

Eksperymentalne i modelowe badanie procesu mieszania powietrza i metanu w strudze wytwarzanej przez kopalnianą inżektorową stację odmetanowania

JERZY KRAWCZYK JAKUB JANUS

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

Streszczenie

Jedną z częstszych przyczyn katastrof jest występowanie lokalnych nagromadzeń metanu w wyrobiskach kopalń. Gaz ten jest wymywany ze zrobów i rozcieńczany przez powietrze wentylacyjne. Modelowanie procesu rozcieńczania metanu w strudze powietrza jest istotnym elementem dla określenia lokalizacji stref zagrożonych wybuchem tego gazu. Numeryczna mechanika płynów a w szczególności metoda objętości skończonej dostarcza narzędzi do takiego modelowania. Jednak zastosowanie tej metody wymaga walidacji. W tym celu można dokonać porównania z wynikami pomiarów dla wybranego zagadnienia przepływowego (ang. *test case*), które wykazuje wystarczające podobieństwo do rozpatrywanej klasy zagadnień. Przykładem takiego zagadnienia może być proces propagacji strugi mieszaniny powietrza i metanu wytwarzanej przez podziemną inżektorową stację odmetanowania. Przeprowadzono wstępne porównanie obliczeń i pomiarów. Określono metodykę dalszych pomiarów w celu uzyskania pełniejszego obrazu rzeczywistego przepływu.

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, walidacja, metan, inżektor, struga

1. Wprowadzenie

Migracja metanu do wyrobiska kopalni prowadzi do powstawania wybuchowych mieszanin tego gazu. Gaz ten uwalnia się ze skał, w szczególności węgla i jest rozcieńczany przez powietrze wentylacyjne. Wiedza o procesie mieszania się metanu z powietrzem wentylacyjnym ma duże znaczenie dla określenia stref zagrożonych wybuchem a tym samym dla zapewnienia bezpiecznego funkcjonowania kopalń [Kissell, 2006]. W tej dziedzinie prowadzono wiele prac, zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych. Cennym ich uzupełnieniem może być modelowanie komputerowe metodami Numerycznej Mechaniki Płynów.

Duże możliwości oferuje oprogramowanie wykorzystujące metodę objętości skończonej do rozwiązywania równań mechaniki płynów wykorzystujące hipotezę uśredniania Reynoldsa i rozmaite modele turbulencji. Do tej pory nie stworzono uniwersalnej metody, która gwarantuje dobre rezultaty dla szerokiej klasy zagadnień. Liczne porównania symulacji i danych pomiarowych wskazują na to, że dla danej klasy zagadnień należy dobrać optymalną metodykę modelowania (ang. *best practice*). Dla wielu problemów istnieją zestawy zaleceń (ang. *best practice guidelines*) odnośnie całego procesu modelowania – budowy siatek obliczeniowych, doboru modeli turbulencji i tak dalej. Sformułowano również zagadnienia testowe (ang. *test case*), dla których osiągnięto zadowalającą zbieżność pomiarów i symulacji, dokumentując w ten sposób odpowiedniość, czyli walidując metodę. Wprowadzając alternatywne metody modelowania można określić ich przydatność poprzez porównanie z istniejącym przypadkiem testowym. Zwalidowana metoda może być stosowana do całej klasy podobnych zagadnień, ograniczając lub nawet eliminując konieczność prowadzenia weryfikacji eksperymentalnej dla każdego wariantu.

Przykładem takiego zagadnienia może być proces propagacji strugi mieszaniny powietrza i metanu wytwarzanej przez podziemną inżektorową stację odmetanowania. Dysponowano danymi z wielopunktowego

pomiaru stężeń metanu w przekroju oraz pomiarem strumienia objętości w chodniku, zmierzonym kilkaset metrów za stacją. Niestety nie zmierzono pola prędkości w otoczeniu stacji.

Celem zadania było oszacowanie rozplywu strumienia metanu, nawiewanego przez strumienice pneumatyczne Huragan 120, do chodnika górniczego, oraz przeprowadzenie symulacji komputerowej przy wykorzystaniu specjalistycznego programu w celu weryfikacji uzyskanych wyników. Zadanie podzielono na trzy etapy:

- I etap – zaprojektowanie i przeprowadzenie symulacji rozplywu mieszaniny powietrza i metanu w obrębie górnej i dolnej komory mieszania,
- II etap – zaprojektowanie i przeprowadzenie symulacji przepływu powietrza we fragmencie chodnika kopalnianego na długości komór mieszania,
- III etap – zaprojektowanie i przeprowadzenie symulacji rozplywu mieszaniny powietrza i metanu w 20 m fragmencie chodnika kopalnianego.

Podział zadania na poszczególne etapy miał za zadanie skrócenie czasu obliczeniowego ze względu na wielkość geometrii obliczeniowej modelu oraz określenie brakujących warunków brzegowych. Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie wstępnych obliczeń i przygotowanie metodyki symulacji i dalszych pomiarów. Niepełny zestaw danych (brak pomiarów prędkości w otoczeniu stacji) pozwalał jedynie na zgrubną weryfikację symulacji.

2. Opis stacji odmetanowania

W sieciach odmetanowania niekiedy funkcję ssaw pełnią inżektory podłączone do rurociągów i zasilane sprężonym powietrzem. Są one zabudowane w rurowych komorach mieszania, w których odessana z rurociągu mieszanina metanu i powietrza jest rozcieńczana przez powietrze wentylacyjne. W tym przypadku drenaż metanu odbywa się głównie dzięki energii sprężonego powietrza i w znacznie mniejszym stopniu energii kinetycznej powietrza wentylacyjnego.

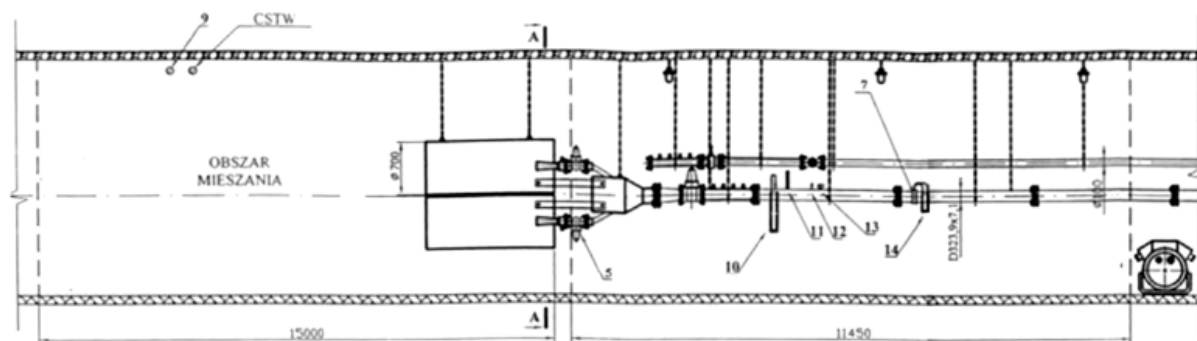
Tab. 1. Zestawienie elementów na schematach stacji odmetanowania (Rys. 1-3)

1.	Komora mieszania Ø 700 x 1875 mm
2.	Strumienica pneumatyczna typu „HURAGAN – 120”
3.	Głowica inżektorowa
4.	Zasuwa klinowa płaska Dn 300 mm
5.	Zasuwa klinowa płaska Dn 125 mm
6.	Wstawka pomiarowa Dn 300 mm
7.	Zwężka pomiarowa typu kryza Dn 300/149,8
8.	Rura stalowa Ø 300 mm
9.	Metanomierz
10.	Manometr cieczowy U-rurka [mmHg]
11.	Termometr przemysłowy
12.	Zawór kulowy Dn 15 z końc. Na wąż Ø 9
13.	Czujnik wysokich stężeń metanu typ MM-2a
14.	Manometr cieczowy U-rurka [H ₂ P]

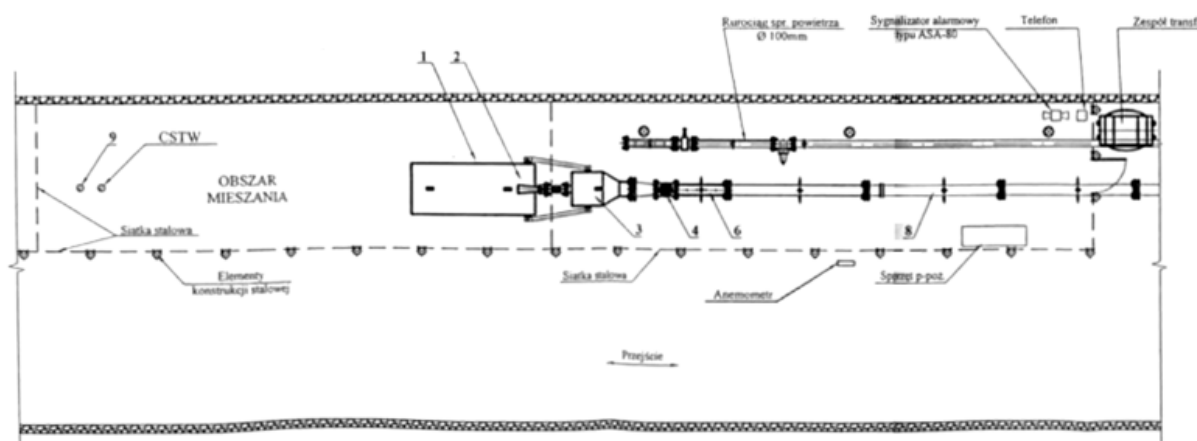
Rozpatrywana w niniejszym artykule stacja odmetanowania została przedstawiona na Rys. 1-3. Głównym jej elementem są dwie komory mieszania o wymiarach Ø 700 mm × 1875 mm. Ustawione są one równolegle do siebie w płaszczyźnie pionowej. W komorach następuje wstępne mieszanie metanu zasysanego przez z rurociągu przez strumienice pneumatyczne Huragan 120. Następnie metan po opuszczeniu komory mieszania kierowany jest do obszaru mieszania (część chodnika górniczego), który jest ograniczony stalową siatką o wymiarach 2500 mm × 15000 mm.

Do tłoczenia metanu wykorzystuje się strumienice pneumatyczne Huragan 120 (Rys. 4), które są wykorzystywane w podziemnych kopalniach, służą do wentylacji pomocniczej i klimatyzacji wyrobisk, zwalczania zagrożeń gazowych oraz pyłowych, jak również jako urządzenia wytwarzające depresję w inżektorowych stacjach odmetanowania.

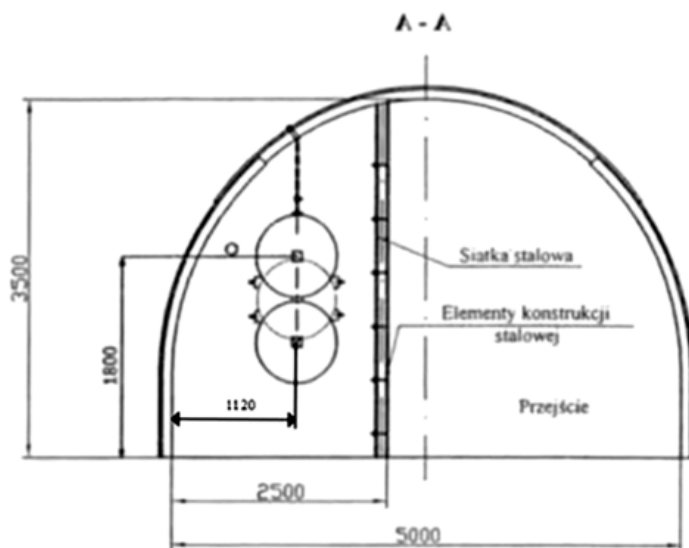
Parametry techniczne strumienicy opisuje Tabela 2 a jej charakterystykę przedstawia Rys. 5.



Rys. 1. Rzut pionowy stacji odmetanowania



Rys. 2. Rzut poziomy stacji odmetanowania



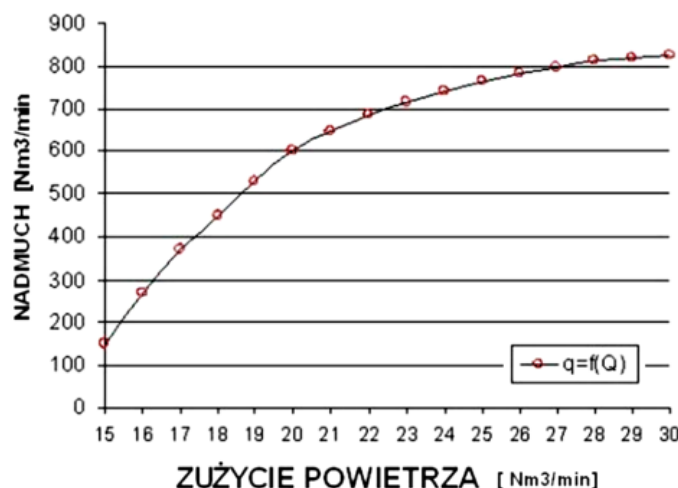
Rys. 3. Przekrój A – A stacji odmetanowania



Rys. 4. Strumienica pneumatyczna typu HURAGAN 120

Tab. 2. Parametry techniczne strumienicy pneumatycznej typu HURAGAN 120

Lp.	Parametr	Jednostka	Huragan – 120
1.	Ciśnienie zasilania sprężonego powietrza	P [Mpa]	0.1-0.4
2.	Zużycie sprężonego powietrza dla $p = 0,3$ MPa	q [m ³ /min]	25
3.	Wydajność nominalna	Q [m ³ /min]	7.5
4.	Maksymalne podciśnienie	P [mm Hg]	150
5.	Sprawność Q/q	N [%]	30
6.	Poziom hałasu	[dB]	82
7.	Ciężar bez kołnierza	G [kg]	19



Rys. 5. Charakterystyka pracy strumienicy na tłoczeniu przy ciśnieniu zasilania 0,3 Mpa (dane producenta)

3. Komputerowe modele przepływu w stacji inżektorowej i jej elementach

Głównym obiektem celem analizy była analiza zjawiska propagacji strugi mieszaniny powietrza i metanu w chodniku. Jej źródłem były dwie komory mieszania stacji inżektorowej. W rozpatrywanym odcinku wyrobiska przekrój dolotowy był sumą logiczną dwóch okrągłych wylotów z komór mieszania i pozostałej części przekroju wyrobiska, którą dopływało powietrze wentylacyjne. Należało więc określić profile prędkości i pole stężeń na wylocie każdej z komór mieszania, co zrealizowano w rozdziale 3.1 oraz profil prędkości dopływające go powietrza, obliczony w rozdziale 3.2. Wykorzystano funkcję programu Ansys Fluent, która służy do zapisu i importu obliczonych uprzednio profili prędkości i stężeń w celu zadania warunków brzegowych. W rozpatrywanych zagadnieniach przepływu mieszaniny wykorzystano standardowy model przepływu turbulentnego $k-\varepsilon$.

3.1. Symulacja rozprywu mieszaniny powietrza i metanu w obrębie górnej i dolnej komory mieszania

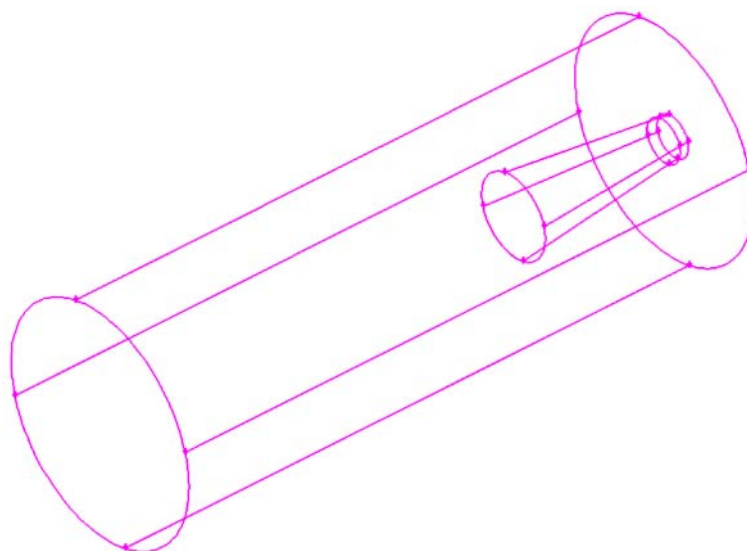
Celem I etapu zadania było wstępne oszacowanie rozprywu metanu w górnej i dolnej komorze mieszania jak i również określenie profilu prędkości oraz stężenia metanu na wylocie z obszaru mieszania, jako warunku brzegowego dla dalszych symulacji.

3.1.1. Obszar obliczeniowy

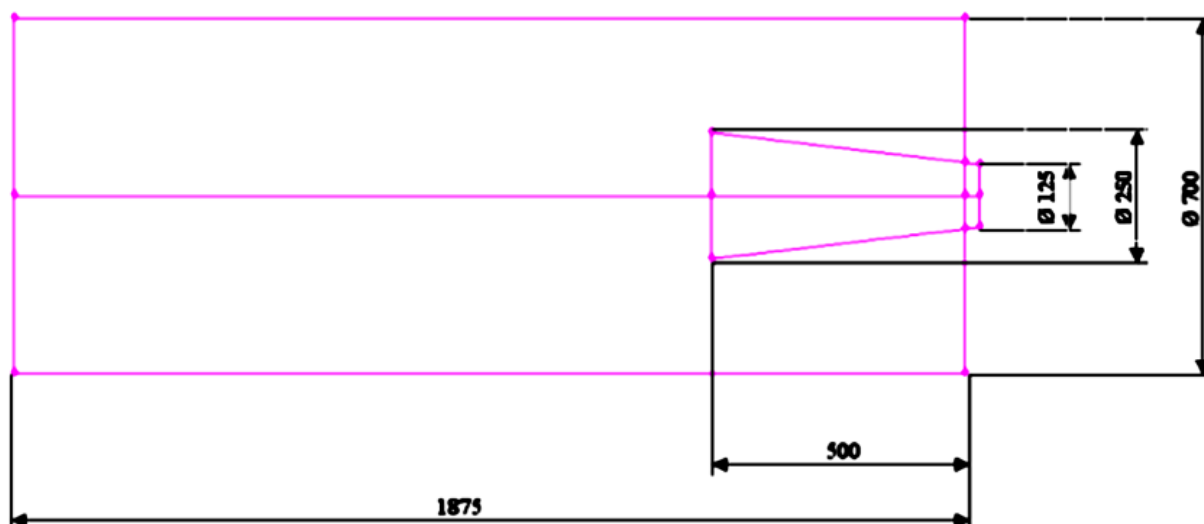
Posługując się preprocesorem Gambit, zaprojektowano model komory mieszania. Model geometryczny składa się ze strumienicy o wymiarach:

- wlot – $\varnothing$ 125 mm,
- wylot – $\varnothing$ 250 mm,
- długość strumienicy w komorze mieszania – 500 mm,

oraz komory mieszania – $\varnothing$ 700 mm $\times$ 1875 mm.



Rys. 6. Geometria komory mieszania



Rys. 7. