obliczeniowej

Przyjęta domena obliczeniowa składa się z dwóch poddomen: wewnętrznej i zewnętrznej. (por. rys. 2.) W poddomenie wewnętrznej znajdował się trójwymiarowy model tunelu wraz z jego bezpośrednim otoczeniem. Poddomena zewnętrzna opisywała obszar zewnętrzny, a na jej brzegach zdefiniowano następujące warunki brzegowe: „napływ” – opisujący strukturę powietrza napływającego do domeny obliczeniowej, „wypływ” – opisujący wypływ powietrza z domeny, „symetria” – na ścianach bocznych i ścianie górnej domeny obliczeniowej, „ściana” – opisujący ściany wewnętrzne i zewnętrzne tunelu oraz podstawę domeny obliczeniowej.



Rys. 2. Trójwymiarowy model domeny obliczeniowej wykorzystywanej w obliczeniach numerycznych

Podział obszaru analizy na poddomeny miał na celu umożliwienie wykonania obliczeń w odniesieniu do różnych kątów natarcia napływającego powietrza. Zmiana kąta natarcia była realizowana poprzez obrót poddomeny wewnętrznej o zadany kąt. Położenie poddomeny zewnętrznej nie ulegało zmianie.

Przyjęta wielkość domeny obliczeniowej spełniania wymagania poddane przez Franke i in. [10] i miała wymiary 140,0 m x 160,0 m x 35,0 m.

Wewnątrz tunelu, w jego środku geometrycznym, znajdowało się źródło pożaru, którego wymiary geometryczne wynosiły: 2,00 m x 4,50 m x 2,00 m.

Dyskretyzację domeny obliczeniowej przeprowadzono za pomocą strukturalnej siatki heksahedralnej, która składała się z 11 326 248 objętości, 34 339 388 powierzchni i 11 584 458 węzłów.

### 4.3. Model turbulencji

Prezentowane zagadnienie charakteryzuje przepływ o dużej turbulencji. W związku z tym do opisu pola prędkości i ciśnienia wybrano model turbulencji k-ε w wersji „standard”, który należy do grupy modeli metody RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*). Obecnie model k-ε to najczęściej stosowanym model zarówno w badaniach naukowych, jak i w badaniach prowadzonych na potrzeby przemysłu.

Jednakże ze względu na wiele przybliżeń upraszczających równania opisujące przepływ płynu oraz przyjęte „stałe” może dawać błędne wyniki rozwiązania, dlatego też wymaga weryfikacji. Dokładny opis problemów wynikających ze stosowania metody k-ε oraz kalibracji stałych modelu k-ε znajduje się w pracy Błazik-Borowej [11].

Przed przystąpieniem do badań numerycznych rozprzestrzeniania się dymu i ciepła z uwzględnieniem oddziaływującego wiatru przeprowadzono weryfikację przyjętego modelu turbulencji i proponowanych warunków brzegowych na podstawie wyników badań własnych w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej [1].

Wartość błędu wyznaczonego jako różnica między wartością współczynnika ciśnienia otrzymanego na podstawie obliczeń numerycznych, ( $C_{p,CFD}$ ) a wartością współczynnika ciśnienia otrzymanego z badań modelowych ( $C_{p,tunnel}$ ) nie przekraczała 20%. Uznano, że otrzymana dokładność rozwiązania jest wystarczająca w odniesieniu analizowanych zjawisk.

### 4.4. Źródło pożaru

Źródło pożaru odwzorowano jako stałe w czasie objętościowe źródło ciepła i dymu. Rozwój pożaru został opisany poprzez strumień wyzwalanego ciepła z pożaru oraz

strumień masy dymu. Maksymalna moc pożaru w każdym z trzech analizowanych przypadków była osiągnięta w 300 s (5 minut) od wybuchu pożaru i do 600 s (10 minut) była stała.

Współczynnik dymotwórczości dymu uwalnianego ze źródła pożaru wynosił 0,11 kg<sub>dymu</sub>/kg<sub>paliwa</sub>, zaś efektywne ciepło spalania paliwa 24 000 J/kg.

