

# Zastosowanie przybliżenia jednowymiarowego przepływu w zagadnieniach wentylacji tuneli – specyfika, ograniczenia i zalety

WACŁAW DZIURZYŃSKI<sup>ID</sup>, JERZY KRAWCZYK<sup>ID</sup>

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wykorzystanie systemu programu komputerowego VentGraph do symulacji wpływu zanieczyszczeń powietrza lub pożaru na transport gazów pożarowych w tunelu drogowym. Podobieństwo systemów wentylacyjnych kopalń podziemnych i tuneli uzasadnia wykorzystanie programu VentGraph, opracowanego na potrzeby wentylacji kopalń. Przedstawiono przykład symulacji pożaru w tunelu z dwoma korytarzami i złożoną wentylacją nawiewno-wywiewną. Interaktywny interfejs graficzny programu pozwala na natychmiastowe monitorowanie efektów kilku działań, takich jak otwieranie otworów wywiewnych, dostosowywanie ciśnień wentylatorów lub odwrócenie wentylacji. Ze względu na prostotę modelowania numerycznego, oprogramowanie jest w stanie zapewnić animację na żywo stanów nieustalonych przepływu, w tym transportu zanieczyszczeń i rozwoju pożaru w złożonych połączeniach odcinków tuneli drogowych. Ta właściwość jest również przydatna do celów szkoleniowych i edukacyjnych

**Słowa kluczowe:** symulator pożaru, jednowymiarowy model przepływu, sieć połączeń tunelu, studium przypadku, edukacja

## 1. Wprowadzenie

Pierwsze symulacje numeryczne przepływu w tunelach zarówno dla warunków bytowej jak i podczas pożarów prowadzono wykorzystując proste modele o stałych skupionych i jednowymiarowe przybliżenie przepływu. W ciągu ostatnich dwudziestu lat wzrost wydajności komputerów i towarzyszący im rozwój metod numerycznych i oprogramowania CFD umożliwił powszechne stosowanie symulacji trójwymiarowego przepływu.

W prostszych opisach dla pożarów w budynkach stosowano modele dwustrefowe a na potrzeby rozleglejszych obiektów podziemnych (metro i tunele) rozwijano programy takie jak Subway Environment Simulator czy FireTun Vardy'ego [2007].

Systemy wentylacyjne podziemnych systemów wyrobisk wykazują analogie do sieci elektrycznych. Przewodom elektrycznym odpowiadają rurociągi bądź korytarze a ich skrzyżowania to węzły. W sieciach elektrycznych bilansujemy prądy w węzłach i napięcia w oczkach, stosując prawa Kirhoff-a. W sieciach wentylacyjnych bilansowane są strumienie płynących gazów i ciśnienia. Niestety zamiast prawa Ohma dla turbulentnych przepływów straty ciśnienia rosną z kwadratem natężenia przepływu, co narzuca konieczność rozwiązywania układów algebraicznych równań nieliniowych. W 1936 roku H. Cross zaczął w ten sposób rozwiązywać zagadnienia dla sieci hydraulicznych a w połowie XX wieku dla sieci wentylacyjnych zrobili to Hinsley i Scott [1951], a w Polsce Barczyk [1935]. Praktyczne i powszechne zastosowanie tych metod stało się możliwe dopiero po automatyzacji obliczeń przy pomocy komputerów.

W podstawowych wersjach opisy te dają obraz stacjonarnego rozptyłu i warunków klimatycznych. Istnieją też warianty rozszerzone o opis zjawisk zmiennych w czasie – transportu zanieczyszczeń gazowych oraz oddziaływania ogniska pożaru [Dziurzyński i in., 2021; 2022]. Najbardziej rozwinięte wersje

uwzględniają dynamikę ruchu powietrza i opóźnienia związane z bezwładnością a nawet propagację fal ciśnienia i prędkości [Vardy, 2007]. Modele jednowymiarowe mogą być łączone z opisami 3D, co pozwala wykorzystać zalety obu metod. Jest to tak zwane podejście wieloskalowe, które dla tuneli stosował Colella z zespołem [2010].

Programy modelujące stany przejściowe takie jak użyty w niniejszym przykładzie program VentGraph, w szczególności wpływ gorących gazów, transportu zanieczyszczeń, względnie wpływ zmian oporów klap i spiętrzeń wentylatorów na warunki panujące w tunelu i jego systemie wentylacyjnym mogą być użyte do prognozowania odpowiedzi systemów wentylacyjnych na zmienne warunki w takich sytuacjach jak powstanie zatoru bądź wybuch pożaru. W porównaniu z podejściem 3D zaletą uproszczonych opisów jest możliwość przeprowadzenia w krótkim czasie i przy umiarkowanym nakładzie pracy rozległych analiz wielowariantowych. Jednowymiarowy opis nie da informacji o lokalnym zróżnicowaniu warunków środowiskowych, n.p. zasięgu prądów wstecznych i dymu przy stropie, może jednak posłużyć do oszacowania strat ciśnienia, ucieczek powietrza i doboru elementów systemu wentylacji a także dostarczyć informacji o skutkach danej sekwencji regulowania pracą klap i wentylatorów. Wstępnie wyselekcjonowane warianty można potem przetestować z użyciem pełnego trójwymiarowego opisu i w ten sposób otrzymać możliwe dokładne prognozy kosztem umiarkowanego nakładu pracy.

## 2. System programów Ventgraph – prezentacja możliwości

Koncepcja programu Ventgraph powstała pod koniec lat osiemdziesiątych w Pracowni Wentylacji Kopalni Instytutu Mechaniki Górotworu PAN. W Instytucie od lat sześćdziesiątych prowadzono prace nad modelowaniem sieci wentylacyjnych, najpierw metodami analogowymi, a następnie przy pomocy programów komputerowych. Pojawienie się komputerów klasy PC, które łączyły zadowalającą wydajność, prostotę obsługi i możliwości graficznej prezentacji wyników dostarczyło środowiska w którym mogło powstać oprogramowanie, które znacznie ułatwiło modelowanie procesu wentylacji w sieciach o złożonej strukturze. Dalszy rozwój zaowocował rozszerzeniami jego funkcjonalności o współpracę z systemem monitoringu, wspomaganie planowania dróg ucieczkowych, uzupełnieniem opisu o modele przepływu w zrobach, w sieci odmetanownia a także uwzględnienie wilgotności powietrza.

Program VentGraph był również wykorzystywany do modelowania sieci wentylacyjnych tuneli [Napieraj, 2002; Krawczyk i in., 2010]. System wentylacyjny opisywany jest w nim jako sieć wyrobisk, nazywanych bocznicy sieci połączonych węzłami. W wersji do podstawowych analiz przepływ uznaje się za jednowymiarowy i ustalony. Podstawą modelu matematycznego są układy równań opisujące przepływ w bocznicy, bilanse pędu w oczkach sieci i bilanse mas w węzłach.

W module POZAR systemu VentGraph, przeznaczonym do symulacji rozprzysiężania mieszaniny powietrza i gazów pożarowych z przejmowaniem ciepła w sieci wyrobisk górniczych zastosowano tak zwany model quasi-statyczny. Koncepcja modelu quasi-statycznego opiera się na założeniu, że dla wyznaczenia rozprzysiężania powietrza w sieci wyrobisk wystarczy przyjąć układ równań dla stanu ustalonego, natomiast zagadnienie transportu mieszaniny gazów, wymiana ciepła z otoczeniem i rozwój ogniska pożaru są modelowane jako procesy niestacjonarne. Przyjęto następujące założenia dla przepływu w bocznicy wentylacyjnej:

- przepływ jednowymiarowy płynu nieściśliwego,
- gęstość przepływającej mieszaniny jest zależna od składu i temperatury mieszaniny,
- konwekcyjne przejmowanie ciepła z/do górotworu,
- rozkład temperatury w górotworze rozpatrywane w funkcji promienia i długości.

