UKD 622.333:622.81/.82:622.4

Wpływ prędkości powietrza przepływającego przez ścianę na przewietrzanie zrobów zawałowych i profilaktykę pożarową

The influence of air velocity flowing through the lognwall on the goaf ventilation and fire prevention

Mgr inż. Lucjan Świerczek)*

Treść: W artykule omówiono wyniki symulacji komputerowych przepływu powietrza przez wyrobisko oraz zroby ściany prowadzonej z zawałem stropu przewietrzanej sposobem na „U" w aspekcie zagrożenia pożarem endogenicznym. W utworzonym modelu numerycznym geometria wyrobisk górniczych oraz zadawane prędkości powietrza odpowiadały warunkom występującym w ścianie wydobywczej prowadzonej na jednej z kopalń węgla kamiennego. Symulacje komputerowe przeprowadzono dla stanu ustalonego i nieustalonego. W przypadku stanu ustalonego do obliczeń wykorzystano wybrane, stałe wartości prędkości powietrza przepływającego przez ścianę, zaś dla stanu nieustalonego zasymulowano zmienny przepływ powietrza, zgodnie ze wskazaniami czujnika prędkości zabudowanego w chodniku nadścianowym rozpatrywanej ściany. Wykazano znaczny wpływ zmian prędkości powietrza płynącego przez ścianę na zasięg strefy przewietrzanej w zrobach, która odgrywa bardzo duże znaczenie w procesie samozagrzewania węgla. Przedstawiono także przykład wykorzystania w profilaktyce pożarowej zmniejszonego zasięgu ww. strefy.

Abstract: This paper describes the results of computer simulations of the air flow that goes through excavations and goaf of longwall ventilated with the „U" system, all that in the context of endogenous fire hazard. In the created numerical model the geometry of mine workings and air velocities correspond to the conditions of one of the existing longwall. The simulations were performed for both steady and transient states. In the steady state the selected, fixed values of air speed passing through the longwall were used. For transient simulations variable air speed was used according to the values indicated by the speed sensor built in the top gate of the longwall. It has been shown that there is a significant influence of the changes of the speed of air flowing through the longwall in the range of the ventilated area in a goaf, which have a very important role in the process of selfheating of coal. The paper also presents an exemplary use of the reduced range of the mentioned zone in the fire prevention.

Słowa kluczowe:

górnictwo, przewietrzanie ściany, zagrożenie pożarowe, modelowanie numeryczne

Key words:

mining, ventilation of longwall, fire hazard, numerical modeling

1. Wprowadzenie

Podczas eksploatacji pokładów węgla systemem ścianowym z zawałem stropu często zachodzi konieczność pozostawienia pewnej ilości węgla w zrobach. Jest to wymuszone najczęściej przez niesprzyjające warunki geologiczno-górnicze. Pozostawianie węgla w zrobach zawsze wiąże się z możliwością jego samozagrzania, co z kolei może doprowadzić do powstania pożaru endogenicznego.

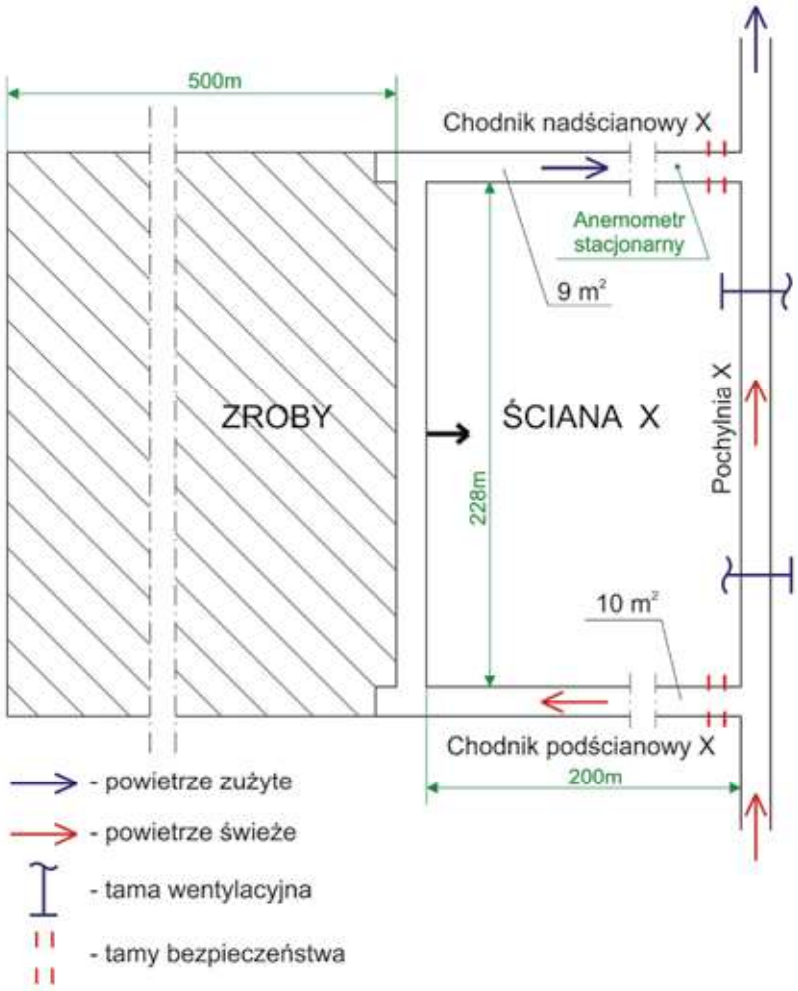
Jednym z czynników, które w istotny sposób wpływają na proces samozagrzewania węgla jest prędkość powietrza przepływającego przez rozkruszony węgiel [5], [8]. Jeżeli powietrze płynie ze zbyt dużą prędkością, wtedy ciepło generowane w ognisku samozagrzania jest wynoszone poza to ognisko, natomiast zbyt mała prędkość powietrza prowadzi do deficytu tlenu w zagrzewającej się masie węglowej. Pomiędzy tymi prędkościami zawiera się przedział prędkości, który zapewnia odpowiednie warunki dla podtrzymania procesu samozagrzewania węgla.

Najtańszą profilaktyką pożarową stosowaną w kopalniach jest odpowiednio duży postęp ściany, który ma na celu jak najszybsze pozostawienie utleniającego się węgla w strefie niedoboru tlenu. Czas osiągnięcia przez węgiel strefy zawierającej bezpieczne stężenie tlenu powinien być krótszy niż okres inkubacji pożaru endogenicznego wyznaczony dla danego węgla.

W artykule omówiono wyniki symulacji komputerowych wpływu zmian intensywności przewietrzania rejonu ściany na głębokość wcześniej opisanej strefy. Analizie poddano ścianę wydobywczą prowadzoną z zawałem stropu w jednej z kopalń węgla kamiennego, przewietrzaną sposobem na „U".

Obliczenia numeryczne przepływu powietrza przez wyrobiska oraz zroby tej ściany wykonano w programie ANSYS CFX, który bazuje na metodzie objętości skończonych MOS. Oznacza to, że model geometryczny jest dzielony na skończoną liczbę elementów. Elementy te posiadają węzły otoczone objętościami, dla których rozwiązywane są równania oparte o zasadę zachowania: energii, masy i momentu.

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice



Rys. 1. Parametry wyrobisk oraz schemat przewietrzania ściany X
Fig. 1. Parameters of excavations and longwall X ventilation scheme

2. Model numeryczny i dane wejściowe przyjęte do obliczeń

2.1. Model numeryczny rejonu ściany

Analizie poddano ścianę wydobywczą prowadzoną w jednej z kopalń węgla kamiennego – na potrzeby artykułu ścianie nadano nazwę X. Geometrię rejonu ściany X przedstawiono na rysunku 1.

