

prof. dr hab. inż. **Stanisław Nawrat**¹
dr inż. **Natalia Schmidt-Polończyk**¹
mgr inż. **Sebastian Napieraj**¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 29.06.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 22.08.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Możliwości stosowania technologii oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń gazowych w tunelach drogowych²

Possibility of Using Air Purification Technology From Gas Pollution in Road Tunnels

Возможность использования технологии очистки воздуха от газовых загрязнений в дорожных туннелях

ABSTRAKT

Cel: Budowa tuneli drogowych szczególnie na terenach zurbanizowanych pozwala zmniejszyć emisję zanieczyszczeń gazowych w miejscu wybudowanego tunelu, ale jednocześnie powoduje znaczne zwiększenie stężeń tych zanieczyszczeń w rejonie wylotu zużytego powietrza z tunelu. W artykule przedstawiono symulację rozprzestrzeniania się ditlenku azotu pochodzącego ze spalin samochodowych w rejonie analizowanej ulicy oraz symulację zmiany jego stężeń w przypadku budowy tunelu z wentylacją wzdłużną bez systemu oczyszczania powietrza oraz z zabudowanym systemem oczyszczania powietrza. Przeprowadzono analizę skuteczności stosowania technologii oczyszczania powietrza wentylacyjnego z tuneli.

Wprowadzenie: Według raportów dotyczących jakości powietrza Polska należy do najbardziej zanieczyszczonych państw w Europie. Głównym powodem wysokiego stężenia zanieczyszczeń w powietrzu w miastach są emitowane spaliny samochodowe. Jedną z metod ograniczenia zawartości zanieczyszczeń stałych i gazowych w powietrzu w miastach jest budowa drogowych tuneli komunikacyjnych. Rozwiązanie to powoduje znaczne zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, szczególnie gazowych w obszarze tunelu. Niemniej jednak odprowadzane powietrze wentylacyjne z tunelu generuje lokalnie w rejonach wylotów z tuneli podwyższony poziom stężeń zanieczyszczeń. Na świecie stosowane są systemy oczyszczania dużych strumieni powietrza wentylacyjnego tuneli z zanieczyszczeń stałych i gazowych – przykładami są tunele Mont Blanc w Alpach łączący Chamonix we Francji z Courmayeur we Włoszech oraz tunel M30 w Madrycie. W takich tunelach powietrze wentylacyjne jest oczyszczane przed jego usunięciem do atmosfery.

Metodologia: W celu zbadania wpływu tunelu drogowego na poziom stężenia wybranych zanieczyszczeń w powietrzu wybrano koncepcyjną lokalizację budowy tunelu drogowego w Warszawie w ciągu ulicy Wawelskiej. Emisja wybranych zanieczyszczeń gazowych pochodzących ze spalin silników samochodowych do atmosfery została zamodelowana nowoczesnym oprogramowaniem Computational Fluid Dynamics. W tym zakresie przeprowadzono analizę trzech przypadków: stanu istniejącego w rejonie ulicy Wawelskiej (ruch pojazdów ciągiem drogowym), budowy tunelu z wentylacją wzdłużną bez oczyszczania powietrza wentylacyjnego z tunelu oraz budowy tunelu z wentylacją wzdłużną z systemem oczyszczania powietrza z tunelu. Następnie wyniki badań stężeń zanieczyszczeń w powietrzu dla analizowanych przypadków zostały porównane.

Wnioski: Rezultaty analiz numerycznych zestawione z przeprowadzonymi przez pracowników Politechniki Warszawskiej wynikami badań stężeń zanieczyszczeń powietrza w rejonie ulicy Wawelskiej w Warszawie potwierdziły przyjęte założenia dotyczące modelowania numerycznego stanu obecnego. Efekty analiz dotyczących prognozowanego stężenia zanieczyszczeń w powietrzu dla wariantu budowy tunelu bez systemu oczyszczania powietrza wykazały znaczne zmniejszenie zanieczyszczeń w rejonie ulicy Wawelskiej oraz spore przekroczenia dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń przy wylotach z portali tuneli. Ponadto wyniki badań numerycznych potwierdziły, że budowa tunelu wraz z systemem oczyszczania powietrza wentylacyjnego jest najkorzystniejszym rozwiązaniem prowadzącym do zmniejszenia poziomu zanieczyszczeń w rejonie ulicy Wawelskiej w Warszawie.

Słowa kluczowe: tunel, wentylacja tuneli, oczyszczanie powietrza, zanieczyszczenia.

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Aim: Road tunnel construction, especially in urban areas, leads to the reduction in the emission of solid and gaseous pollutants within the area of the constructed tunnel, and at the same time to a significant increase in the concentration of this pollution in the areas where the exhaust

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza / AGH University of Science and Technology; nawstan@agh.edu.pl;

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

air is discharged from the tunnel. The article presents a simulation of how nitrogen dioxide coming from car exhaust spreads in the area of the analyzed street and a simulation of changes in its concentration in the case of tunnel building with longitudinal ventilation with and without air purification system. At the same time analysis of the effectiveness of using air purification technology in tunnels was carried out.