Model zastosowany w programie VentGraph składa się z następujących równań:

- równanie ruchu (zachowania pędu) o stałych skupionych,
- równanie stanu z uwzględnieniem udziałów masowych podstawowych składników (tlen, azot, metan gazy pożarowe),
- równanie Newtona przejmowania ciepła,
- różniczkowe cząstkowe jednowymiarowe równanie rozkładu temperatury w górotworze we współrzędnych walcowych,
- układy równań różniczkowych opisujące transport gazów wygenerowanych przez pożar ( $\text{CO}_2$ , CO) lub punktowe źródła ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ )
- układ równań różniczkowych zwyczajnych opisujący dynamikę ogniska pożaru, które jest dodatkowym, wewnętrznym węzłem w sieci. Boczny dopływ masy w ognisku obrazuje proces wymiany

masy podczas spalania paliwa. Prosty model spalania uwzględnia kaloryczność paliwa i skład oraz ilości gazów zasilających ognisko.

- źródła gazów są wprowadzane jako dopływy boczne o zadawanym przez użytkownika wydatku i stężeniu

W kolejnych krokach czasowych symulacji tych procesów wyznacza się rozkłady stężeń gazów i temperatur, które z kolei wpływają na takie parametry sieci jak opory wyrobisk i depresję pożaru. Dla zmodyfikowanych parametrów sieci jest obliczany nowy, stacjonarny rozptyw, który zostanie uwzględniony w całkowaniu pozostałych równań w kolejnym kroku czasowym. Prowadzenie obliczeń dla wydatków masowych pozwala na zróżnicowanie gęstości w poszczególnych bocznicach i uwzględnienie wpływu wentylacji naturalnej na przepływ.

## 2.1. Opis modelu systemu wentylacyjnego tunelu i sposobu prezentacji wyników symulacji

Na podstawie uzyskane dokumentacji tunelu opracowano numeryczny model (Rys. 1), który obejmuje:

- dwie nawy, długość 2300 m,
- kanał wentylacyjny nawiewny,
- kanał wentylacyjny wywiewny,
- stacje wentylatorów:
  - wentylatory strumieniowe zamontowane w rejonie stropu tunelu,
  - wentylatory ssące zamontowane w stacji wentylatorów w rejonie początku i końca tunelu odprowadzające powietrze zużyte i dymy pożarowe,
  - wentylatory tłoczące zamontowane w stacji wentylatorów w rejonie początku i końca tunelu doprowadzające powietrze świeże do przestrzeni tunelu,
- odcinki łączące atmosferę z portalami i odpowiednio dolotami i wylotami stacji wentylatorów,

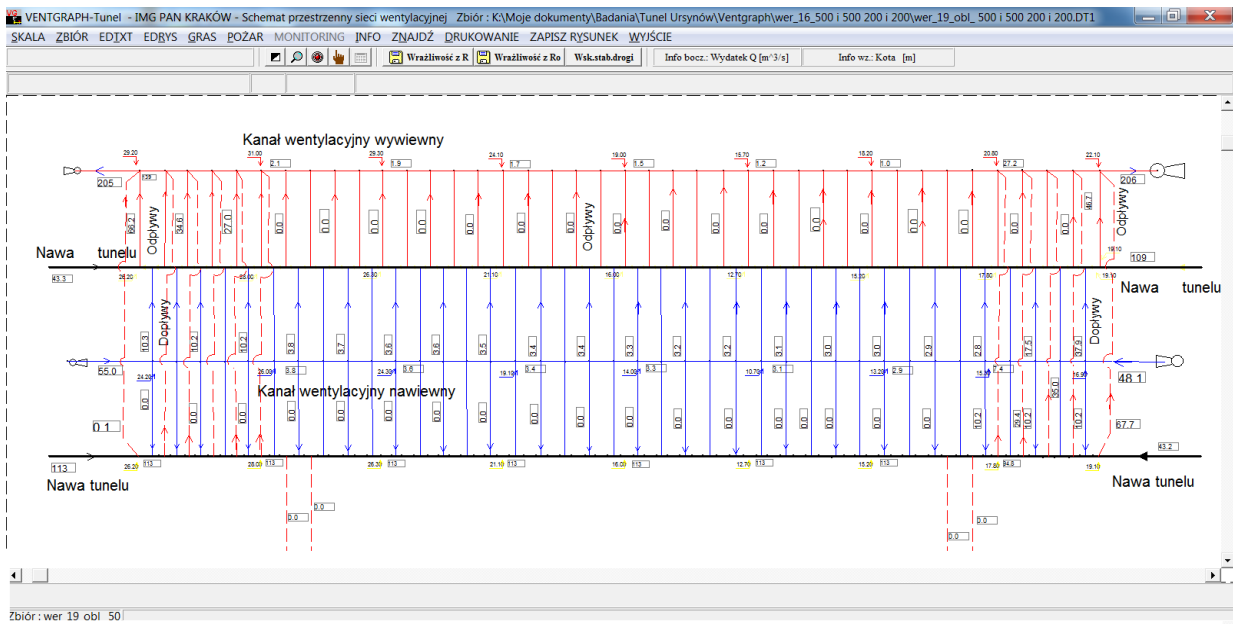
Jednowymiarowy przepływ w bocznicach sieci wentylacyjnej ma reprezentować przepływ w odcinkach tunelu i kanałów wentylacyjnych oraz strugi nawiewanego i odprowadzanego powietrza a także ruch powietrza w atmosferze.

Kanały wentylacyjne podzielono na odcinki pomiędzy parami wyrzutni i czerpni (długość 50 m), każdy z nich jest reprezentowany przez bocznicę sieci. Pominięto przesunięcie między wyrzutniami (czerpniami) połączonymi z jedną i drugą nawą. Wobec naprzemiennego ułożenia czerpni i wyrzutni nawy tunelu podzielono na odcinki o długości 25 m. Strukturę modelu tunelu uzupełniono o dwie bocznicę reprezentujące odcinek od portalu do pierwszej pary wyrzutni i czerpni oraz odcinek od ostatniej pary wyrzutni i czerpni portalu. W odcinkach tych umieszczono wentylatory, odpowiadające wentylatorom strumieniowym.

Modele kanałów wentylacyjnych uzupełniono o pary bocznic reprezentujących stacje wentylatorowe wraz z przyległymi do nich odcinkami kanałów.

Strugi nawiewne i wywiewne są reprezentowane przez krótkie bocznicę o długościach równych odległości od środka przekroju kanału ośrodka przekroju nawy. Odległości osi kanałów i tunelu oszacowano na 10 m. Przekroje odpowiadają polom krętek (1.3 i 5 m<sup>2</sup>). Opory tych bocznic uwzględniają straty ciśnienia na czerpniach bądź wyrzutniach. Na podstawie dokumentacji tunelu, obliczono koty niwelacyjne jezdni przy poszczególnych parach wyrzutni i czerpni. Przyjęto, że oś kanału nawiewnego znajduje się na wysokości jezdni, oś kanału wywiewnego jest 5 metrów wyżej a oś nawy tunelu jest 2 m nad jezdnią. Na tych wysokościach rozmieszczono węzły modelu sieci wentylacyjnej. Zróżnicowanie wysokości węzłów pozwala w pewnym stopniu zobrazować zjawisko konwekcji i depresji cieplnej. Pola przekroju kanałów wentylacyjnych odpowiadają rzeczywistym, podobnie jest z przekrojami odcinków w nawach tunelu. Nie uwzględniono lokalnych zmian przekrojów kanałów w pobliżu wyjść ewakuacyjnych.

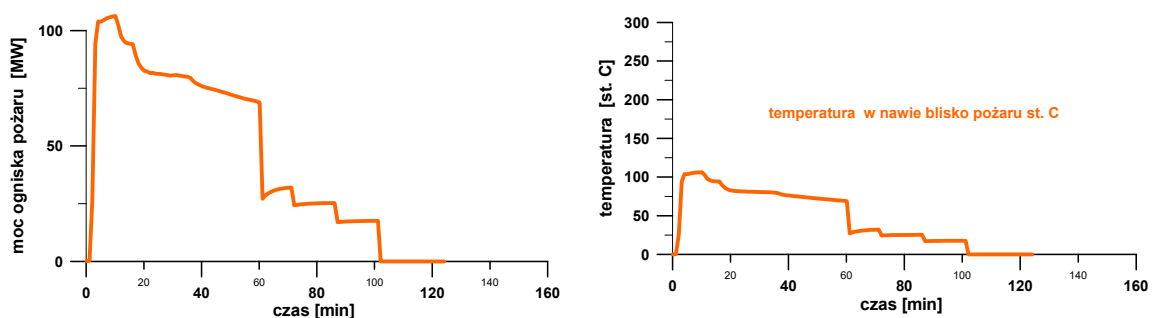
Opisywany przykład dotyczy pracy systemu wentylacyjnego tunelu dla warunków zatoru spowodowanego znaczną liczbą stojących pojazdów znajdujących się w tunelu w obu nawach. Stan ten przedstawia odwzorowany model numeryczny, którego obrazem graficznym jest Rys. 1. Umieszczono na nim główne okno modułu Pożar programu VentGraph. Na białym tle narysowano schemat systemu wentylacyjnego tunelu. Poziome linie czarne odpowiadają nawom tunelu wraz ze strefami dolotu i wylotu do atmosfery. Poziome odcinki niebieskie oznaczają kanały wentylacji nawiewnej oraz stacje wentylatorów. Pionowe odcinki niebieskie to drogi dopływu od kanału nawiewnego poprzez wyrzutnie do nawy tunelu. Podobnie przedstawiono system wentylacji wywiewnej, wyróżniając jego elementy kolorem czerwonym.