Podczas tworzenia modelu geometrycznego ściany X oraz wyrobisk przyścianowych oparto się na informacjach uzyskanych od pracowników wentylacji kopalni X oraz odczytanych z map pokładowych. Jedyny problem stanowiła wysokość zrobów, dla której należało zasymulować przepływ powietrza. Pomocną w tej kwestii okazała się praca [10], w której założono, że wysokość zrobów do jakiej odbywa się przepływ powietrza wynosi $3{,}5 \times m$, gdzie m oznacza miąższość pokładu węgla. Po odczytaniu tego parametru dla przedmiotowej ściany X do obliczeń przyjęto, że wysokość zrobów będzie wynosiła 8 m.

Model geometryczny ściany wykonano w programie Design Modeler, który jest częścią pakietu Ansys Workbench. Natomiast siatka objętości skończonych została utworzona w programie CFX-Mesh. Rysunek 2 przedstawia połączenie wyrobisk przyścianowych oraz ściany X ze zrobami, z naniesioną siatką objętości skończonych.

Jak wiadomo, im bardziej gęsta jest siatka obliczeniowa, tym dokładniejsze uzyskuje się wyniki – niestety dzieje się to kosztem wydłużenia czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń. Siatka objętości skończonych wygenerowana dla modelu ściany X oraz wyrobisk przyścianowych składała się z następującej liczby elementów:

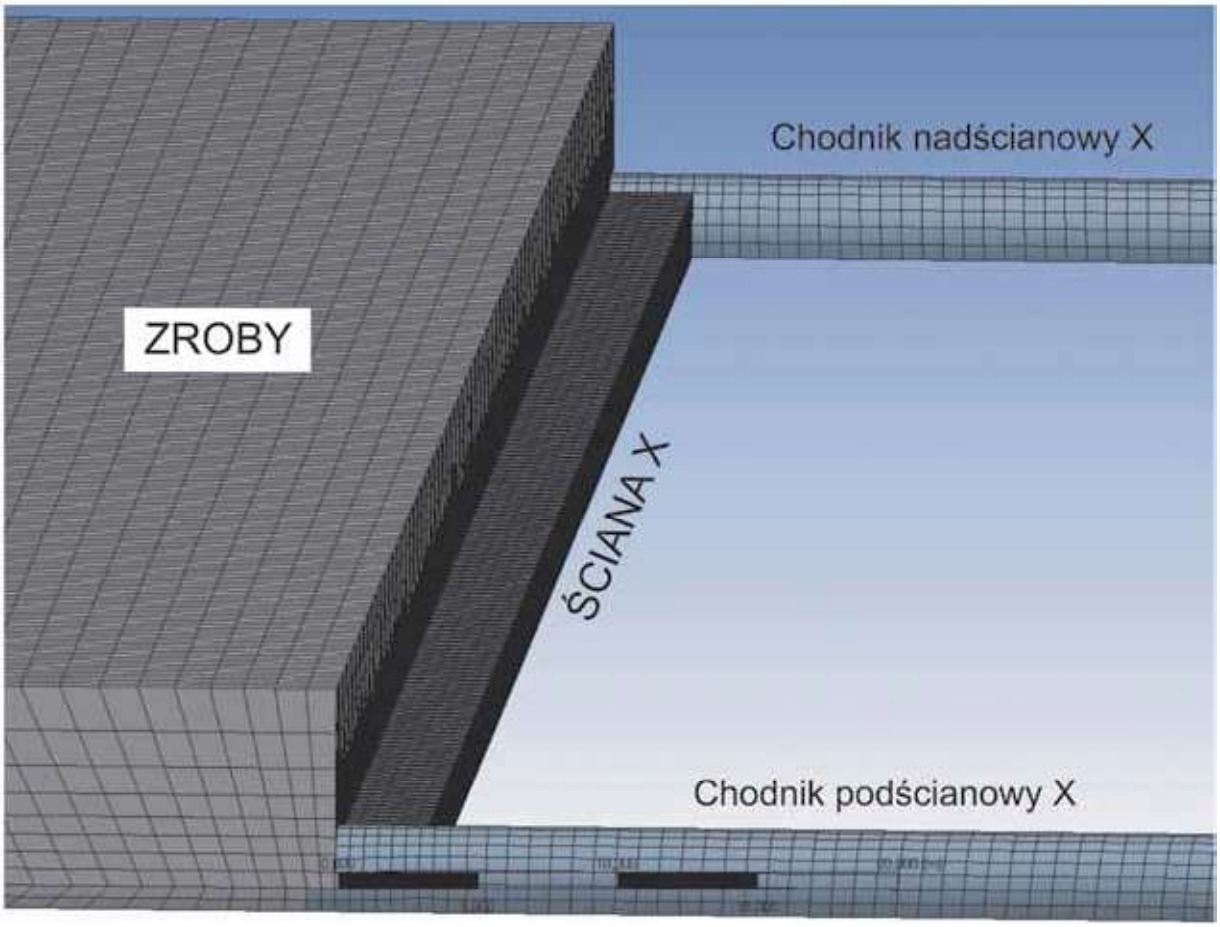
- wyrobiska przyścianowe razem ze ścianą: 36 320 elementów oraz 44 256 węzłów;
- zroby zawałowe: 590 638 elementów oraz 597 423 węzłów.

2.2. Ilość powietrza płynącego przez rejon ściany X

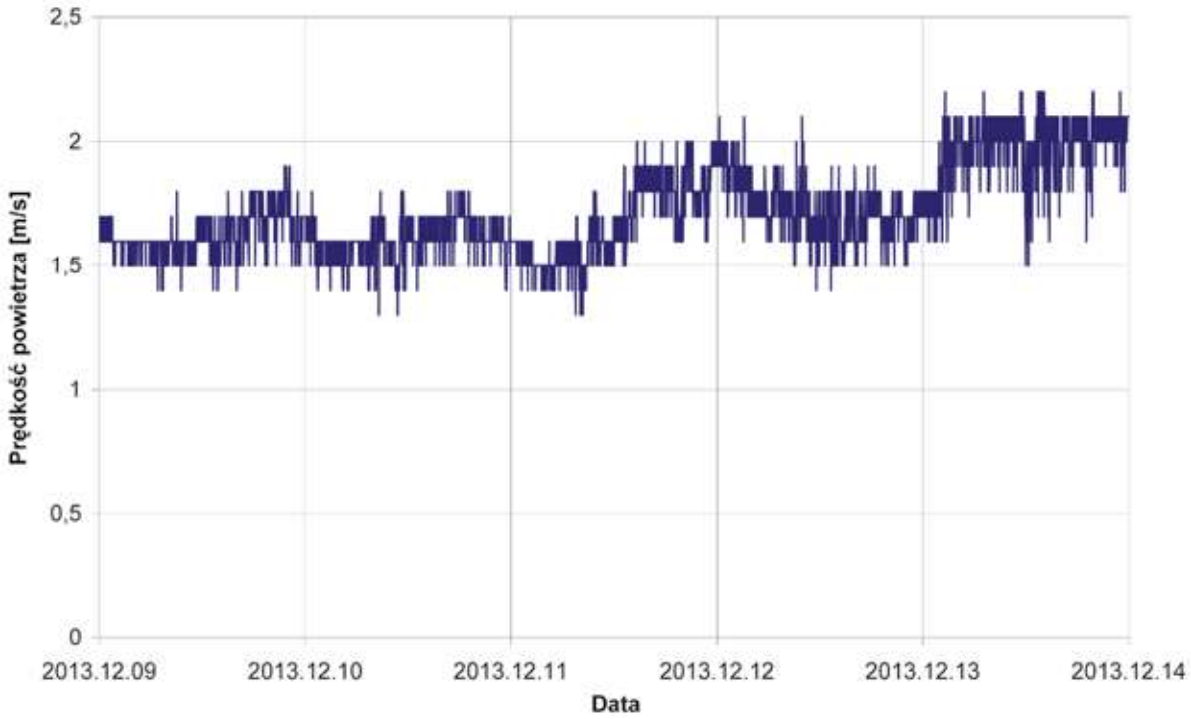
Ilość powietrza przepływającego przez ścianę X oparto na wskazaniach anemometru stacjonarnego, który znajdował się w chodniku nadścianowym X (rys. 1). Od pracowników kopalni otrzymano wartości wskazań tego anemometru z pięciu kolejnych dni. Dysponowano więc około 7200 pomiarami prędkości, które zmieniały się co 1 minutę. Analizę danych z czujnika prędkości powietrza rozpoczęto od sprawdzenia ich pod kątem występowania wartości błędnych i odstających, z wykorzystaniem testu 3-sigma. Test wykazał, że wskazania błędne i odstające w tym przypadku nie występują.