Introduction: Reports concerning air quality in Europe place Poland among the most polluted countries. Exhaust emission from cars is the main reason for the high concentration of air pollutants in cities. Construction of road tunnels is one of the methods to reduce the content of solid and gaseous pollutants in the air in cities. This solution leads to a significant reduction in the emission of pollutants, especially gaseous ones, within the area of a tunnel; however, the ventilation air discharged from the tunnel generates locally, in the areas of tunnel portals, an increased concentration level of solid and gaseous pollutants. All over the world, in city tunnels, systems of purifying large volumes of ventilation air streams from solid and gaseous pollutants are used – examples are Mont Blanc tunnel in Alps connecting Chamonix in France and Courmayeur in Italy and the M30 tunnel in Madrid, where ventilation air from the tunnels is purified before it is removed to the atmosphere.

Methodology: In order to study the impact of a road tunnel on the concentration levels of selected air pollutants, a location included in the conceptual design of a road tunnel in Warsaw, along Wawelska Street, was selected. The emission of selected gaseous pollutants from car engines was modelled using Computational Fluid Dynamics for the current situation on Wawelska Street (vehicle traffic on the road), for the construction of a tunnel with a longitudinal ventilation without an air purification system, and for the construction of a tunnel with longitudinal ventilation with an air purification system. The levels of air pollution concentration for the analysed cases were juxtaposed with one another.

Conclusions: The comparison of the results of numerical analyses with the results of the air pollution concentration study in the area of Wawelska street in Warsaw, which was conducted by the Warsaw University of Technology staff, confirmed the adopted numerical modelling assumptions for the current state. The results of the analyses concerning the predicted concentration of air pollution in the variant of tunnel construction without an air purification system showed a significant reduction in pollution in the area of Wawelska Street and largely exceeded pollution concentration limits in the area of the tunnel portals. Moreover, the results of numerical analyses confirmed that the construction of a tunnel with an air purification system was the most favourable solution, leading to the reduction of pollution in the area of Wawelska Street in Warsaw.

Keywords: tunnel, tunnel ventilation, air purification, pollutants

Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Цель: Строительство автодорожных туннелей, особенно в городских районах, позволяет уменьшить количество выбросов газовых загрязнений в месте построенного туннеля, но одновременно значительно увеличивает концентрацию этих загрязнений около места выброса отработанного воздуха из туннеля. В статье представлено моделирование распространения диоксида азота, поступающего из автомобилей в районе анализируемой улицы, а также моделирование изменений его концентрации в случае построения туннеля с системой продольной вентиляции без системы очистки воздуха и туннеля с встроенной системой очистки воздуха. Проведен анализ эффективности использования технологии очистки вентиляционного воздуха из туннелей.

Введение: Согласно отчетам по качеству воздуха в Европе, Польша является одной из наиболее загрязненных стран. Основной причиной высокой концентрации загрязнения воздуха в городах являются выхлопные газы автомобилей. Одним из способов уменьшения содержания стойких и газовых веществ в воздухе в городах является постройка автодорожных туннелей. Это решение приводит к значительному сокращению выбросов, в частности газа, в районе туннеля. Однако, выделяемый вентиляционный воздух, выходящий из туннеля, местно генерирует в районе его выбросов повышенные концентрации загрязнений. В мире используются системы для очистки больших потоков вентиляционного воздуха туннелей от стойких загрязняющих веществ и газов - примерами являются туннели Монблан в Альпах, который соединяет Шамони во Франции и Курмайор в Италии, а также туннель М30 в Мадриде. В таких туннелях вентиляционный воздух перед выбросом в атмосферу проходит очистку.

Методология: Для изучения влияния автодорожного туннеля на уровень концентрации отдельных вредных веществ в воздухе было выбрано проектное местоположение строительства автодорожного туннеля в Варшаве на улице Вавельской. Выброс в атмосферу отдельных газовых загрязнений из выхлопных газов автомобильных двигателей был смоделирован с использованием современного программного обеспечения CFD. В связи с этим был проведен анализ 3 следующих случаев: текущей ситуации в районе улицы Вавельской (движение машин на улице), постройки туннеля с системой продольной вентиляции без очистки вентиляционного воздуха и постройки туннеля с системой продольной вентиляции с очисткой воздуха, выходящего из туннеля. Затем результаты испытаний концентрации загрязняющих веществ в анализируемых случаях были сопоставлены друг с другом.

Выводы: Результаты численного анализа в сравнении с результатами исследований концентрации загрязнений в районе улицы Вавельской в Варшаве, проведенными сотрудниками Варшавского политехнического университета, подтвердили принятые предположения, касающиеся численного моделирования текущей ситуации. Результаты анализа прогнозируемой концентрации загрязнений в воздухе для варианта постройки туннеля без системы очистки воздуха показали значительное снижение уровня загрязнения в районе улицы Вавельской и большое превышение допустимых концентраций вредных веществ при выездах из туннеля. Кроме того, результаты численных исследований подтвердили, что строительство туннеля вместе с системой очистки вентиляционного воздуха является наилучшим решением, которое приведет к снижению уровня загрязнения в районе улицы Вавельской в Варшаве.

Ключевые слова: туннель, вентиляция туннеля, очистка воздуха, загрязнение

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wprowadzenie

Rozwój infrastruktury miejskiej i związane z nim wysokie natężenie ruchu drogowego w miastach spowodowały wzrost poziomu zagrożeń środowiskowych na terenach zurbanizowanych. Dotyczy to przede wszystkim zagrożeń o charakterze chemicznym (zanieczyszczenia powietrza) oraz fizycznym (hałas, wibracje).

W celu zmniejszenia wpływu uciążliwych dla mieszkańców miast zagrożeń środowiskowych związanych z ruchem

pojazdów samochodowych budowane są między innymi miejskie tunele drogowe.

Zanieczyszczenia w tunelach drogowych związane są najczęściej ze szkodliwymi gazami emitowanymi przez poruszające się w nich pojazdy samochodowe, nadmiernym wydzielaniem ciepła oraz pyłów. Dodatkowym czynnikiem, który wpływa na podwyższone stężenia zanieczyszczeń w tunelach, są zatory drogowe. Emisja spalin wynikająca

z ruchu pojazdów zależy od natężenia i płynności ruchu, typu silnika przejeżdżających przez tunele pojazdów, ich stanu technicznego, rodzaju paliwa i ukształtowania trasy. Spaliny w tunelu są rezultatem pracy silników samochodowych, w których następuje zamiana energii chemicznej na mechaniczną [1].

Za podstawowe substancje zanieczyszczające atmosferę, emitowane przez silniki spalinowe uważa się m.in.: tlenek węgla, węglowodory, aldehydy, sadzę, tlenki azotu, ditlenek azotu oraz ditlenek siarki. Ponadto przejeżdżające pojazdy generują także inne substancje zanieczyszczające atmosferę tunelu pochodzące np. ze zużywających się opon czy też olejów [1].

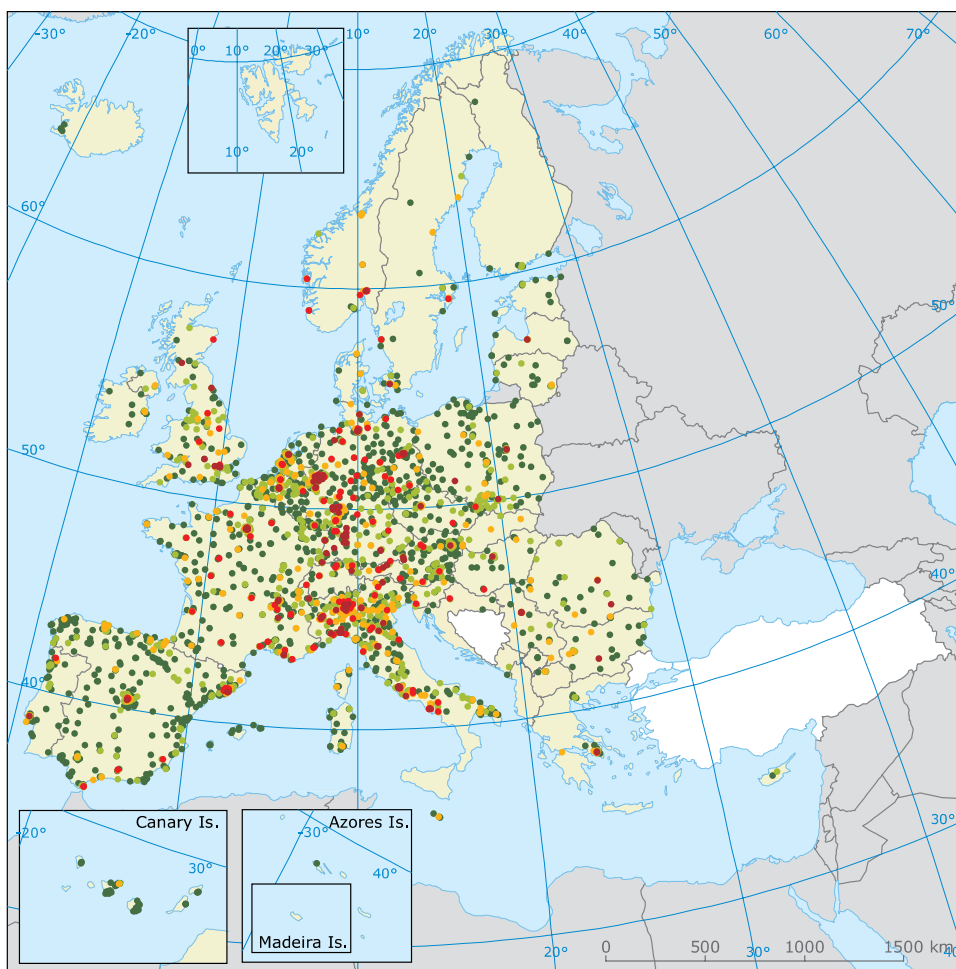
Wykonane badania jakości powietrza w UE [2-3] wykazały przekroczenie dopuszczalnych norm zanieczyszczenia powietrza, między innymi w zakresie emisji spalin samochodowych ditlenku azotu – ryc. 1.

Według Głównego Urzędu Statystycznego średni wiek samochodu w Polsce wynosi 15 lat (zob. tabela 1). Około 30% samochodów w tym wieku posiada silniki wysokoprężne. Pojazdy te emitują znaczne ilości zanieczyszczeń do powietrza i wpływają na przekroczenie dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń [5].

2. Budowa tuneli w celu zmniejszenia zagrożeń środowiskowych

Wykonywane badania jakości powietrza w Warszawie potwierdzają przekroczenie dopuszczalnych stężeń związków gazowych i stałych. Jednym z miejsc, w których zanotowano przekroczenie, jest rejon ulicy Wawelskiej. Prowadzone przez pracowników Politechniki Warszawskiej [6] badania składu powietrza na tej ulicy wykazały wysokie stężenia między innymi ditlenku azotu (wynoszące ponad $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Zmierzone zanieczyszczenia gazowe są zmienne w czasie i silnie skorelowane z natężeniem ruchu pojazdów (ryc. 2).