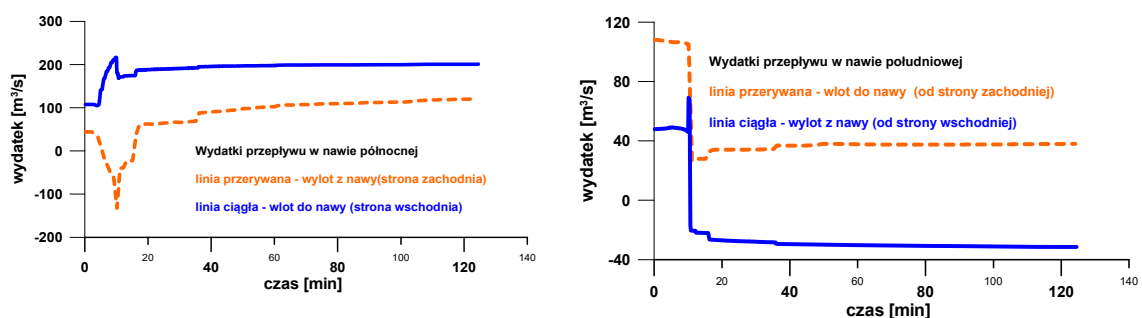
Rys. 1. Stan wentylacji tunelu przy zatorze w obu nawach. W prostokątach strumienie objętości w drogach wentylacyjnych

Kierunki przepływu mieszaniny powietrza i gazów oznaczono strzałkami. Przy ewentualnym odwróceniu przepływu strzałka zmienia swój kształt pokazując aktualny kierunek. W prostokątach przyległych do linii oznaczających poszczególne drogi wentylacyjne są wyświetlane wybrane wielkości fizyczne, w tym przypadku strumienie objętości w  $\text{m}^3/\text{s}$ . Poziome kreski z etykietami i strzałką pełnią funkcję opisów węzłów. Na rysunku etykiety przedstawiają koty niwelacyjne. Dalsze rysunki przedstawiają stan podczas symulacji pożarowej. Używa się w niej skali barwnej do obrazowania stref zadymienia, rozkładów temperatur lub stężeń gazów. Z tego powodu na początku symulacji kolor wszystkich dróg i wentylacyjnych jest zmieniany na zielony, stanowiący tło dla barwnych rozkładów.

Przed symulacją można zdefiniować zestaw wirtualnych czujników monitorujących zmiany wybranych wielkości fizycznych, takich jak wydatki przepływu powietrza (strumienie objętościowe) czy stężenia gazów. Na potrzeby symulacji zdefiniowano czujniki wydatków przepływu przy portalach obu naw (Rys. 3), średnich

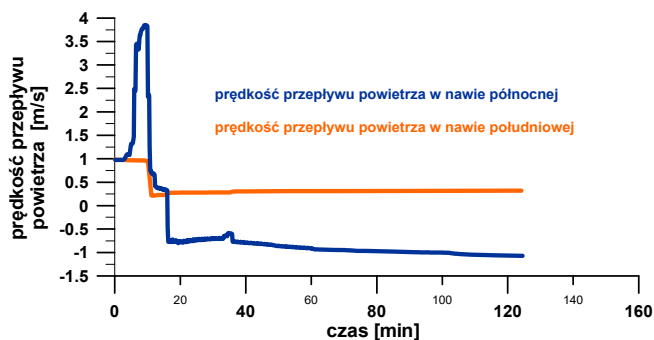


Rys. 2. Zmiany w czasie mocy ogniska pożaru i temperatury w nawie w pobliżu pożaru

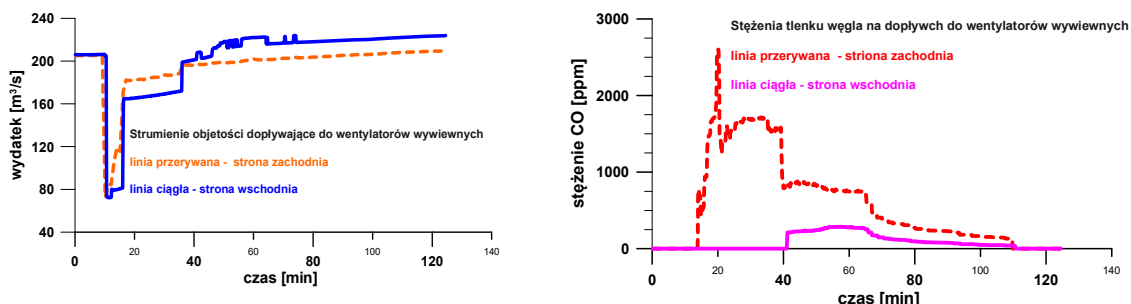


Rys. 3. Wydatki przepływu w pobliżu portali dla nawy północnej i południowej

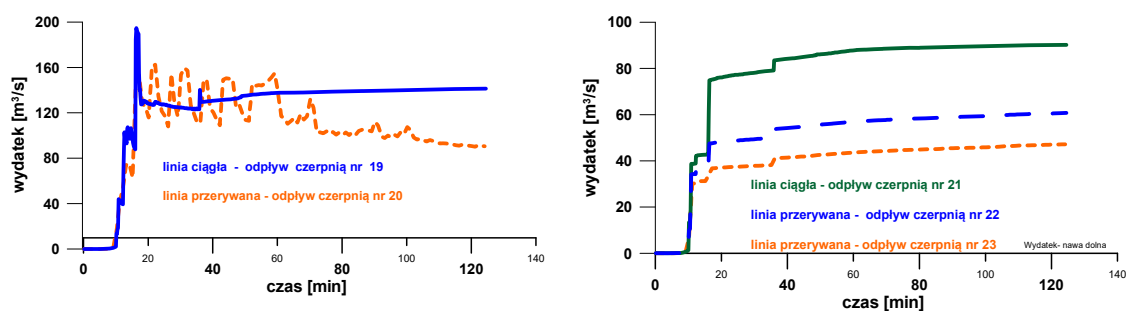
prędkości w nawach (Rys. 4), na dolotach wentylatorów wywiewnych (Rys. 5) i na wylotach wentylatorów nawiewnych (Rys. 8) po wschodniej i zachodniej stronie. Obserwowano też stężenia tlenku węgla na obu krańcach kanału wywiewnego (Rys. 5) a także temperatury w punkcie w pobliżu ogniska i moc pożaru (Rys. 2). Rejestrowano też wydatki (Rys.6) i stężenia tlenku węgla (Rys. 7) w każdej z pięciu czerpni otwartych na potrzeby oddymiania. Wykresy zmian tych wielkości w czasie przedstawiono na rysunkach zamieszczonych poniżej. Obejmują one cały przebieg symulacji i będą odnosiły się do poszczególnych etapów.