#### 4.5. Warunki początkowe

Temperatura początkowa powietrza w całej domenie obliczeniowej wynosiła 20°C (293,15 K). Właściwości powietrza, tj. gęstość, ciepło właściwe i przewodność cieplna, zależały od temperatury, a ich zmienność przyjęto na podstawie [12].

W celu poprawnego odwzorowania zjawiska wymiany ciepła przez ściany tunelu, przyjęto, że ściany były wykonane z betonu o grubości 0,50 m, którego gęstość w temperaturze początkowej wynosi 2300 kg/m<sup>3</sup>, ciepło właściwe wynosi 900 J/kgK, zaś przewodność cieplna - 1,4 W/mK. W obliczeniach przyjęto stałą gęstość betonu, zaś ciepło właściwe i przewodność cieplna zmieniały się zgodnie z krzywymi podanymi w PN-EN 1992-1-2:2008 [13].

#### 4.6. Warunki brzegowe

W obliczeniach numerycznych zagadnień związanych z inżynierią wiatrową i bezpieczeństwem pożarowym najczęściej przyjmowane warunki brzegowe są następującego typu:

- napływ [ang. velocity inlet],
- wypływ [ang. pressure outlet],
- ściana [ang. wall],
- symetria [ang. symmetry].

W prezentowanych obliczeniach warunek brzegowy typu „napływ” wykorzystywano do opisu struktury oddziaływującego wiatru. Struktura wiatru opisana była za pomocą pionowego profilu prędkości średniej wiatru w funkcji wysokości, kinetycznej energii turbulencji oraz dysypacji kinetycznej energii turbulencji.

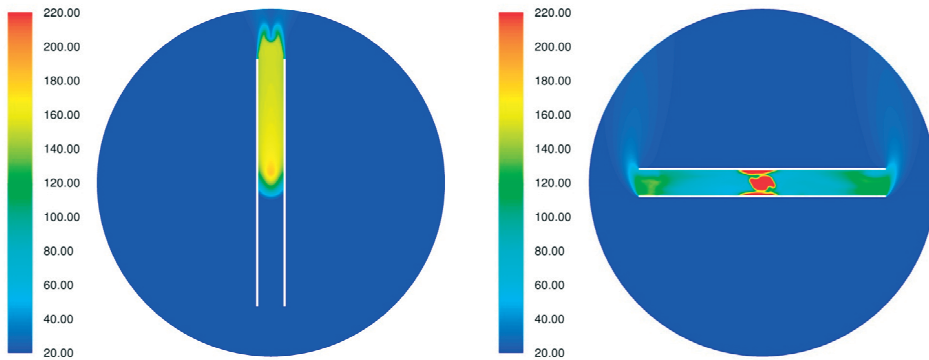
$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_o}{z_o}\right), \quad k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_o)}, \quad u_* = \frac{u_{ref} \kappa}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_o}\right)} \quad (1)$$

gdzie:  $k$  - kinetyczna energia turbulencji,  $\varepsilon$  dysypacja kinetycznej energii turbulencji,  $\kappa$  - stała von Karmana,  $C_\mu$  - „stała” modelu  $k$ - $\varepsilon$  w wersji „standard” zaś  $u_*$  - bezwymiarowa prędkość tarciowa.

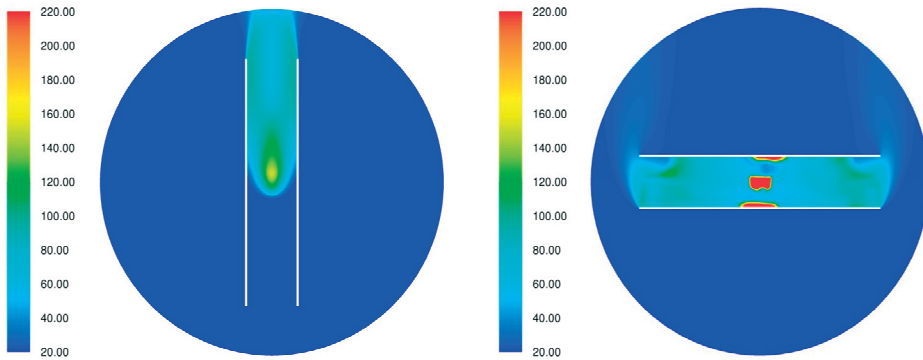
Podstawa domeny obliczeniowej, która odpowiadała terenowi oraz powierzchni ścian zewnętrznych i wewnętrznych, została opisana za pomocą warunku brzegowego typu „ściana”. Powierzchnie boczne oraz powierzchnia górna domeny obliczeniowej zostały opisane przez warunek brzegowy typu „symetria”. Warunek brzegowy typu „wypływ” wykorzystano do opisu powierzchni, którą następował wypływ powietrza z domeny.