Natężenie ruchu pojazdów w dni robocze w ciągu ulicy Wawelskiej wynosi od ok. 20 do ok. 75 tys. pojazdów na dobę, a średnia prędkość ruchu pojazdów wynosi ok. 31 km/h. W związku z tym podejmowane są działania zmierzające do budowy tunelu, który miałby zmniejszyć wpływ zanieczyszczeń pochodzących od ruchu samochodowego w rejonie ulicy Wawelskiej na jej mieszkańców. Planowana długość tunelu wyniosłaby ok. 1000 m. Założono, że tunel będzie przewietrzany wentylacją wzdłużną, tj. świeże powietrze wentylacyjne będzie dopływało do tunelu całym przekrojem portalu wlotowego. Poprzez „efekt tłoka” przejeżdżających pojazdów lub/i zastosowanie wentylatorów typu „jet-fan” tłoczone będzie do portalu wylotowego, poprzez który razem z zanieczyszczeniami pochodzącymi z ruchu samochodowego, będzie emitowane do atmosfery (ryc. 3).



Ryc. 1. Roczne stężenie ditlenku azotu w 2013 r. wyrażone w $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

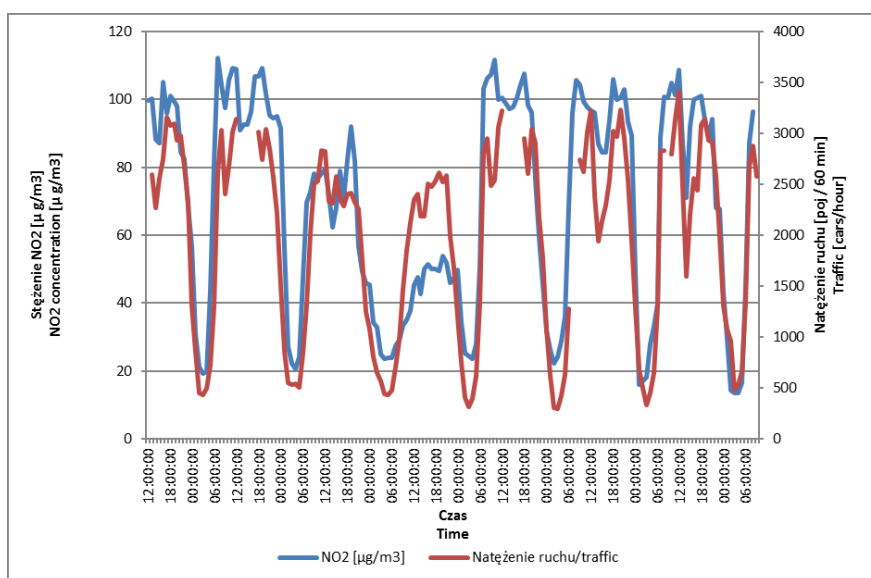
(czerwone i ciemnoczerwone kropki wskazują stacje pomiarowe, na których został przekroczony dopuszczalny poziom średniorocznego stężenia ditlenku azotu, określonego w prawodawstwie UE, wynoszącego $40 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$) [4]

Fig. 1. Annual concentration of nitrogen dioxide in 2013 expressed in $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

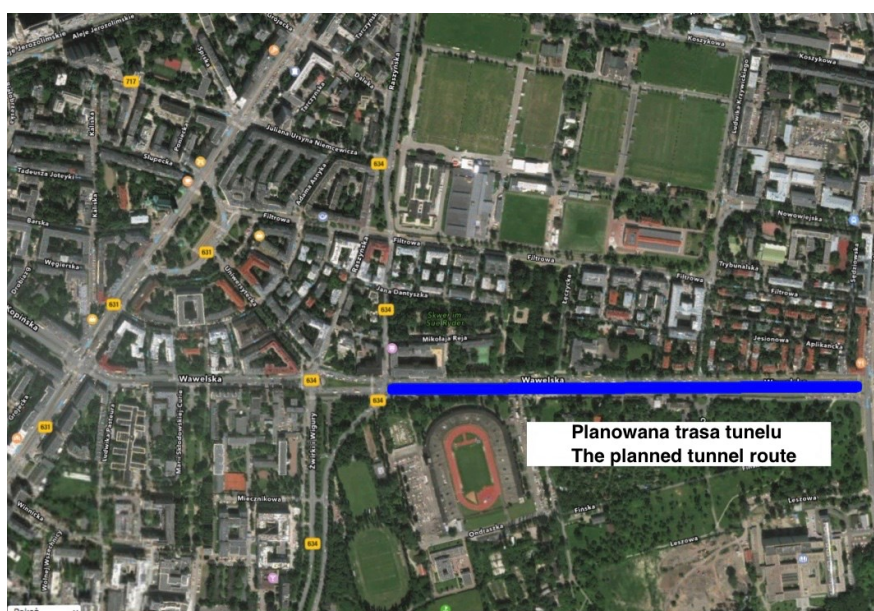
(red and dark-red dots indicate measuring stations where the annual average limit value for nitrogen dioxide, defined by EU regulations and amounting to $40 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$, was exceeded) [4]

Tabela 1. Samochody osobowe, motocykle i motorowery według grup wiekowych – stan na rok 2014 [5]
Table 1. Passenger cars, motorcycles and mopeds, according to age group – 2014 levels [5]