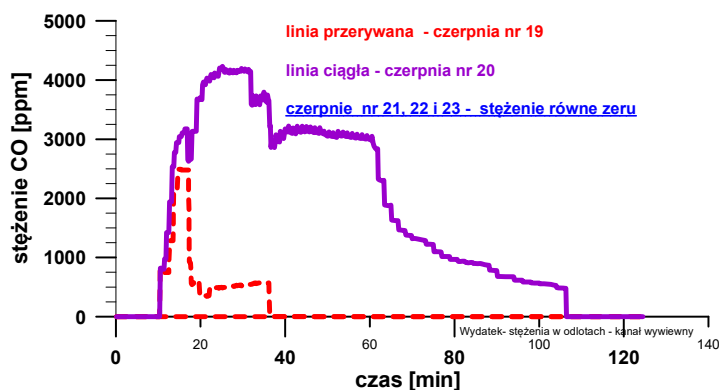
Rys. 4. Średnie prędkości przepływu powietrza w nawie północnej i południowej



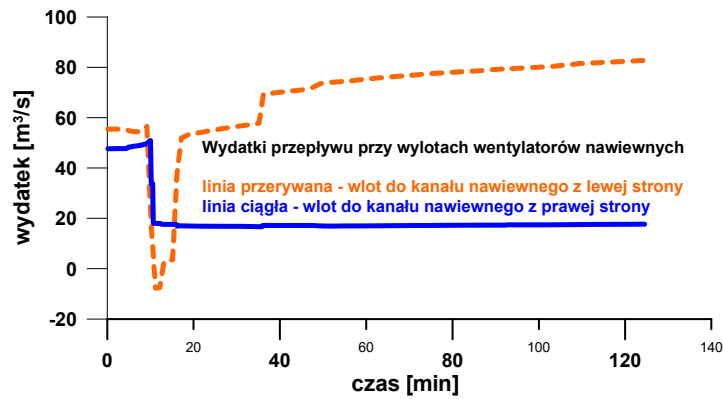
Rys. 5. Wydatki przepływu i stężenia tlenku węgla na dolotach wentylatorów wywiewnych



Rys. 6. Wydatki przepływu dla czerpni usuwających dymy (czerpnie nr 19 do 23, licząc od strony zachodniej)



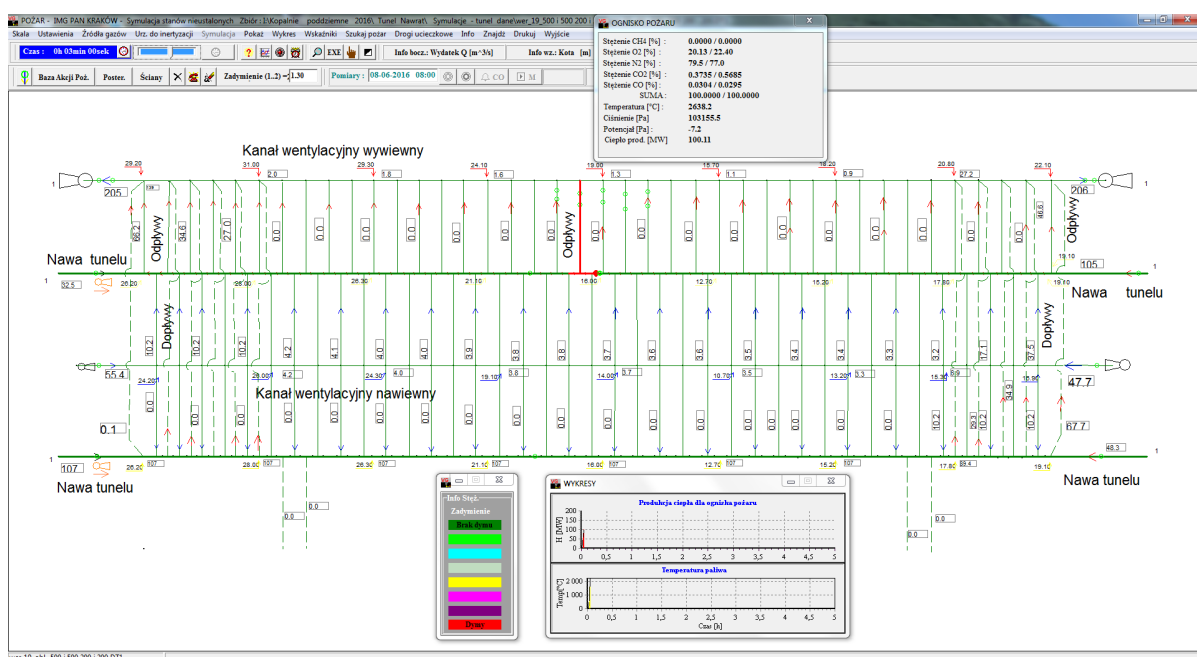
Rys. 7. Stężenia tlenku węgla dla czerpni usuwających dymy



Rys. 8. Wydatki przepływu przy wylotach wentylatorów nawiewnych

### 3. Warunki początkowe – zator w obu nawach

Dobrano spiętrzenia wentylatorów nawiewnych tak, by w każdej nawie pięcioma otwartymi wyrzutniami dopływało po około  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Podobnie wentylację wywiewną prowadzono tak, by w każdej nawie pięcioma otwartymi czerpniami odprowadzało po  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zgodnie z założeniami odnośnie systemu wentylacji otwarte czerpnie i wyrzutnie znajdowały się w końcowych odcinkach naw – w północnej po stronie zachodniej, a w południowej po stronie wschodniej. Przyjęty sposób regulacji systemów nawiewnego i wywiewnego, w którym występują znaczne różnice między ilościami powietrza dostarczanego wyrzutniami i ujmowanego czerpniami wymusza przepływ wzdłużny w nawach tunelu. Dla obu naw obszar wentylacji poprzecznej znajduje się znacznie bliżej jednego portali, co powoduje, że jest on znacznie silniej przewietrzany niż drugi, dłuższy odcinek. W koncepcji systemu wentylacyjnego tunelu przewidziano, że wentylatory strumieniowe rozmieszczone w nawach tunelu mają między innymi zapewnić właściwe proporcje między strumieniami powietrza przewietrzającymi wzdłużnie oba odcinki. W modelu numerycznym dobrano spiętrzenia wentylatorów umieszczonych w nawach tunelu tak, aby dłuższy odcinek był przewietrzany większym strumieniem, gdyż w tym odcinku znajduje się większość pojazdów generujących zanieczyszczenia. Przyjęto jednakowe opory wyrzutni i czerpni. W symulacji natężenia dopływów rozkładają się równomiernie, na poziomie  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , jednak strumienie ujmowane przez czerpnie są zróżnicowane w zakresie od ok. 30 do  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , co jest związane ze stratami przepływu w odcinkach kanałów wywiewnych.

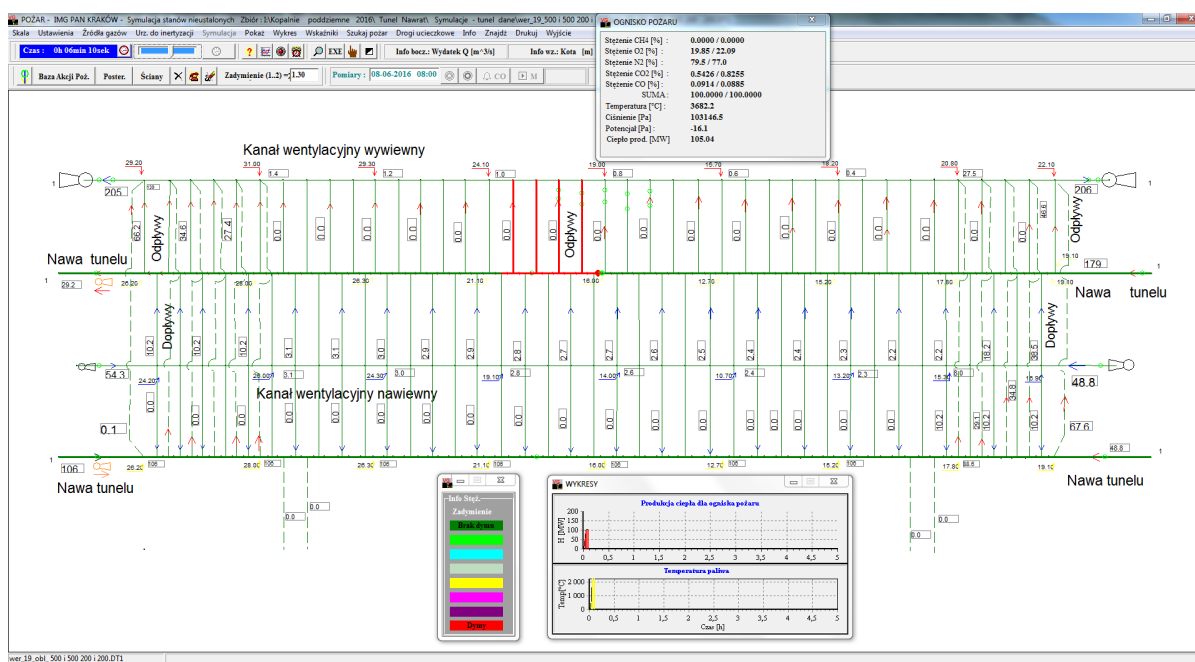


Rys. 9. Faza I – Rozwój pożaru, stan zadymienia po 3 minutach

## 4. Pożar w nawie północnej

### 4.1. Faza I – Rozwój pożaru

Przyjęto miejsce pożaru w nawie północnej w połowie jej długości (ok. 1160 m od portalu wschodniego), pomiędzy wyrzutnią 20 i czerpnią 21, licząc od strony zachodniej. Użyto standardowego dla Ventgraph-a modelu ogniska pożaru dobierając jego parametry kontrolne (stała czasowa rozwoju 60 s, max długość 50 m, intensywność 10) tak, by w czasie kilku minut osiągać moc około 100 MW (Rys. 2). Stan zadymienia i rozptyłu po trzech minutach przedstawia Rys. 9. Dymy w nawie płyną w stronę zachodnią i strefa zadymiona ma długość około 100 m. Czerpnie są zamknięte i dlatego ujmują pomijalnie małą ilość dymów a oznaczenia zadymienia (kolor czerwony) są związane z przeciekami. Strefa zadymiona jest niewielka i dlatego oddziaływanie pożaru na rozptył w systemie wentylacyjnym jest nieznaczne. Przyjęto, że przeciwdziałanie skutkom pożaru rozpocznie się po 6 minutach. Stan dla tej chwili przedstawia Rys. 10.



Rys. 10. Faza I – Rozwój pożaru, stan zadymienia po 6 minutach

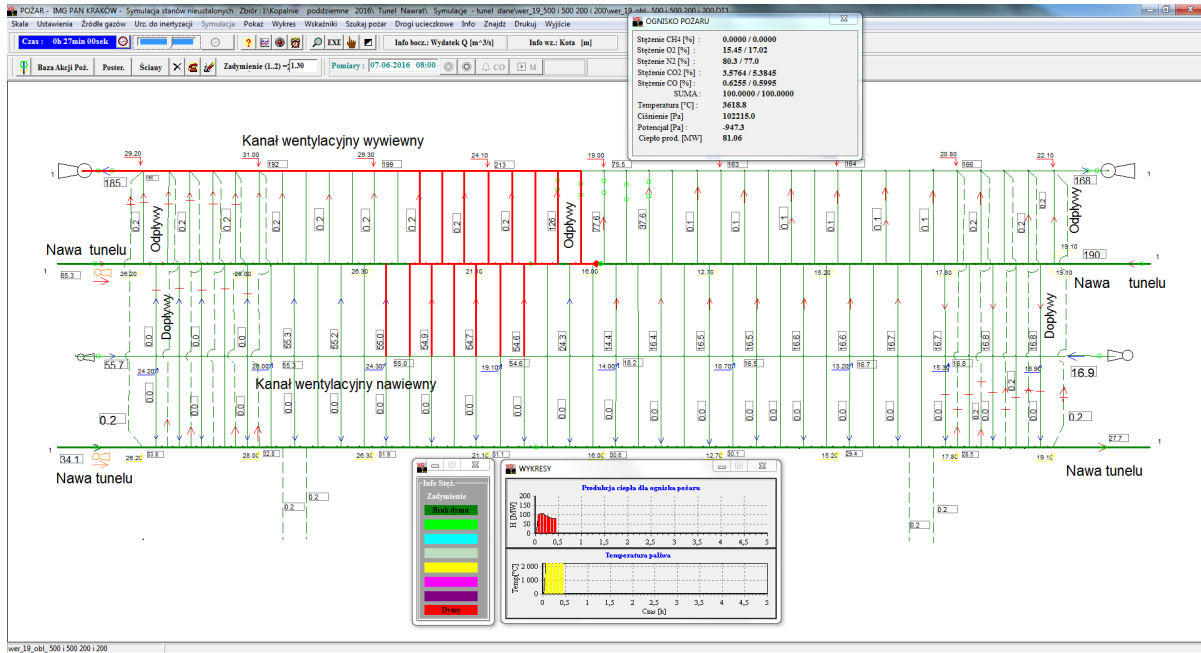
### 4.2. Faza II – Akcja przeciwpożarowa

Po wykryciu i zlokalizowaniu miejsca pożaru przystąpiono do działań mających na celu ograniczenie strefy zadymionej. Wykonano następującą sekwencję czynności:

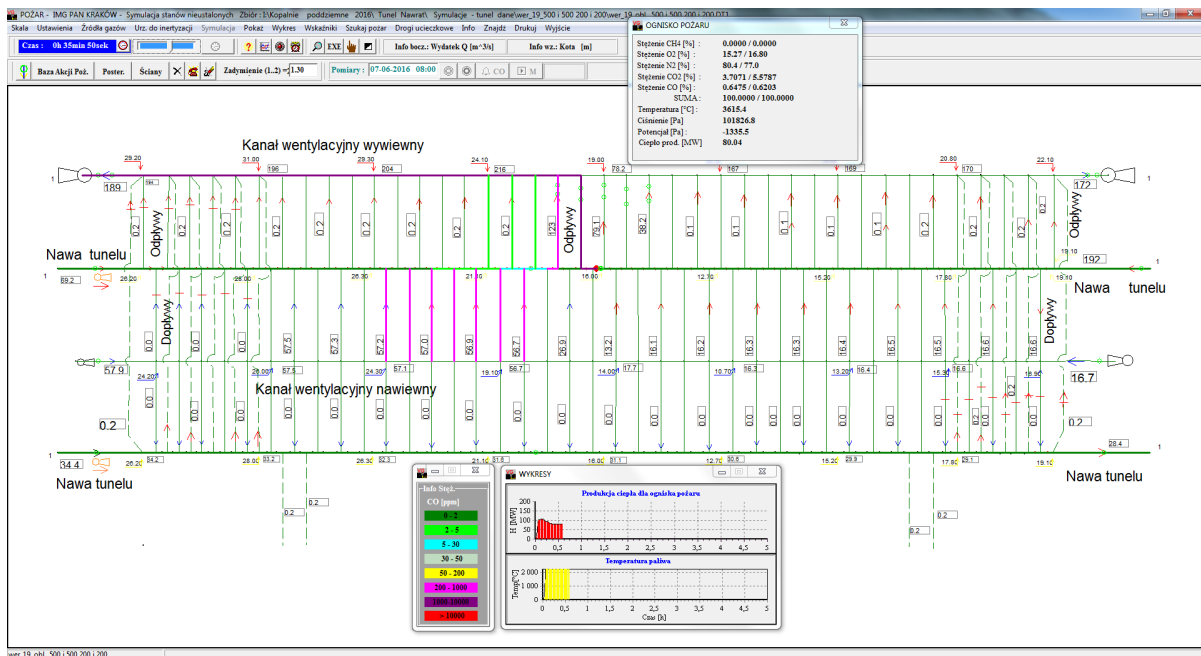
- Czas 6-7 minuta – w ciągu 1 minuty otwarto pięć par czerpni i wyrzutni w otoczeniu ogniska pożaru (numery 19 do 23 licząc od strony zachodniej).
- Czas 9-10 minuta – zamknięto czerpnie i wyrzutnie używane do zwalczania skutków zatoru.
- Czas 11 minuta – podniesiono spiętrzenia na wentylatorach wywiewnych do 3000 Pa a na wentylatorach nawiewnych do 1000 Pa, oraz zwiększono spiętrzenie wentylatora strumieniowego w zachodniej części nawy północnej, by powietrze w nawie po zachodniej stronie ogniska płynęło w stronę pożaru, przeciwdziałając propagacji dymów w stronę portalu zachodniego.
- Czas 12 minuta – dalszy wzrost depresji na wentylatorach wywiewnych do 5000 Pa.
- Czas 42 min – wzrost depresji na wentylatorach wywiewnych po stronie wschodniej do 6000 Pa, dla uzyskania równomiernego dopływu gazów pożarowych do obu czerpni.
- Czas 1 godzina – gaszenie pożaru – obniżanie intensywności ogniska pożaru do 0.