#### 4.7. Wyniki obliczeń

Poniżej zamieszczono wyniki obliczeń numerycznych, w postaci rozkładów temperatury na wysokości 4,50 m nad posadzką tuneli „A” i „B” (rys. 3 – rys.4) dla prędkości referencyjnej wiatru  $u_{ref}=4,0$  m/s i kąta natarcia wiatru 0° i 90°.

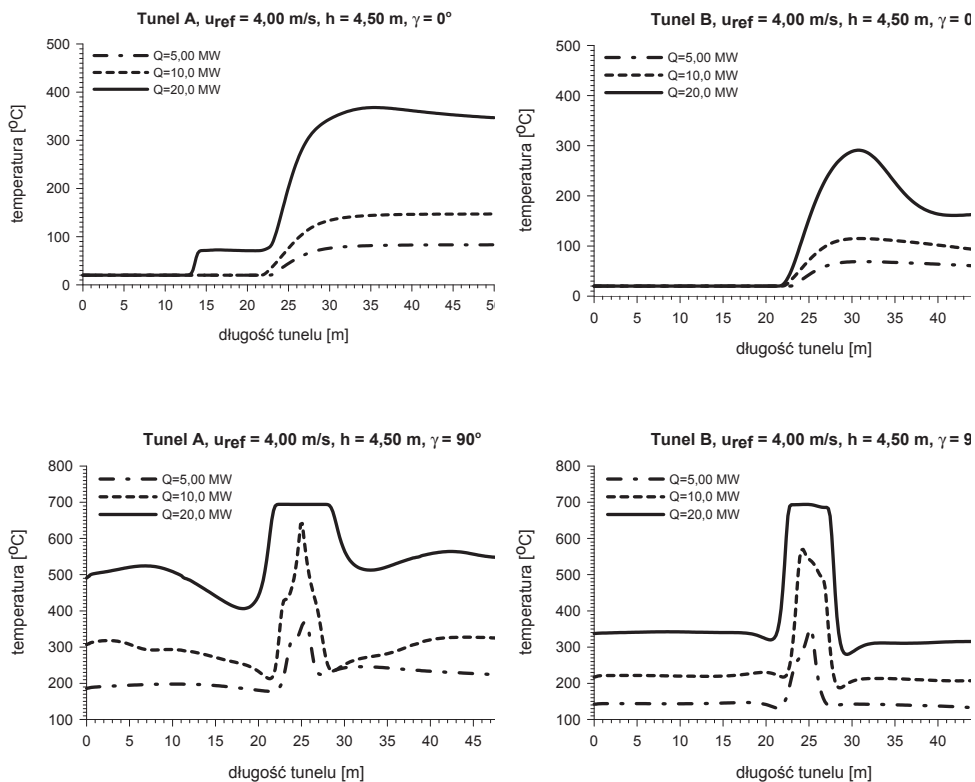


Rys. 3. Przewidywany rozkład temperatury powietrza (w zakresie 20°C – 220°C i więcej) na wysokości 4,50 m nad posadzką tunelu „A”, przy mocy pożaru  $Q = 10,00$  MW, dla prędkości referencyjnej  $u_{ref} = 4,00$  m/s i kąta natarcia wiatru  $\gamma = 0^\circ$  (rysunek po lewej stronie) i  $\gamma = 90^\circ$  (rysunek po prawej stronie)



Rys. 4. Przewidywany rozkład temperatury powietrza (w zakresie 20°C – 220°C i więcej) na wysokości 4,50 m nad posadzką tunelu „B”, dla mocy pożaru  $Q = 10,00$  MW, dla prędkości referencyjnej  $u_{ref} = 4,00$  m/s i kąta natarcia wiatru  $\gamma = 0^\circ$  (rysunek po lewej stronie) i  $\gamma = 90^\circ$  (rysunek po prawej stronie)

Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki obliczeń numerycznych, w postaci rozkładów temperatury na wysokości 4,50 m przy prędkości referencyjnej wiatru 4,00 m/s i kątach natarcia wiatru  $0^\circ$  i  $90^\circ$  w odniesieniu do tuneli „A” i „B”.