Wykres rzeczywistych prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego ściany X przedstawiono na rysunku 3. W tablicy 1 zamieszczono podstawowe statystyki opisowe wyznaczone dla tych danych.

Prędkość powietrza przepływającego przez rejon ściany X w badanym okresie zmieniała się w zakresie od 1,3 m/s do 2,2 m/s. Średnio wynosiła 1,72 m/s, natomiast dla większości



Rys. 2. Połączenie chodników przyścianowych oraz ściany X ze zrobami zawałowymi z wygenerowaną siatką objętości skończonych
Fig. 2. The connection of main gates and longwall X to the goaf with the generated mesh of finite elements



Rys. 3. Wykres prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego ściany X w czasie 5 kolejnych dni
Fig. 3. Chart of the air speed flowing from the top gate of longwall X in five consecutive days

Tablica 1. Podstawowe statystyki opisowe wyznaczone dla prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego ściany X
Table 1. Basic descriptive statistics calculated for the air speed flowing from the top gate of longwall Xa

N ważnych	Średnia m/s	Mediana m/s	Moda m/s	Liczność Mody	Minimum m/s	Maksimum m/s	Percentyl 10 m/s	Percentyl 90 m/s	Odch.std m/s
7203	1,72	1,70	1,6	2090	1,3	2,2	1,5	2,0	0,18

Tablica 2. Podstawowe statystyki opisowe prędkości powietrza dla wydzielonego okresu 2 godzin
Table 2. Basic descriptive statistics of air velocity for a period of 2 hours

N ważnych	Średnia m/s	Mediana m/s	Moda m/s	Liczność Mody	Minimum m/s	Maksimum m/s	Percentyl 10 m/s	Percentyl 90 m/s	Odch.std m/s
121	1,95	2,0	2,0	37	1,5	2,2	1,8	2,1	0,15

pomiarów zawierała się w przedziale od 1,54 m/s do 1,9 m/s. Na rysunku 3 są zarejestrowane nagłe „skoki" prędkości powietrza, które mogą być skutkiem otwierania i zamykania tam wentylacyjnych znajdujących się pomiędzy chodnikiem nadścianowym i podścianowym tej ściany – w pochylni X.

Na potrzeby obliczeń numerycznych z posiadanych pomiarów wydzielono przedział dwóch godzin, w którym występowały wyraźne wahania prędkości powietrza, a amplituda zmian była największa. Przedział ten przedstawiono na rysunku 4. Natomiast podstawowe statystyki opisowe wyznaczone dla wybranego przedziału zamieszczono w tablicy 2.

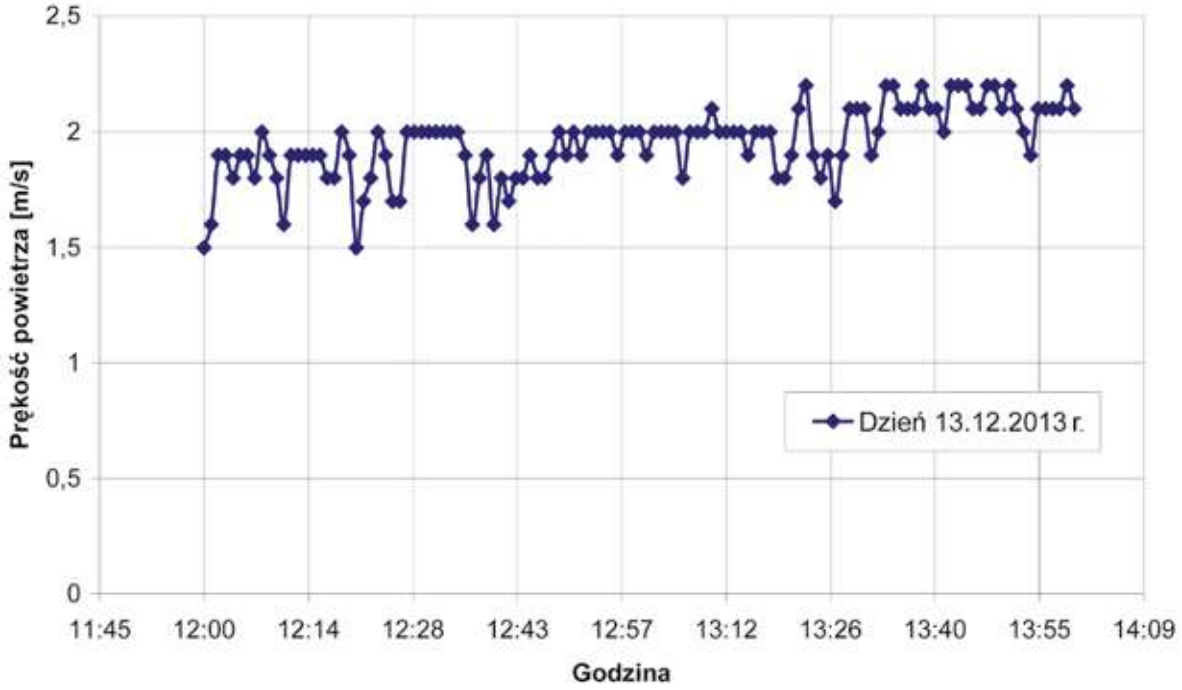
Wybrany dwugodzinny przedział charakteryzuje się większą skośnością rozkładu w porównaniu do całego zakresu 5 dni. Przeważają tutaj wyższe wartości prędkości niż w okresie przedstawionym na rysunku 3 (średnia 1,95 m/s) z pojawiającymi się spadkami do minimum równego 1,5 m/s. Z analizy wskazań czujnika dla wydzielonego okresu wynika, że 90% pomiarów wykazało wartość co najmniej 1,8 m/s. Należy się więc spodziewać, że w wybranym przedziale prędkości powietrza będzie można zaobserwować bardzo szeroki zasięg strefy przewietrzanej w zrobach, a jak wiadomo, zasięg tej strefy (szczególnie maksymalny) jest bardzo interesujący ze względu na proces samozagrzewania węgla w zrobach.

2.3. Krytyczny przedział prędkości powietrza dla procesu samozagrzewania węgla

W pracach [5] i [8] wykazano, że prędkość powietrza przepływającego przez masę rozkruszonego węgla ma bardzo istotne znaczenie dla procesu samozgarzewania węgla. Aby proces ten mógł być zainicjowany, a następnie podtrzymywany muszą być spełnione dwa warunki:
- tlen do ogniska samozagrzania musi być dostarczany w odpowiedniej ilości;
- ilość ciepła wynoszonego z ogniska zagrzewającego się węgla musi być mniejsza od ilości ciepła wydzielanego w procesie samozagrzewania (akumulacja ciepła).

Na potrzeby artykułu warunki te nazwano warunkami krytycznymi dla procesu samozagrzewania węgla, a przedział prędkości powietrza, który je spełnia został nazwany krytycznym przedziałem prędkości powietrza.

W literaturze światowej można znaleźć różne zakresy przedziału krytycznego. Na przykład A. Chumak i inni [2] jako krytyczny przedział prędkości powietrza przyjęli wartości 0,0017 m/s ÷ 0,015 m/s. Natomiast N. Szlązak i J. Szlązak [12] dolną wartość prędkości krytycznej określili na poziomie 0,0015 m/s, a górna jest według nich równa 0,015 m/s.