Otwarcie czerpni i wyrzutni powoduje znaczny wzrost wydatków przepływu pokazany na Rys. 6. Jednak ilości ujmowanego powietrza są zróżnicowane, co wynika z tego, że przy znacznych prędkościach przepływu nabierają znaczenia straty w odcinkach kanału wywiewnego pomiędzy poszczególnymi czerpnia-

mi. Obserwując kierunki przepływu w kanale wywiewnym widać, że następuje rozdział strumieni powietrza na stronę zachodnią i wschodnią (Rys. 11). Zadymienie w nawie skierowało się w stronę wschodnią, dlatego gazy pożarowe ujmują głównie czerpnie nr 19 i 20 o czym świadczą wykresy stężeń tlenu węgla, przedstawione na Rys. 7. Model jednowymiarowy nie uwzględnia zjawiska prądów wstecznych. W rzeczywistości przy prędkości w nawie rzędu 1 m/s (Rys. 4) część dymów skierowałyby się w stronę czerpni nr 21 do 23 i w produkty pożaru płynęłyby również kanałem wywiewnym w stronę wschodnią.



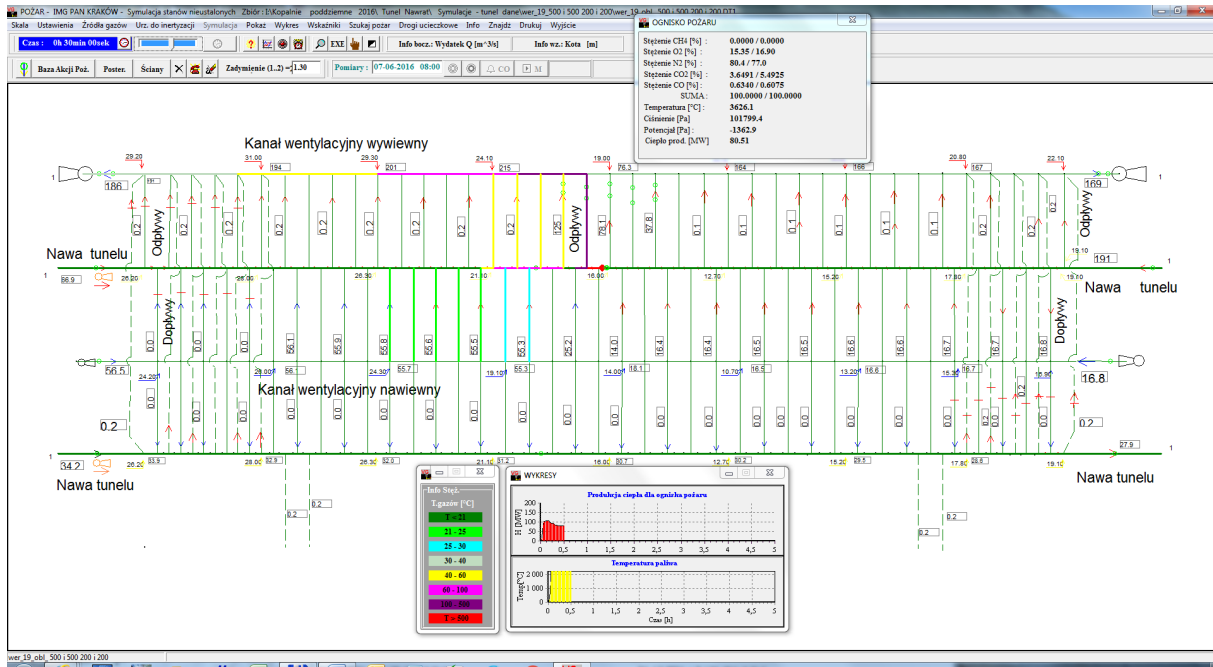
Rys. 11. Stan zadymienia tunelu w 27 minucie pożaru



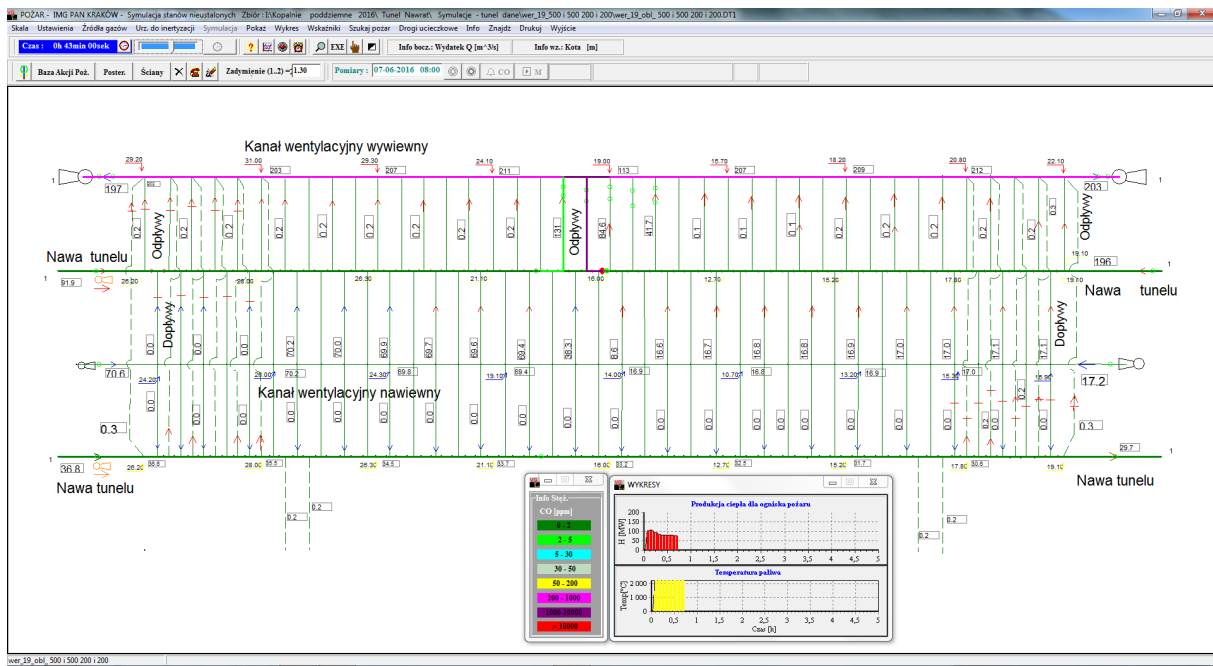
Rys. 12. Rozkłady stężeń tlenu węgla w systemie wentylacyjnym tunelu w 30-iej minucie pożaru

Zamknięcie 10 czerpni realizujących wentylację dla zatoru w obu nawach przy otwarciu pięciu czerpni dla oddymiania powoduje znaczny wzrost oporów na drodze odsysania powietrza i spadek przepływu w kanale wywiewnym (Rys. 5). Jest on skompensowany przez wzrost spiętrzenia wentylatorów wywiewnych, zrealizowany w 11 i 12 minucie symulacji.