Rys.5. Przebieg zmian przewidywanej temperatury powietrza wzdłuż osi podłużnej tunelu „A” i „B” przy kącie natarcia wiatru  $0^\circ$  i  $90^\circ$

## 5. Podsumowanie

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń, wykazano, iż zjawisko stratyfikacji dymu i powietrza, które zakłada się w krótkich tunelach wentylowanych naturalnie, nie występuje podczas oddziaływania wiatru niezależnie od kąta natarcia i prędkości wiatru. Oznacza to, że dym wypełnia cały przekrój tunelu.

Obecnie elementem decydującym o wyborze systemu usuwania dymu i ciepła z tunelu w warunkach pożaru jest wyłącznie długość tunelu. Otrzymane wyniki badań wykazały, że stosowanie wentylacji naturalnej do usuwania dymu i ciepła nawet z krótkich tuneli jest niewłaściwe ze względu na nieskuteczne funkcjonowanie w warunkach pożaru i oddziaływującego wiatru. Zaleca się stosowanie systemów wentylacji mechanicznej do odprowadzania dymu i ciepła z tuneli drogowych w warunkach pożaru. Prawidłowo zaprojektowany i wykonany system wentylacji mechanicznej gwarantuje skuteczne odprowadzanie dymu i ciepła umożliwiające ewakuację osób z tunelu oraz prowadzenia działań ratowniczo – gaśniczych.

## Literatura

- 1 G. Sztarbała, Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelu w warunkach pożaru, Rozprawa doktorska, Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2012, p. 135.
- 2 A. HAERTER, Fire test in the Offenegg Tunnel in 1965, [W:] Proceedings of the International Conferences on Fire in Tunnels, Borås, Sweden, 1994.

- 3 S. JAGGER, G. GARANT, Use of tunnel ventilation for fire safety, [W:] The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford, 2005, s. 144-183.
- 4 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000, w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. nr 63 poz.735.
- 5 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 29 maja 2012, zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. nr 0 poz.608.
- 6 Dyrektywa 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa dla tuneli w transeuropejskiej sieci drogowej.
- 7 A. FLAGA, Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania, Warszawa: Arkady, 2008.
- 8 S. GUMUŁA, T. KNAP, P. STRZELCZY, Z. SZCZERBA, Energetyka wiatrowa, Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2006.
- 9 World Road Association (PIARC), Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Paris, France, 1999.
- 10 J. FRANKE, C. HIRSCH, A. JANSEN, H. KRUS, M. SCHATZMANN, P. WESTBURY, S. MILES, J. WISSE, N. WRIGHT, Recommendations on the use of CFD in wind engineering, [W:] Proc. The International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, Sint-Genesius-Rode, 2004.
- 11 E. Błazik-Borowa, Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k- $\epsilon$  do wyznaczania parametrów opływu budynków, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2008.
- 12 B. Staniszewski, Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. Wydanie drugie poprawnione, Warszawa: PWN, 1979.
- 13 PN-EN 1992-1-2: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

## **Wind influence on the flow inside the road tunnels in the case of the fire**

**Grzegorz Sztarbała**

*Instituto Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych, e-mail: g.sztarbala@itb.pl*

**Abstract:** An important factor in ensuring the fire safety of a construction works, such as a tunnel, is the effective evacuation of smoke and heat to allow people to evacuate and enable to fight a fire. In short tunnels natural ventilation is used, where the flow of air is caused by natural convection phenomena and weather conditions. The results of this research show that the stratification phenomenon in naturally ventilated tunnels occurs in windless conditions only. Flow blockage was observed for a wind angle equal to 90°, causing smoke and heat to remain in the tunnel.

The use of natural ventilation to remove smoke and heat from short tunnels is inappropriate due to the ineffective functioning, in the case of the fire and wind action.

**Keywords:** natural ventilation in tunnel, road tunnel. wind action on tunnel, physical modelling, Computational Fluid Dynamics, CFD, fire in tunnel