L.p. / No.	Wiek / Age	Samochody osobowe [%] Passenger cars [%]
1	Do 1 roku/ Up to 1 year	2,6
2	2 lata/ 2 years	1,5
3	3 lata/ 3 years	1,7
4	4-5 lat/ 4-5 years	3,3
5	6-7 lat/ 6-7 years	5,6
6	8-9 lat/ 8-9 years	6,0
7	10-11 lat/ 10-11 years	7,7
8	12-15 lat/ 12-15 years	18,5
9	16-20 lat/ 16-20 years	21,8
10	21-25 lat/ 21-25 years	12,0
11	26-30 lat/ 26-30 years	7,1
12	31 i starsze/ 31 and older	12,2



Ryc. 2. Zależność stężenia NO₂ od natężenia ruchu pojazdów na ul. Wawelskiej [6]
Fig. 2. Correlation between NO₂ concentration and vehicle traffic on Wawelska Street [6]



Ryc. 3. Projektowana trasa tunelu pod ulicą Wawelską
Fig. 3. Planned tunnel route under Wawelska Street
Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem map Google: mapy.google.pl.
Source: Own elaboration with the use of Google maps: maps.google.com.

3. Metoda badawcza wykorzystana do oceny rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych

Do analizy skuteczności stosowania wybranych systemów wentylacji tuneli wykorzystywane są programy CFD m.in. jak w pracy [7]. Do wykonania badań rozprzestrzeniania zanieczyszczeń gazowych związanych z ruchem pojazdów w rejonie ulicy Wawelskiej wykorzystano program Fire Dynamics Simulator (FDS) bazujący na numerycznej mechanice płynów (*ang. Computational Fluid Dynamics – CFD*). Modele CFD odzwierciedlają parametry danego obiektu lub zjawiska z dokładnością założoną przez projektanta. Pomimo coraz większych możliwości współczesnych komputerów, w akceptowalnym czasie udaje się osiągnąć jedynie przybliżone rozwiązania badanych problemów i zjawisk w dużej skali. Ze względu na złożoność rozważanego przypadku w przeprowadzonych symulacjach przyjęto pewne założenia upraszczające dotyczące między innymi: warunków atmosferycznych (przyjęto prędkość wiatru na poziomie 0 km/h), braku turbulencji powietrza wynikającej z ruchu pojazdów, niewystępowanie dodatkowych zanieczyszczeń powietrza pochodzących z innych źródeł.

Programy CFD opierają się na rozwiązywaniu równań Navier-Stokesa, które opisują powiązanie ze sobą wartości prędkości, ciśnienia, lepkości oraz gęstości poruszającego się płynu. Omawiane równania są rozszerzeniem równań Eulera, które uwzględniają lepkość płynu oraz bazują na trzech podstawowych zasadach: zachowania masy, zachowania pędu (druga zasada dynamiki Newtona) oraz zachowania energii (pierwsze prawo termodynamiki) [8]. W celu wyznaczenia konkretnych wielkości z tych równań używane są różne metody dyskretyzacji, takie jak: metoda skończonych objętości (*finite volume method*), metoda elementów skończonych (*finite element method*) oraz metoda różnic skończonych (*finite difference method*). W rozpatrywanym przypadku wykorzystano metodę objętości skończonych.

4. Przyjęte założenia emisji spalin przez pojazdy w rejonie ul. Wawelskiej

W celu wykonania obliczeń rozprzestrzeniania zanieczyszczeń gazowych w rejonie ul. Wawelskiej przyjęto następujące założenia dotyczące emisji NO_x dla pojazdów samochodowych, wykonanych zgodnie z normami EURO [9]:

- ruch samochodowy – 75 000 poj./dobę [6],
- emisja NO_x dla samochodów z silnikiem spalinowym i diesla wraz z przyporządkowaniem procentowym grup wieku samochodów do odpowiedniej normy emisji – tabela 2.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano dzienną

emisję ditlenku azotu pochodzącego ze spalin samochodowych dla badanego odcinka drogi o długości 1 km w wielkości 17 080 g.

5. Wpływ zastosowania systemów oczyszczania powietrza wentylacyjnego z tunelu na poziom wybranych zanieczyszczeń gazowych w rejonie wyrzutni

Powietrze w tunelach bardzo często wymaga oczyszczania z zanieczyszczeń stałych i gazowych. Ma ono na celu zapewnienie komfortu i bezpieczeństwa użytkowników dróg oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń usuwanych z tunelu do atmosfery [10]. Stacja oczyszczania zużytego powietrza powinna składać się z filtra cząstek stałych oraz filtra wybranych zanieczyszczeń gazowych.

Oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń stałych i gazowych w tunelu powinno być realizowane również ze względu na zapewnienie dobrych warunków widoczności, odpowiedniej jakości powietrza podczas eksploatacji tunelu i w jego otoczeniu. Istnieje wiele metod oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń emitowanych przez instalacje przemysłowe, w tym przez silniki spalinowe.

Neutralizacja zanieczyszczeń gazowych, jak na przykład ditlenku azotu, odbywa się w specjalnych filtrach. Usuwanie tlenków azotu NO_x jest złożonym procesem. Wymaga w pierwszej kolejności oczyszczenia powietrza z cząstek stałych – najczęściej z wykorzystaniem elektrofiltrów (*electrostatic precipitator – ESP*). Usuwanie zanieczyszczeń gazowych odbywa się na zasadzie absorpcji lub adsorpcji na absorbentach lub adsorbentach. Znaną technologią usuwania zanieczyszczeń gazowych, w tym ditlenku azotu, jest adsorpcja przy użyciu wodorotlenku potasu KOH na materiale pochłaniającym. W wyniku reakcji z KOH lub w wyniku adsorpcji ditlenku azotu z materiałem nasączonym siarczanem sodu Na_2SO_4 [10] powstają związki KNO_2 i KNO_3 . Systemy te pozwalają na oczyszczenie powietrza z ponad 90% zanieczyszczeń w tym NO_2 . Do dalszej części analizy przyjęto zastosowanie filtrów oczyszczających powietrze wentylacyjne z ditlenku azotu przy użyciu wodorotlenku potasu ze sprawnością 90%.

Przeprowadzono analizę numeryczną budowy tunelu ze stacją oczyszczania powietrza z NO_2 , a wyniki stężeń ditlenku azotu na wysokości 2 m nad poziomem terenu naniesiono na mapę.

Przeprowadzone analizy rozprzestrzeniania się ditlenku azotu – składnika spalin samochodowych w rejonie ulicy Wawelskiej w Warszawie wykazały maksymalne stężenia do $150 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ w rejonie wyrzutni powietrza oraz $0 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ na powierzchni terenu, wzdłuż tunelu, określone na podstawie badań numerycznych dla wariantu budowy tunelu drogowego ze stacją oczyszczania powietrza.

Tabela 2. Normy emisji spalin dotyczące emisji NO_x , daty wprowadzenia norm oraz udział procentowy floty samochodów w Polsce [9], [5]

Table 2. Exhaust emission standards concerning for NO_2 emissions, date of standard introduction, and the percentage share of car fleet in Poland [9], [5]

	Emisja NO_x silniki spalinowe [g/km] NO_x combustion engines [g/km]	Emisja NO_x silniki diesla [g/km] NO_x diesel engines [g/km]	Data wprowadzenia Date of introduction	% floty pojazdów % car fleet
Pre EURO	2,5	-		21,5
EURO 1	0,15	0,55	1993	13,0
EURO 2	0,15	0,55	1996	11,5
EURO 3	0,15	0,50	2000	19,5
EURO 4	0,08	0,25	2006	8,0
EURO 5	0,06	0,18	2009	18,5
EURO 6	0,06	0,08	2014	8,0

Wyniki przeprowadzonej symulacji komputerowej pozwalają stwierdzić, że budowa tunelu z systemem oczyszczania powietrza w ciągu ulicy Wawelskiej przyczyni się do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń gazowych w analizowanym rejonie (ryc. 4).

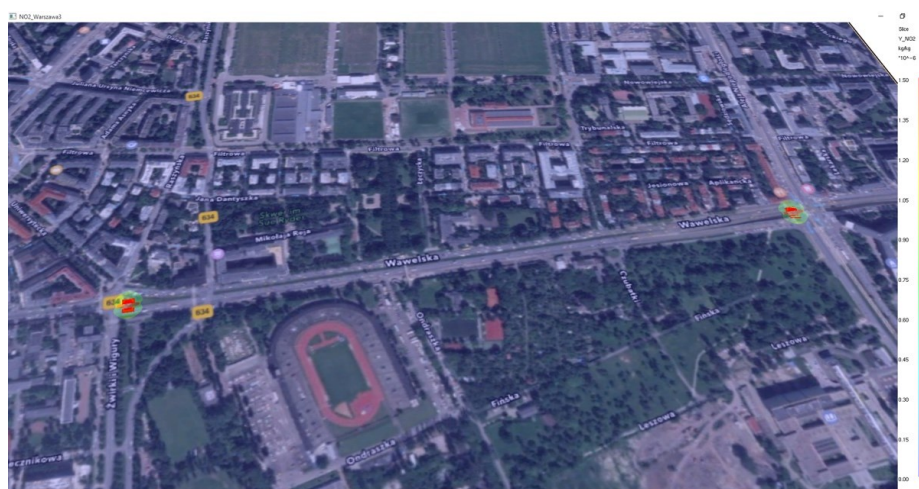
6. Analiza numeryczna rozprzestrzenienia zanieczyszczeń gazowych pochodzących z ruchu pojazdów w ciągu ul. Wawelskiej

Z wykonanych obliczeń emisji spalin wynika, że dla przyjętego natężenia ruchu, na odcinku 1 km w ciągu doby do atmosfery emitowane jest 17 080 g ditlenku azotu. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła nanieść obliczone

stężenia NO_2 na wysokości 2 m nad poziomem gruntu na mapę terenu dla warunków stanu istniejącego (ryc. 5) oraz dla przypadku wybudowania tunelu bez stacji oczyszczania powietrza (ryc. 6).

Przeprowadzone analizy rozprzestrzeniania się ditlenku azotu – składnika spalin samochodowych w rejonie ulicy Wawelskiej w Warszawie – pozwoliły określić:

- maksymalne stężenia do $100 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ na całej długości jezdni na podstawie badań numerycznych dla wariantu bez budowy tunelu drogowego – stan obecny,
- maksymalne stężenia do $1500 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ w rejonie wyrzutni powietrza oraz $0 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ na powierzchni terenu, wzdłuż tunelu, na podstawie badań numerycznych dla wariantu budowy tunelu drogowego bez stacji oczyszczania powietrza.

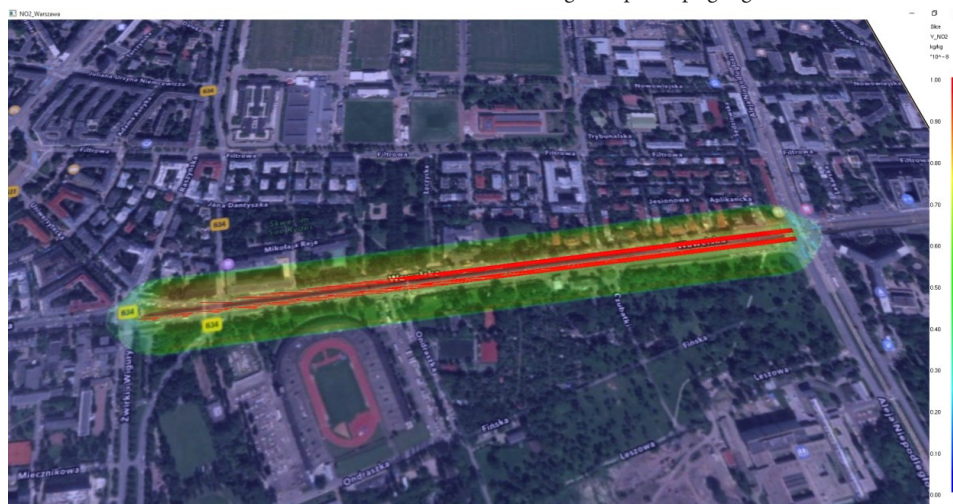


Ryc. 4. Średnie dobowe stężenie NO_2 pochodzące od ruchu samochodowego analizowanego odcinka ulicy Wawelskiej z uwzględnieniem budowy tunelu ze stacją oczyszczania powietrza wylotowego, (kolorem czerwonym zaznaczono koncentracje $100\text{-}150 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem zielonym koncentracje $60\text{-}100 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem niebieskim koncentracje $0\text{-}60 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$)

Fig. 4. Average daily concentration of NO_2 from car traffic in the analysed section of Wawelska Street, taking into account the construction of a tunnel with an exhaust air purification station (where $100\text{-}150 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in red, $60\text{-}100 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in green, and $0\text{-}60 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ were marked in blue)

Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem map Google: maps.google.pl.

Source: Own elaboration with the use of Google maps: maps.google.com.

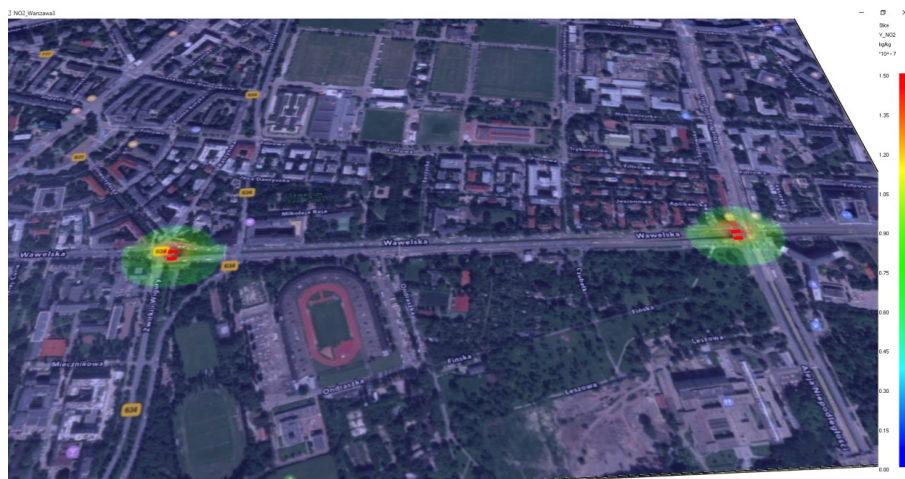


Ryc. 5. Średnie dobowe stężenie NO_2 pochodzące od ruchu samochodowego analizowanego odcinka ulicy Wawelskiej, (kolorem czerwonym zaznaczono koncentracje $80\text{-}100 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem zielonym koncentracje $40\text{-}80 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem niebieskim koncentracje $0\text{-}40 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$)

Fig. 5. Average daily concentration of NO_2 from car traffic in the analysed section of Wawelska Street (where $80\text{-}100 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in red, $40\text{-}80 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentration were marked in green, and $0\text{-}40 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in blue)

Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem map Google: maps.google.pl.

Source: Own elaboration with the use of Google maps: maps.google.com.



Ryc. 6. Średnie dobowe stężenie NO_2 pochodzące od ruchu samochodowego analizowanego odcinka ulicy Wawelskiej z uwzględnieniem wariantu tunelu, (kolorem czerwonym zaznaczono koncentracje 1000-1500 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem zielonym koncentracje 600-1000 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, kolorem niebieskim koncentracje 0- 600 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$)

Fig. 6. Average daily concentration of NO_2 from car traffic in the analysed section of Wawelska Street, taking into account tunnel construction (where 1000-1500 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in red, 600-1000 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in green and 0-600 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ concentrations were marked in blue)

Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem map Google: mapy.google.pl.

Source: Own elaboration with the use of Google maps: maps.google.com.

7. Podsumowanie

Budowa drogowych tuneli komunikacyjnych przyczynia się do znacznego zmniejszenia emisji zanieczyszczeń stałych i gazowych emitowanych do atmosfery. Dotyczy to zwłaszcza tuneli budowanych w celu przekroczenia np. góry lub wzniesienia. Poprowadzenie drogi w trudnym terenie górzystym, o znacznej długości i nachyleniu, powoduje, że poruszające się po niej pojazdy emitują dużą ilość zanieczyszczeń do atmosfery – większą niż w przypadku poruszania się w tunelu o znacznie mniejszym nachyleniu i długości.

Budowa tuneli drogowych w miastach ma na celu m.in. zmniejszenie zanieczyszczeń stałych i gazowych oraz ograniczenie hałasu i drgań w otoczeniu planowanego tunelu, aby zachować np. szczególny charakter danego miejsca. Ruch samochodowy prowadzony pod powierzchnią terenu powoduje nagromadzenie zanieczyszczeń pochodzących ze spalin silników samochodowych, które muszą zostać usunięte z tunelu z powietrzem wentylacyjnym poprzez system wentylacji. Usuwane powietrze, z reguły w jednym lub kilku miejscach (tzw. wyrzutniach), zawiera skumulowane zanieczyszczenia zebrane z kilkuset metrów lub nawet kilku kilometrów, w zależności od długości tunelu i lokalizacji wyrzutni. Budowa tuneli drogowych na silnie zurbanizowanym terenie z reguły wymaga uwzględnienia stacji oczyszczania powietrza, tak aby spełniało ono parametry określone w odpowiednich rozporządzeniach. Przykład takiej stacji znajduje się w tunelu drogowym M30 w Madrycie.

8. Wnioski

Przedstawiony materiał pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Rozwój infrastruktury transportowej na terenach silnie zurbanizowanych wymaga budowy tuneli drogowych.
2. Tunele drogowe ułatwiają komunikację oraz stanowią barierę do rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń stałych i gazowych oraz hałasu na powierzchni terenu, nad tunelem.
3. Wentylacja w tunelach drogowych może powodować nagromadzenie zanieczyszczeń stałych i gazowych usuwanych z obiektu w rejonie jego wylotu lub wyrzutni zużytego powietrza.

4. W celu zapewnienia odpowiednich warunków środowiskowych, w zakresie zanieczyszczeń stałych i gazowych, w rejonie wylotu zanieczyszczonego powietrza wentylacyjnego z tunelu konieczne jest stosowanie stacji oczyszczania powietrza, składającej się ze specjalnych filtrów do redukcji zanieczyszczeń stałych i gazowych.
5. Przeprowadzone badania numeryczne badanego odcinka drogi wykazały, że budowa tunelu bez stacji oczyszczania powietrza może skutkować lokalnymi (w rejonie portalu wylotowego tunelu) zwiększonymi stężeniami ditlenku azotu – do 1500 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, a w przypadku budowy tunelu ze stacją oczyszczania powietrza lokalnie do 150 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$.
6. Budowa stacji oczyszczania powietrza tuneli powoduje zwiększenie kosztów budowy o ok 5%, a jej zastosowanie dla tuneli miejskich w wielu przypadkach jest konieczne do zapewnienia odpowiednich wymaganych przepisami stężeń szkodliwych substancji.

Artykuł został opracowany w ramach grantu: 15.11.100.013

Literatura

- [1] Nawrat S., Napieraj S., Schmidt-Polończyk N., *Możliwości ograniczenia zagrożeń środowiskowych przez zastosowanie tuneli komunikacyjnych*, Wydawnictwo Budownictwo Górnicze i Tunnelowe, Kraków 2014, 11-16.
- [2] Uczkiewicz J., Kwiatkowski K.: *Ochrona powietrza przed zanieczyszczeniami Informacja o wynikach kontroli*, Najwyższa Izba Kontroli LKR-4101-007-00/2014 Nr ewid. 177/2014/P/14/086/LKR, 2014.
- [3] Badyda A.J., Dąbrowiecki P., Czechowski P. O., Majewski G., *Risk of bronchi obstruction among non-smokers—Review of environmental factors affecting bronchoconstriction*, "Respiratory Physiology & Neurobiology" 2015, 209, 39-46.
- [4] European Environment Agency: *Air quality in Europe – 2015*.
- [5] Główny Urząd Statystyczny: *Transport – wyniki działalności w 2014 r.*, Warszawa 2015.
- [6] Badyda A., *Ruch drogowy i zanieczyszczenie powietrza w rejonie ul. Wawelskiej*, materiały z konferencji „Wawelska w tunelu”, Warszawa 2016.

- [7] Bari S., Naser J., *Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel*, "Tunnelling and Underground Space Technology" 2010, 25(1), 70-77.
- [8] McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., Overholt K., *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, NIST, Washington 2013.
- [9] Road Tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee on Road Tunnels Operation (C4), France 2013.
- [10] Schmidt N., *Wybrane aspekty procesu oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń i wentylacji w tunelach drogowych*, „Logistyka” 2013, 4, 484-496.

* * *

prof. dr hab. inż. Stanisław Nawrat – profesor na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Kierownik Zamiejscowego Ośrodka Dydaktycznego w Jastrzębiu Zdroju.

dr inż. Natalia Schmidt-Polończyk – asystentka na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W 2016 roku obroniła rozprawę doktorską pt. *Ocena możliwości stosowania systemu wentylacji wzdłużnej w długich tunelach drogowych*. Obszarem zainteresowań autorki są zagadnienia wentylacji, bezpieczeństwa pożarowego oraz ewakuacji.

mgr inż. Sebastian Napieraj – asystent na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Pracował w międzynarodowych zespołach, między innymi w Norwegii, Ukrainie i Niemczech, zajmuje się zagadnieniami wentylacji i bezpieczeństwa w podziemnych obiektach oraz zwalczaniem zagrożeń naturalnych i wykorzystaniem metanu pokładów węgla w górnictwie.