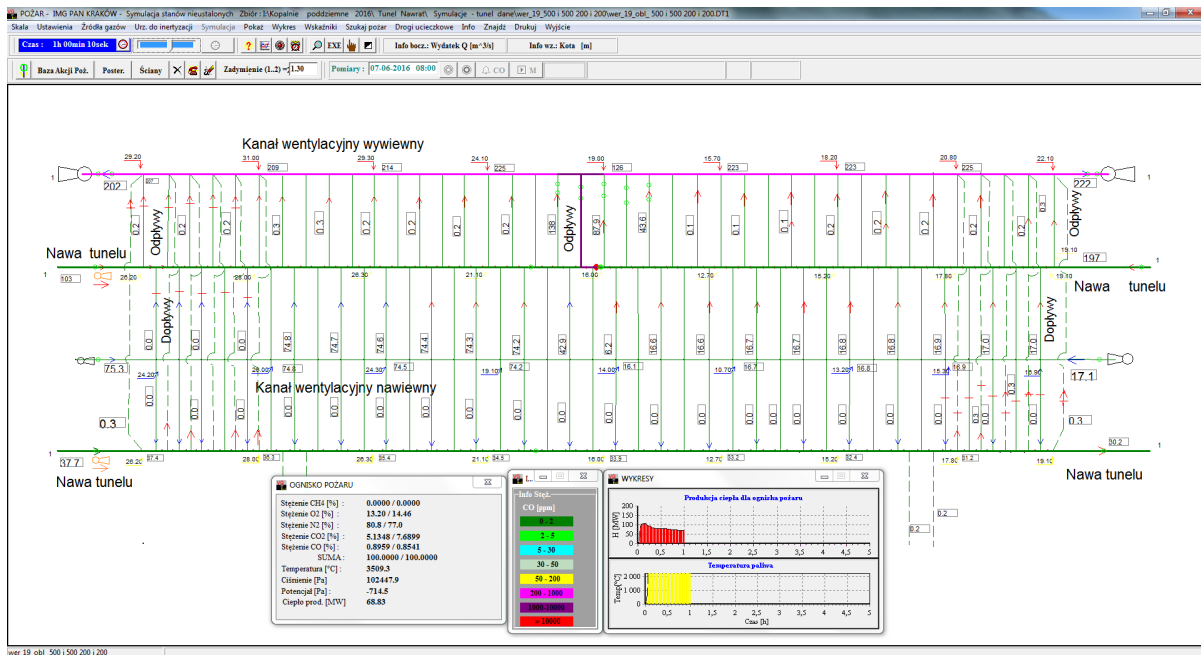


Rys. 13. Rozkłady temperatury w systemie wentylacyjnym tunelu w 30-ej minucie pożaru

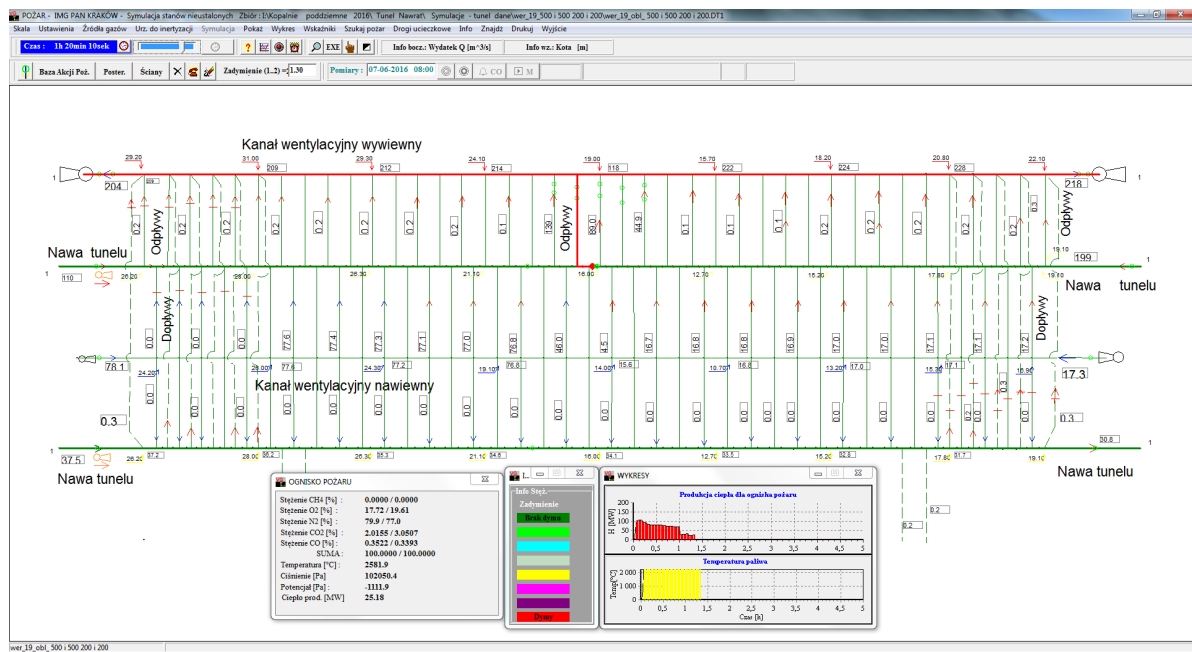


Rys. 14. Obustronny rozptył gazów pożarowych w kanale wywiewnym po podniesieniu ciśnienia wentylatorów wywiewnych po stronie wschodniej

Podniesienie ciśnienia wentylatora do 5 kPa dało ilość ujmowanego powietrza bliską założonej (Rys. 5). Kanał wywiewny, podobnie jak nawa jest nachylony, dlatego w odcinku zachodnim który według symulacji ujmuje gazy pożarowe płynię większy wydatek, co jest związane z dodatkowym ciągiem generowanym przez gorące gazy. Różnice te skompensowano zwiększając w 42 minucie ciśnienie wentylatorów wywiewnych po stronie wschodniej do 6 kPa (Rys. 14).



Rys. 15. Rozkłady stężeń tlenku węgla w systemie wentylacyjnym tunelu po upływie 1 godz. 10s



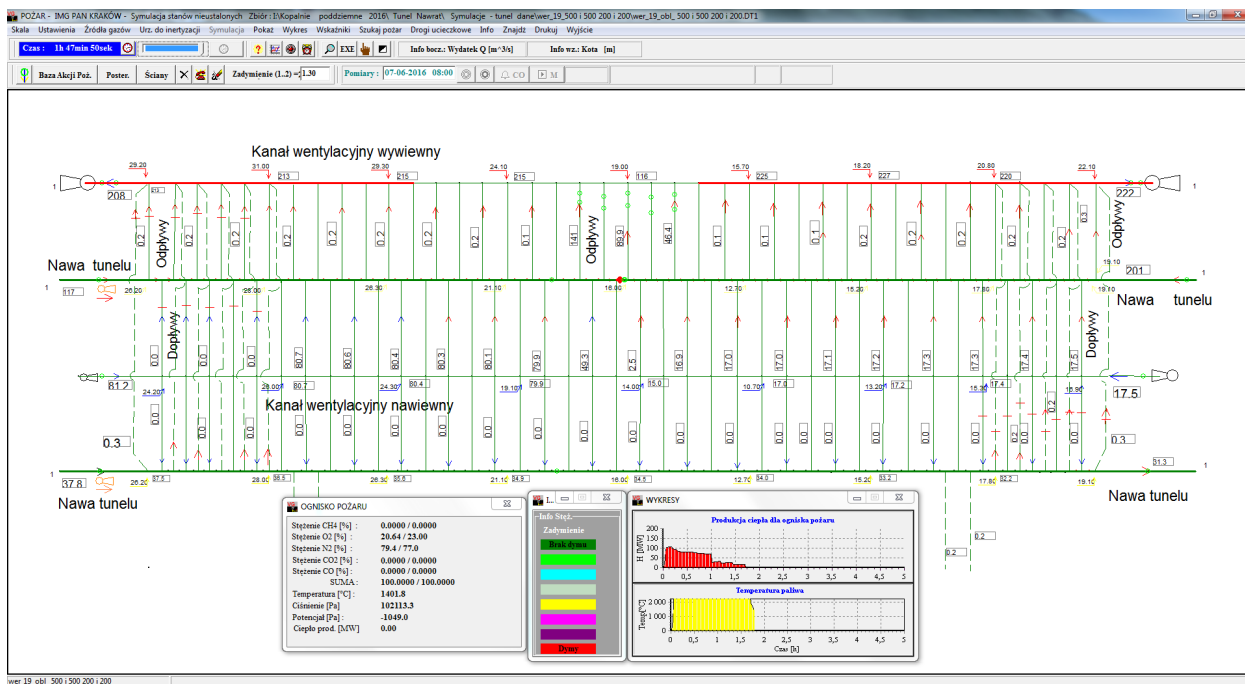
Rys. 16. Stan zadymienia po spadku mocy pożaru

### 4.3. Faza III Gaszenie pożaru i oddymianie

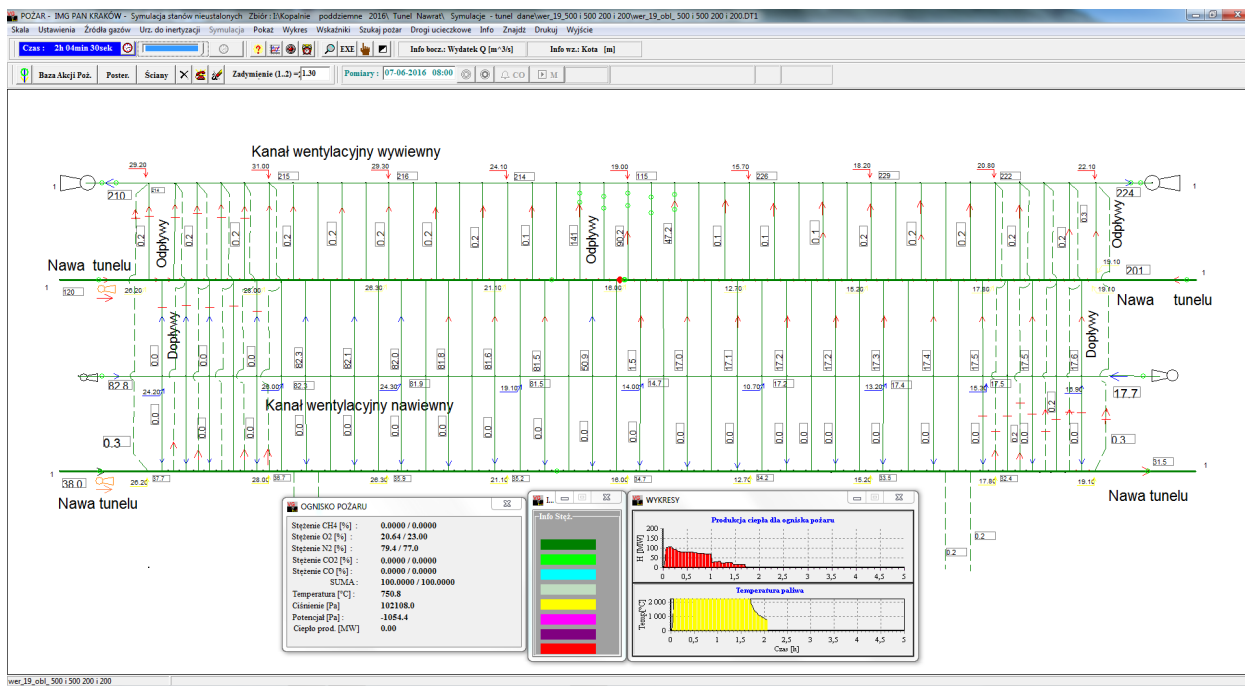
Proces gaszenia pożaru modelowano jako stopniowe zmniejszanie intensywności procesów zachodzących w jego ognisku. Kolejne rysunki przedstawiają stany zadymienia i spadek mocy pożaru.

## 5. Uwagi końcowe, wnioski

- Opracowano model numeryczny sieci wentylacyjnej dwunawowego tunelu ze wspólną parą kanałów nawiewnego i wywiewnego wraz z układem wentylatorów i klap w standardzie programu VentGraph.
- Dobrano parametry modelu tak, by spełniał założenia projektowe w zakresie przewietrzania w warunkach zatoru i pożaru podziemnego.



Rys. 17. Czas 1 godz. 47 min – stan w rozprywie świadczący o oddymieniu nawy tunelu, dymy tylko w kanałach wywiewnych pożarowych



Rys. 18. Czas 2 godz. 4 min. –system wentylacji bez dymów

- Symulacja pokazała zdolność systemu wentylacji do kontrolowania strefy oddziaływania pożaru w celu odgraniczenia rozprzestrzeniania się dymów podczas ewakuacji i utrzymania dostępu do ogniska w celu jego ugaszenia.
- Obliczenia wskazują na znaczny przedział zapotrzebowania na spiętrzenie wentylatorów wywiewnych i nawiewnych oraz strumieniowych wynikający z możliwości wystąpienia pożaru w różnych miejscach tunelu możliwość wystąpienia dwóch wariantów zatoru (jedno lub obustronny).
- Użycie dwóch stacji wentylatorów na krańcach tunelu może powodować nierównomierny rozdział powietrza w kanałach nawiewnym i wywiewnym i potrzebę ewentualnej kompensacji tej rozbieżności.

- Zróżnicowanie wymagań odnośnie parametrów pracy wentylatorów wywiewnych i nawiewnych wskazuje na potrzebę wyboru modeli o zmiennych charakterystykach (regulacja obrotów, regulacja kątów łopatek wentylatorów) i stosowania systemu kontrolno-pomiarowego dla regulacji ich pracy w celu zapewnienia założonych ilości powietrza przy zmiennych ilościach i położeniu czynnych wyrzutni i czerpni.
- Przewidywane zróżnicowanie zapotrzebowania na wydajność, miejsce oddziaływania i kierunek pracy wentylatorów strumieniowych wskazują na potrzebę stosowania systemu kontrolno pomiarowego pracy tychże wentylatorów
- Symulacje pokazały negatywne skutki rozszczelnienia lub niesprawności systemów kontrolujących zamykanie klap, szczególnie dotyczy to warunków akcji pożarowej
- Oprogramowanie stosujące modele jednowymiarowego przepływu może być użytecznym narzędziem do prac koncepcyjnych i projektowych systemów wentylacyjnych tuneli pod warunkiem uwzględnienia cechujących je ograniczeń i w skojarzonym użyciu z dokładniejszymi, lecz bardziej czasochłonnymi metodami 3D.

## Literatura

- Barczyk S., (1935): *Obliczanie złożonych systemów wentylacyjnych sposobem zbieżnych przybliżeń*. Diploma dissertation at Mining Department of AGH University of Sci and techn., Kraków.
- Colella F., Rein G., Borchiellini R., Torero J.L., (2010): *A Novel Multiscale Methodology for Simulating Tunnel Ventilation Flows During Fires*. Fire Technology. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0144-2>
- Cross H., (1936): *Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors*. Bulletin 286, Engineering Experiment Station, University of Illinois.
- Hinsley F.B., Scott R.(1951): *Ventilation Network Theory*. Coll. Eng. 28, 29.
- Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., (2021): *Modele matematyczne programu VentGraph Plus*. monografia, wydawnictwo Instytut Mechaniki Górotworu PAN.
- Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., (2022): *Podręcznik użytkownika programu VentGraph Plus z przykładami*. Monografia. Wyd. Instytut Mechaniki Górotworu PAN.
- Krawczyk J., Dziurzyński W., Pałka T., Skotniczny P., Rossotto R., (2010): *Adaptation of mine ventilation software VENTGRAPH to simulation of propagation of gas contaminants in tunnels during normal operation and fires*. Proc. of the Fourth Int. Symp. on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, pp 549-552.
- Napieraj S., (2002): *Zasady przewietrzania, klimatyzacji i bezpiecznej eksploatacji podziemnych tuneli komunikacyjnych*. Praca dyplomowa AGH.
- Dziurzyński W., Krawczyk J., (2012): *Modelling propagation of gas contaminants in tunnels during normal operation and fires with mine ventilation software VENTGRAPH*. Materiały Konferencji Budownictwo Podziemne i Bezpieczeństwo w Komunikacji Drogowej i Infrastrukturze Miejskiej, Kraków 19-20.04.2012, str. 87-94.
- Vardy, A.E. 2007: <http://www.thermotun.com/>

## Application of one-dimensional flow approximation in tunnel ventilation problems, specificity, limitations and advantages

### Abstract

The article presents the use of the VentGraph computer program system to simulate the impact of air contaminants of fire on the transport of fire gases in a road tunnel. The similarity similarities of the ventilation systems of underground mines and tunnels justifies the use of the VentGraph program, developed for the needs of the mine ventilation. An example of a fire simulation in a tunnel with two aisles and a complex supply and exhaust ventilation is presented. The program's interactive graphical interface allows you to immediately monitor the effects of several actions, such as opening exhaust vents adjusting the fan pressures or reversing ventilation. Due to the simplicity of numerical modeling, the software is able to provide live animation of flow transients, including pollutant transport and fire development in complex connections of road tunnel sections. This property is also useful for training and educational purposes

**Keywords:** fire simulator, one-dimensional flow model, tunnel connection network, case study, education