Rys. 4. Wydzielony okres 2 godzin, w którym prędkość powietrza charakteryzowała się największymi zmianami
Fig. 4. Period of 2 hours, during which the air speed reached the maximum changes

Na potrzeby dalszej analizy przyjęto, że krytyczny przedział prędkości powietrza będzie zawierał się w granicach: 0,0015 m/s ÷ 0,015 m/s.

2.4. Współczynnik przepuszczalności zrobów *k*

Zroby ściany X zostały zamodelowane jako ośrodek porowaty, dla którego współczynnik przepuszczalności *k* zmienia się wraz ze wzrostem odległości od ściany [9]. Współczynnik ten oblicza się zazwyczaj przy pomocy dwóch zależności, a użycie odpowiedniego wzoru uzależnione jest od współrzędnej *x* (odległości od ściany):

– dla x spełniających warunek $0 \le x \le \frac{2}{3}l$:

$$k = \frac{\mu}{r + ax^2}, \tag{1}$$

– natomiast dla *x* z przedziału $\frac{2}{3}l < x \le l$:

$$k = \frac{\mu}{r_0 + a\left(\frac{4}{3}l - x\right)^2}, \tag{2}$$

gdzie:

k – współczynnik przepuszczalności zrobów [m²];
l – całkowita długość zrobów [m];
r_0, a – współczynniki zależne od warunków geologiczno-górniczych (dotyczące zawału ściany);
μ – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza [Nsm^{-2}];
x – odległość od ściany [m].

W modelowanej ścianie X zroby mają długość l = 500 m. Dla tego wymiaru – korzystając z zależności (1) i (2) oraz zakładając, że w stropie ściany X znajduje się piaskowiec słaby – obliczono wartości współczynnika przepuszczalności zrobów *k,* które przedstawiono na wykresie (rys. 5).

Wyniki badań wartości współczynnika przepuszczalności zrobów przedstawione w artykule [9], dla przedziału długości zrobów od 0 m do około 75 m, nie są zbieżne z wartościami wyznaczonymi według zależności (1). W związku z tym dla wymienionego przedziału oparto się na badaniach wykonanych w warunkach dołowych, przedstawionych w opracowaniu [9] (rys. 5 – krzywa niebieska) zakładając, że lepiej odzwierciedlają rzeczywistość. Natomiast dla pozostałej długości zrobów przyjęto, że współczynnik ten będzie przyjmował wartości wyznaczone z zależności (1) i (2).

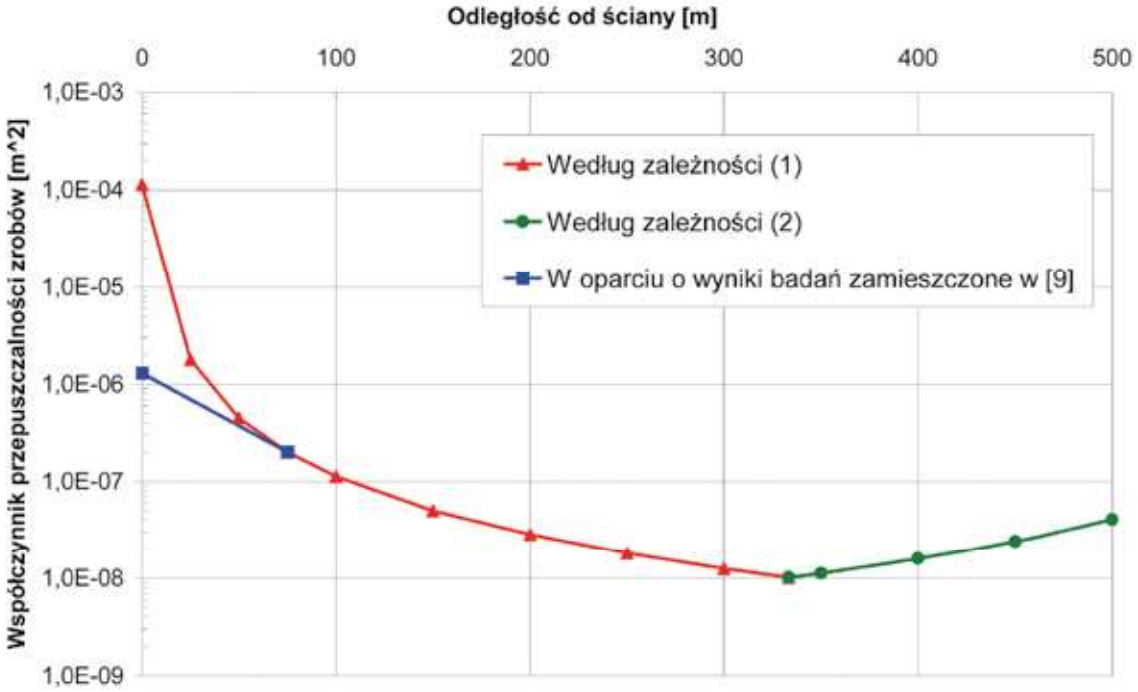
3. Wyniki obliczeń

3.1. Wyniki symulacji dla warunków stanu ustalonego

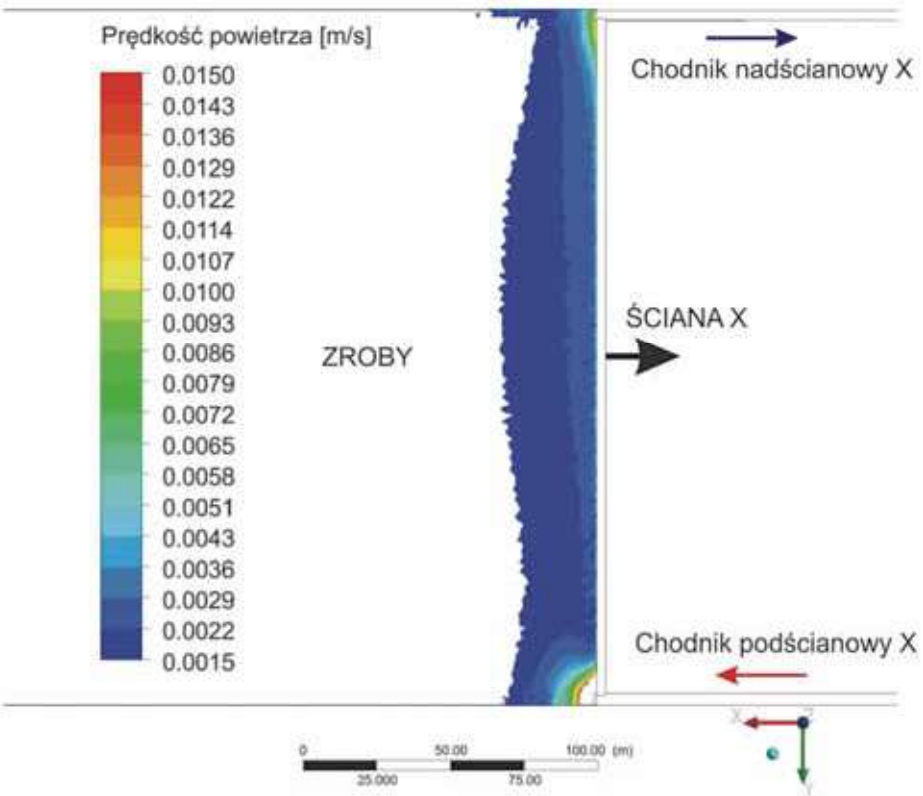
W przypadku stanu ustalonego przyjęto, że prędkość powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego ściany X będzie stała, w związku z czym również zasięg strefy krytycznej w zrobach nie będzie się zmieniał. W symulacji skupiono się na charakterystycznych prędkościach powietrza przepływającego przez rejon ściany X, tj. prędkości minimalnej (1,5 m/s), średniej (1,95 m/s) i maksymalnej (2,2 m/s) – tablica 2. Dla nich wyznaczono trzy strefy prędkości krytycznych w zrobach.

Celem obliczeń było również ustalenie jak znaczny skok prędkości powietrza przewietrzającego ścianę wpłynie na zasięg strefy krytycznej w zrobach, czyli po jakim czasie nastąpi ustabilizowanie się tej strefy przy przejściu z prędkości minimalnej do maksymalnej.

Wyznaczone strefy krytyczne dla minimalnej, średniej i maksymalnej prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego X przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8. Należy w tym miejscu zauważyć, że na zaprezentowanych rysunkach wyróżniono tylko te prędkości powietrza, które zawierają się w przedziale krytycznym (0,0015 m/s – 0,015 m/s), natomiast prędkości spoza strefy krytycznej zostały wycięte (zastąpione kolorem białym) w celu zwiększenia przejrzystości rysunków.

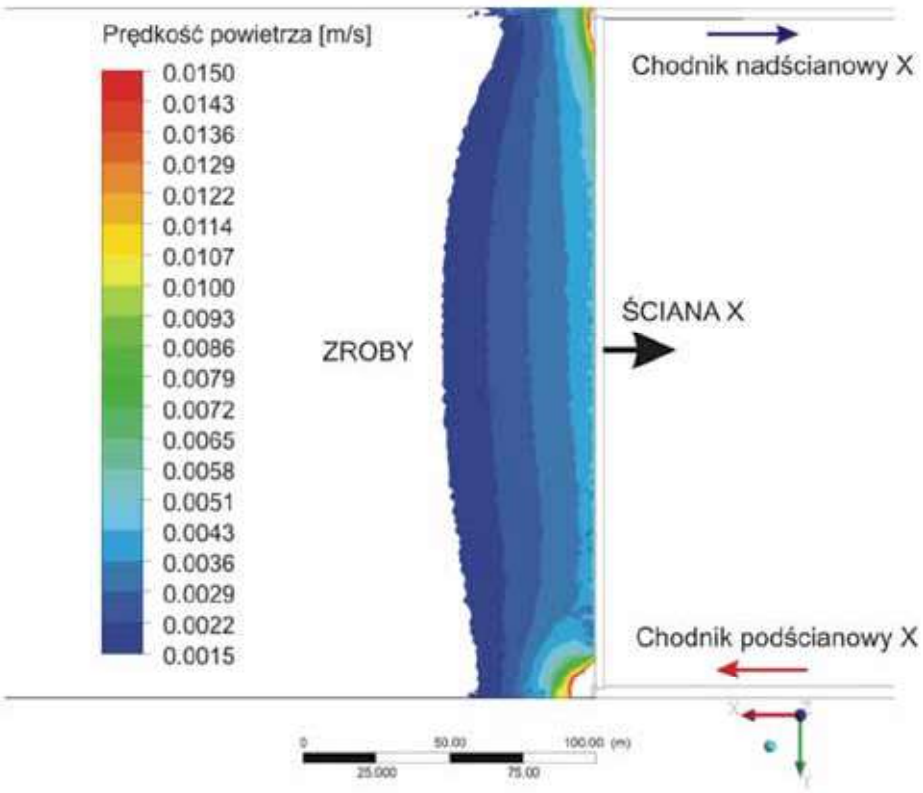


Rys. 5. Wykres wartości współczynnika przepuszczalności zrobów *k* wyznaczony dla ściany X
Fig. 5. Chart of the goaf permeability coefficient k calculated for the longwall X



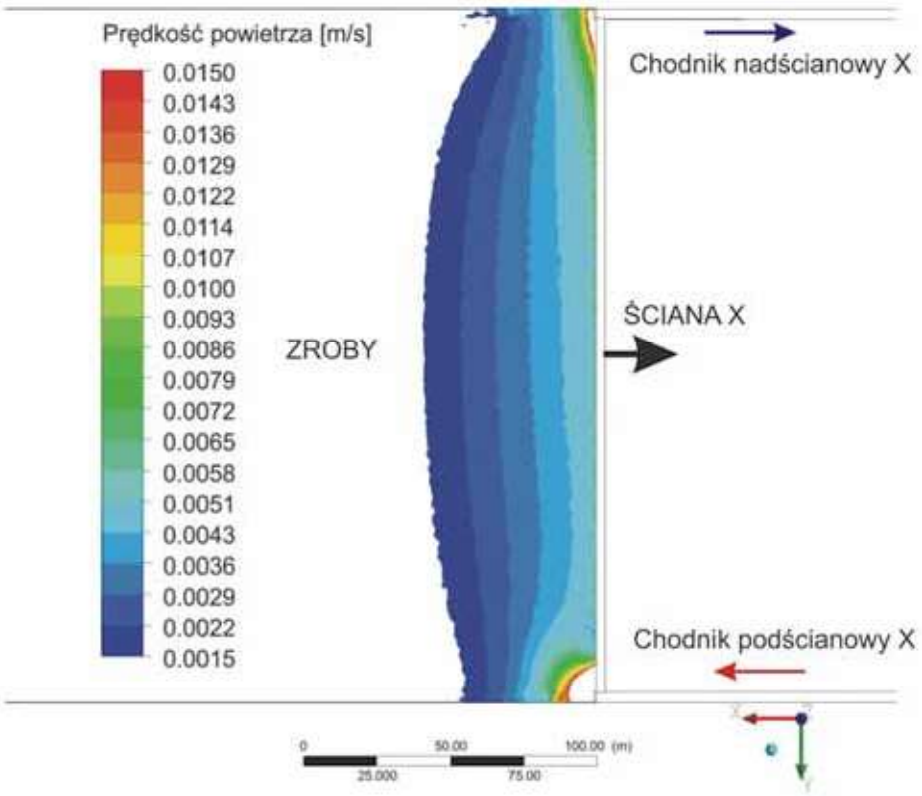
Rys. 6. Zasięg strefy krytycznych prędkości powietrza w zrobach wyznaczony dla minimalnej prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego X równej 1,5 m/s

Fig. 6. Range of critical air velocity zone in goaf calculated for the minimum air speed flowing from the top gate X, equal to 1,5m/s



Rys. 7. Zasięg strefy krytycznych prędkości powietrza w zrobach wyznaczony dla średniej prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego X równej 1,95 m/s

Fig. 7. Range of critical air velocity zone in goaf calculated for the average air speed flowing from the top gate X, equal to 1,95m/s



Rys. 8. Zasięg strefy krytycznych prędkości powietrza w zrobach wyznaczony dla maksymalnej prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego X równej 2,2 m/s

Fig. 8. Range of critical air velocity zone in goaf calculated for the maximum air speed flowing from the top gate X, equal to 2,2m/s

W wyniku przeprowadzonych symulacji ustalono, że:

- prędkości powietrza w zrobach, które przekraczają górną granicę krytyczną (> 0,015 m/s) mają niewielki zasięg i kończą się za sekcjami obudowy zmechanizowanej – z wyjątkiem obszarów znajdujących się w pobliżu wlotu i wylotu ściany;
- linia zasięgu strefy prędkości krytycznych w zrobach wraz ze wzrostem prędkości powietrza przepływającego przez ścianę przyjmuje kształt coraz bardziej zakrzywionego łuku. Maksymalny jej zasięg w głąb zrobów występuje mniej więcej w połowie długości ściany;
- dla prędkości minimalnej, maksymalnej i średniej zasięg strefy krytycznej w zrobach stabilizuje się po około 30 s;
- dla przyjętego maksymalnego skoku prędkości powietrza wynoszącego 0,7 m/s czas ustabilizowania się strefy krytycznej jest krótszy niż czas repetycji czujnika prędkości (< 60 s).

Na podstawie symulacji wyznaczono maksymalne szerokości stref krytycznych – były one następujące:

- 32,1 m dla minimalnej prędkości powietrza w chodniku nadścianowym X równej 1,5 m/s;
- 52,4 m dla średniej prędkości powietrza w chodniku nadścianowym X równej 1,95 m/s;
- 58,8 m dla maksymalnej prędkości powietrza w chodniku nadścianowym X równej 2,2 m/s.

Wyznaczone szerokości wskazują na to, że wzrost prędkości powietrza przepływającego przez rejon ściany X o 0,7 m/s spowodował wydłużenie strefy prędkości krytycznych w zrobach z 32,1 m do 58,8 m. Ma to bezpośrednie przełożenie na poziom zagrożenia pożarowego w prowadzonej ścianie, ponieważ zwiększenie zasięgu strefy prędkości krytycznych skutkuje dłuższym czasem przebywania węgla w przestrzeni o dostatecznym stężeniu tlenu dla podtrzymania procesu samozagrzewania węgla, co może w konsekwencji doprowadzić do pożaru endogenicznego.

3.2. Wyniki obliczeń dla warunków stanu nieustalonego

W stanie nieustalonym zasymulowano rzeczywisty przepływ powietrza przez ścianę X w oparciu o prędkości zanotowane przez czujnik pomiarowy zabudowany w chodniku nadścianowym tej ściany. W tym celu wykorzystano wydzielony okres 2 godzin obejmujący pomiar 120 pomiarów prędkości powietrza (rys. 4). Krok obliczeniowy dla tej symulacji przyjęto równy 1 sekundzie, czyli na każdą zmianę wartości prędkości powietrza przypadało 60 kroków obliczeniowych (repetycja czujnika prędkości wynosiła 60 s). Dzięki temu osiągnięto odpowiednią zbieżność równań różniczkowych – dużą dokładność symulacji.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano szereg stref prędkości krytycznych o różnym zasięgu. Z uzyskanych wyników sporządzono animację, która pozwoliła na obserwację płynnych zmian zakresu tych stref. Następnie otrzymane strefy krytyczne wyznaczone dla granicznych prędkości powietrza przewietrzającego ścianę (1,5 m/s oraz 2,2 m/s) porównano z ich odpowiednikami wyznaczonymi dla warunków stanu ustalonego.

Zasadnicza różnica pomiędzy stanem ustalonym i nieustalonym jest taka, że w stanie nieustalonym zasięg strefy prędkości krytycznych w zrobach nie stabilizuje się z powodu ciągłych wahań prędkości powietrza przepływającego przez

ścianę. Oznacza to, że strefa krytyczna przy zmniejszaniu się prędkości powietrza przewietrzającego ścianę do minimalnej, a następnie ponownym jej wzroście nie stabilizuje swojego zasięgu na poziomie odpowiadającym temu przypadkowi w stanie ustalonym. Podobnie wzrost prędkości powietrza do maksymalnej, po której następuje jej spadek sprawia, że strefa prędkości krytycznych dąży do zasięgu maksymalnego uzyskanego w stanie ustalonym, ale go nie osiąga.

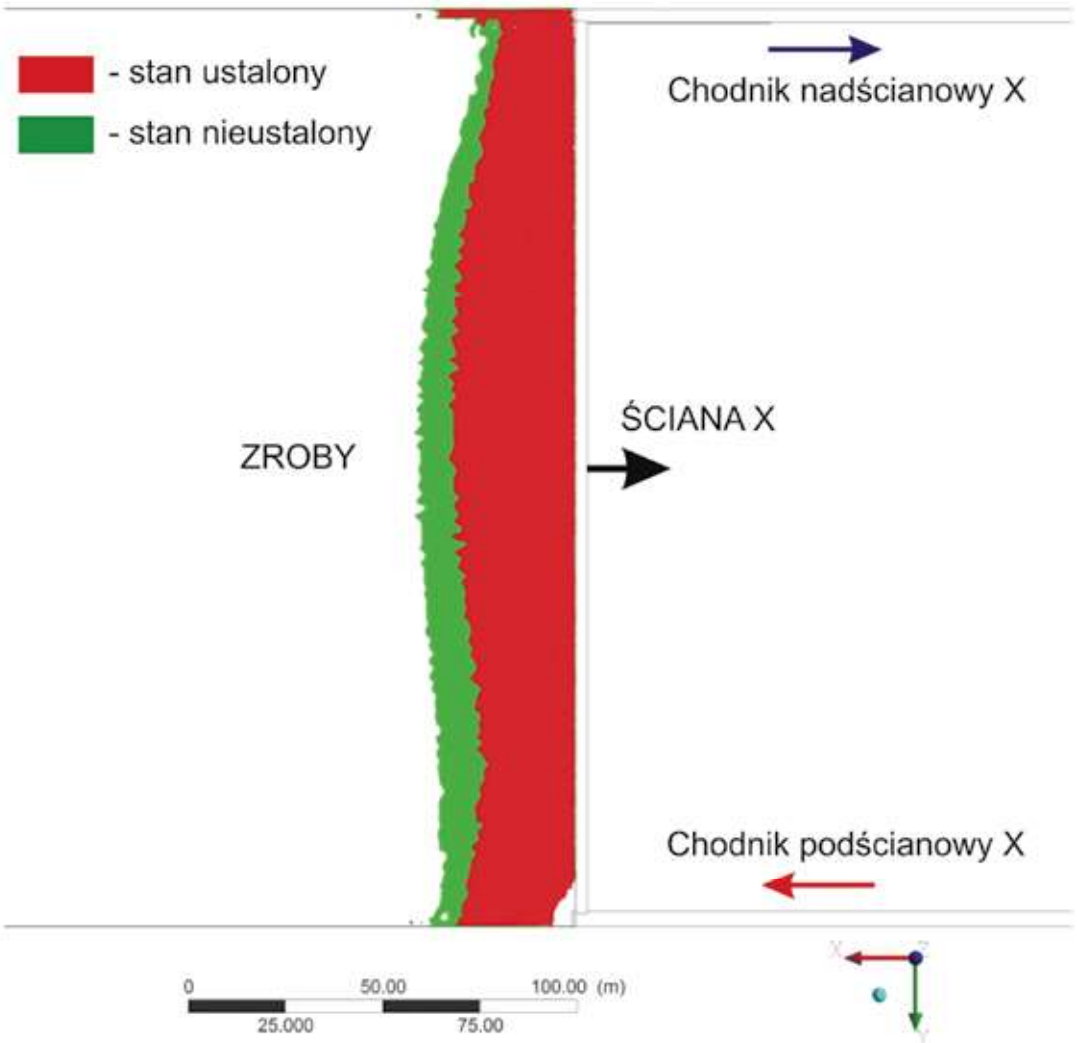
Zjawisko takie można zaobserwować na rysunkach 9 oraz 10, gdzie porównano ze sobą wyniki uzyskane podczas obliczeń przeprowadzonych w warunkach stanu ustalonego i nieustalonego, przy minimalnej (1,5 m/s) oraz maksymalnej (2,2 m/s) prędkości powietrza wypływającego z chodnika nadścianowego X. Na przedstawionych rysunkach obserwuje się wyraźną różnicę w zasięgu stref wyznaczonych dla prędkości minimalnej (rys. 9). Natomiast dla prędkości maksymalnej różnice te są znacznie mniejsze (rys. 10). Wynika to z rozkładu prędkości powietrza przepływającego przez ścianę. Rysunek 4 ilustruje sytuację, w której dominują prędkości wyższe od średniej (90% pomiarów wykazało wartość co najmniej 1,8 m/s). Stąd też dla symulacji przeprowadzonych w warunkach stanu nieustalonego obserwuje się, że strefa prędkości krytycznych oscyluje częściej w okolicy swego maksymalnego zasięgu.

Symulacja dla stanu nieustalonego daje wyniki, które bardziej odpowiadają rzeczywistości, niesie ona jednak za sobą pewne utrudnienia, którymi głównie są:

– konieczność ustalenia odpowiedniego kroku obliczeniowego – zbyt duża wartość tego kroku spowoduje, że nie osiągniemy odpowiedniej zbieżności równań różniczkowych (mała dokładność symulacji);
– pracochłonna analiza podczas wyszukiwania charakterystycznych wyników – głównie minimalnego i maksymalnego zasięgu strefy krytycznych prędkości.

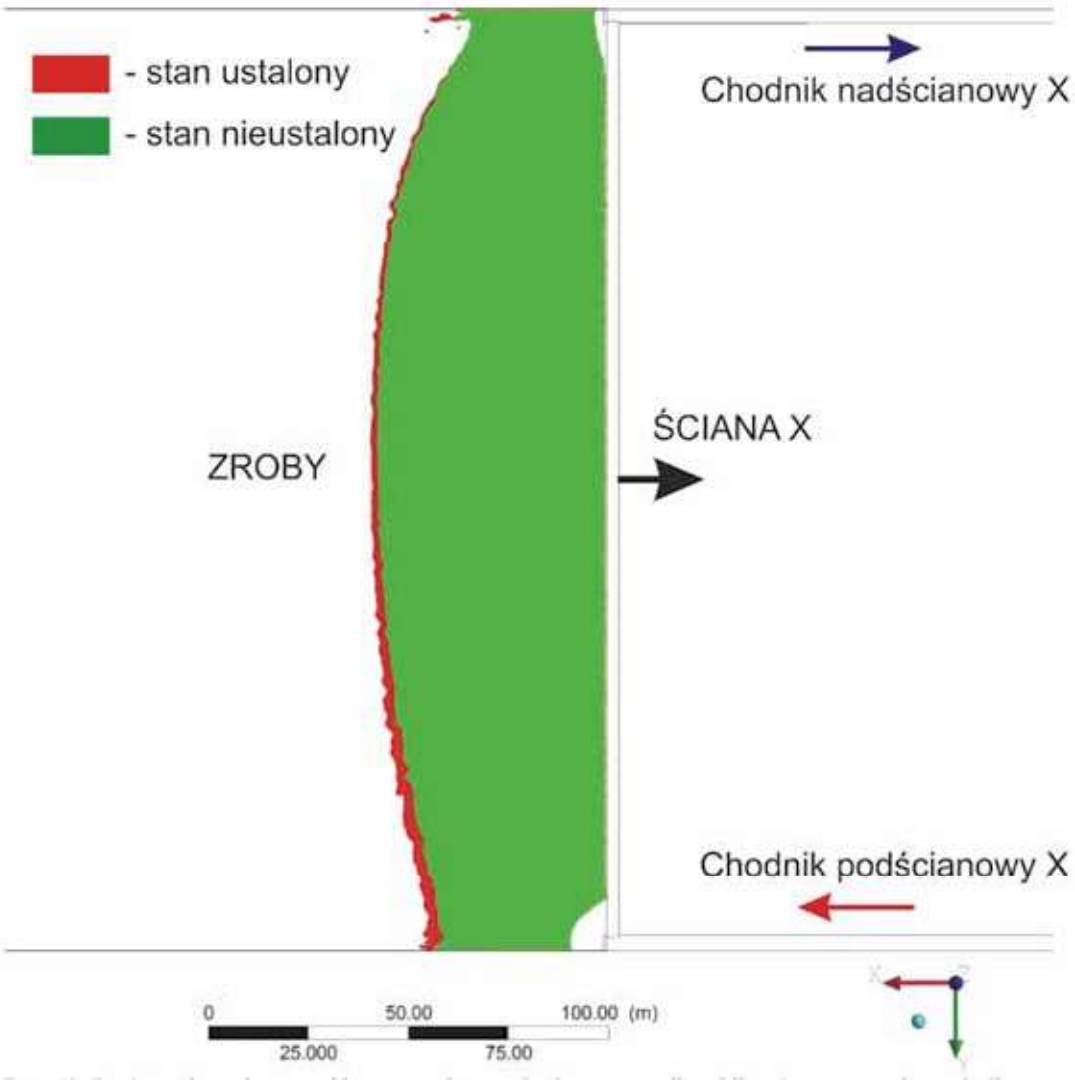
Wszystko to przekłada się na czasochłonność wykonania obliczeń oraz późniejszej analizy. W tym przypadku warto dysponować sprzętem komputerowym o jak najlepszych możliwościach obliczeniowych.

Wyniki obliczeń wykonywanych dla warunków stanu nieustalonego pozwalają na bardzo dobrą wizualizację migracji powietrza w zrobach, która dokładnie obrazuje wpływ intensywności przewietrzania ściany na zasięg strefy prędkości krytycznych.



Rys. 9. Porównanie zasięgu stref krytycznych w zrobach w przypadku obliczeń przeprowadzonych dla stanu ustalonego i nieustalonego przy minimalnej prędkości powietrza przepływającego przez rejon ściany X równej 1,5 m/s

Fig. 9. Comparison of critical zones range in the goaf for the steady and transient states calculations with a minimum air speed flowing through the longwall X, equal to 1,5 m/s



Rys. 10. Porównanie zasięgu stref krytycznych w zrobach w przypadku obliczeń przeprowadzonych dla stanu ustalonego i nieustalonego przy maksymalnej prędkości powietrza przepływającego przez rejon ściany X równej 2,2 m/s

Fig. 10. Comparison of critical zones range in the goaf for the steady and transient states calculations with a maximum air speed flowing through the longwall X, equal to 2,2m/s.

3.3. Wykorzystanie wyników symulacji komputerowych w prewencji pożarowej

Do prognozy wpływu zasięgu strefy krytycznej na poziom zagrożenia pożarowego w zrobach ściany proponuje się korzystać z maksymalnej prędkości powietrza, które przewietrza daną ścianę. Wyznaczona w ten sposób strefa krytyczna stwarza bowiem największy margines bezpieczeństwa. Szerokość strefy krytycznej oraz postęp ściany przekładają się na czas, w jakim węgiel będzie miał możliwość akumulowania ciepła. Im większa jest ta szerokość, tym dłużej węgiel będzie miał warunki sprzyjające jego samozagrzewaniu. Należy więc tak sterować postępem ściany, aby węgiel pozostawiony w zrobach odpowiednio szybko przedostał się przez strefę krytyczną do przestrzeni ubogiej w tlen – jak już wcześniej podano, powinno to nastąpić w czasie krótszym niż wynosi okres inkubacji pożaru endogenicznego wyznaczony dla danego węgla.

Poniżej przedstawiono przykład obrazujący jak postęp ściany X, intensywność jej przewietrzania i zasięg strefy krytycznych prędkości powietrza kształtują poziom zagrożenia pożarowego w tej ścianie.

Przykład analizy zagrożenia pożarowego w rejonie ściany X.

Aby oszacować ryzyko wystąpienia pożaru endogenicznego w zrobach eksploatowanej ściany X trzeba znać:

- czas po jakim może dojść do samozapłonu węgla;
- okres, podczas którego węgiel będzie miał możliwość samozagrzewania się.

Jako czas osiągnięcia przez węgiel temperatury zapłonu przyjęto okres inkubacji pożaru endogenicznego. Natomiast okres, w którym węgiel poddany będzie procesowi samozagrzewania jest wynikiem zależności pomiędzy postępem ściany X i szerokością strefy krytycznej w zrobach.

Przyjęto, że strefa prędkości krytycznych w zrobach zostanie wyznaczona dla maksymalnej prędkości powietrza w chodniku nadścianowym X równej 2,2 m/s. Szerokość strefy krytycznej w zrobach dla tej prędkości osiągnęła wartość około 59 m.

Dla warunków rozpatrywanej ściany wyznaczony okres inkubacji węgla wynosił 30 dni. A więc postęp ściany X powinien być nie mniejszy niż $\frac{59}{30} = 1{,}97 \approx 2$ m/dobę.

Przy utrzymaniu takiego postępu ściany węgiel znajdujący się w zrobach nie powinien ulec samozapaleniu, ponieważ tuż przed końcem okresu inkubacji przedostanie się on do strefy, gdzie intensywność przewietrzania zrobów jest zbyt mała, aby zagwarantować odpowiednią ilość tlenu do podtrzymania procesu samozagrzewania.

Wyznaczony postęp 2 m/dobę wynika z warunku wystąpienia pożaru endogenicznego, natomiast objawy zagrzania mogą być obserwowane znacznie wcześniej, jeszcze przed osiągnięciem przez węgiel temperatury krytycznej. Pojawia się wtedy zwiększone wydzielanie produktów utleniania węgla, takich jak: tlenek węgla, etylen, propylen, acetylen i wodór [3] oraz podwyższone wartości wskaźników pożarowych (należy w tym miejscu wspomnieć o możliwości wystąpienia nietypowych wartości wskaźnika Grahama, które mogą wpłynąć na niewłaściwą ocenę aktualnego poziomu zagrożenia [13]). W przypadku zaobserwowania podwyższonego zagrożenia pożarowego profilaktyka powinna być skierowana m.in. na zwiększenie postępu ściany. Przy braku takiej możliwości można to zrekompensować zmniejszeniem intensywności przewietrzania ściany. W rozpatrywanym przykładzie ograniczenie intensywności przewietrzania ściany przekłada się na zmniejszenie prędkości powietrza w chodniku nadścianowym X. Z wykonanych symulacji wynika, że po zmniejszeniu prędkości powietrza, na przykład do wartości minimalnej (1,5 m/s), zasięg strefy prędkości krytycznych dla procesu samozagrzewania węgla zmniejszył się do około 32 m. A w takich warunkach można by prowadzić ścianę z postępem nie mniejszym niż 1,1 m/dobę, czyli pomniejszonym o około 45% w stosunku do poprzedniego wariantu.

4. Podsumowanie

Jednym z czynników wpływających w istotny sposób na proces samozagrzewania się węgla jest prędkość powietrza przepływającego przez rozkruszony węgiel. W literaturze światowej podaje się różne zakresy prędkości powietrza migrującego przez zroby, które zapewniają odpowiednie warunki dla podtrzymania procesu samozagrzewania węgla. Na potrzeby artykułu założono, że przedział tych prędkości będzie zawierał się w granicach: 0,0015 m/s ÷ 0,015 m/s i nazwano go krytycznym przedziałem prędkości powietrza.

Wykorzystując model numerycznej mechaniki płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dostępny w oprogramowaniu ANSYS CFX poddano analizie przepływ powietrza przez zroby ściany wydobywczej prowadzonej z zawałem stropu na jednej z kopalń węgla kamiennego. Celem takiego działania było:

- wyznaczenie zasięgu stref krytycznych prędkości powietrza w zrobach;
- określenie wpływu zmian intensywności przewietrzania ściany na zasięg ww. stref;
- wykorzystanie wyników symulacji do określenia minimalnego postępu ściany zapewniającego bezpieczne przedostanie się węgla do strefy ubogiej w tlen.

Symulacje przeprowadzono dla dwóch stanów:

- ustalonego – gdzie prędkość powietrza przepływającego przez ścianę była niezmienna, w związku z tym uzyskano stałe zakresy stref krytycznych (dla wybranych, charakterystycznych prędkości powietrza, tj. prędkości minimalnej, średniej i maksymalnej);
- nieustalonego – w którym prędkość powietrza zmieniała się co 1 minutę, zgodnie ze wskazaniami anemometru stacjonarnego zabudowanego w wylotowym prądzie powietrza. Krok obliczeniowy dla tej symulacji wynosił 1 sekundę, co pozwoliło na osiągnięcie dużej dokładności obliczeń.

Zaobserwowano, że zasadniczą różnicą pomiędzy symulacją w stanie ustalonym i nieustalonym jest brak możliwości stabilizacji stref prędkości krytycznych w zrobach (dla stanu nieustalonego) przy szybkich wahaniach prędkości powietrza przepływającego przez ścianę.

Natomiast symulacje przeprowadzone dla warunków stanu ustalonego ograniczają się do wybrania tylko kilku charakterystycznych prędkości powietrza przewietrzającego ścianę. Pomimo tego, przy odpowiednim doświadczeniu w prowadzeniu obliczeń, można dla nich sformułować zadowalające wnioski, jednocześnie znacznie oszczędzając czas przeznaczony na obliczenia i analizę wyników.

Szerokość strefy krytycznej poprzez związek z postępem ściany pozwoliła na wyznaczenie czasu w jakim węgiel miał możliwość akumulacji ciepła. Jak wiadomo, czas ten powinien być krótszy niż okres inkubacji pożaru endogenicznego obliczony dla danego węgla. Do analizy przyjęto strefę prędkości krytycznych uzyskaną podczas symulacji przeprowadzonej w warunkach stanu ustalonego dla maksymalnej prędkości powietrza przepływającego przez ścianę, ponieważ wyznaczona w ten sposób strefa krytyczna stwarzała największy poziom bezpieczeństwa. W przedstawionym przykładzie postęp dobowy ściany X powinien wynosić co najmniej 2 m.

W przypadku spowolnienia biegu lub postoju ściany (np. przejście przez zaburzenia tektoniczne, likwidacja ściany, postój w okresie świątecznym) istnieje konieczność podjęcia dodatkowych działań profilaktycznych, które w analizowanym przykładzie polegały na zmniejszeniu prędkości powietrza przewietrzającego ścianę z 2,2 m/s do 1,5 m/s. Takie działanie pozwoliło na spowolnienie biegu ściany z 2 m/dobę do 1,1 m/dobę.

Jak wykazano, wyznaczanie zasięgu strefy krytycznych prędkości powietrza w zrobach może być pomocne podczas wykonywania prognozy zagrożenia pożarem endogenicznym oraz przy określaniu środków prewencji pożarowej.

Literatura

1. Ansys CFX User's Guide. 2012r
2. *Chumak A. S., Pashkovsky P.S., Yaremchuk M.A.* : Prevention of spontaneous fires by directed nitrogen supply. Proceedings of the 7th international mine ventilation congress, June 17-22, Crakow, Poland. 2001.
3. *Cygankiewicz J.*: Ocena rozwoju ognisk samozagrzewania na podstawie precyzyjnej analizy chemicznej prób powietrza kopalnianego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa 1996, nr 14, s. 505-513.
4. *Cygankiewicz J.*: Modelowanie emisji gazów z zagrzewającego się złoża węgla, Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej, s. 65-77. 2006.
5. *Cygankiewicz J.*: Prognozowanie samozagrzewania węgla w zrobach ścian. IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa – Problemy Współczesnego Górnictwa, Jaworze 2011, s. 432-448.
6. *Murtagh B. A.*: The spontaneous heating of coal. 1966
7. *Ren T. X., Balusu R.*: CFD Modelling of Goaf Gas Migration to Improve the Control of Spontaneous Combustion in Longwalls. Coal Operators' Conference. 2005.
8. *Strumiński A.*: Zwalczanie pożarów w kopalniach głębinowych. 1996.
9. *Szlązak J., Szlązak N.*: Badania numeryczne i kopalniane przepływu powietrza przez zroby ścian zawałowych. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 28, z. 3, s. 59–78. 2004.
10. *Szlązak J., Szlązak N.*: Filtracja powietrza przez zroby ścian zawałowych w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwa Naukowe AGH Kraków. 2005.
11. *Szlązak J., Szlązak N., Borowski M., Obracaj D.*: Możliwości ograniczenia przepływu powietrza przez strefę zawału ściany eksploatacyjnej. Materiały konferencyjne Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 2006 str. 315–331.
12. *Szlązak N., Szlązak J.*: Wentylacja wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego, w warunkach zagrożeń metanowego i pożarowego. Górnictwo i Geologia, 2013, t. 8, z. 2, s. 115 – 131.
13. *Słowik S., Świerczek L.*: Ujemne i zawyżone wartości wskaźnika Grahama. „Przegląd Górniczy" 2014, nr 12, s. 98-105.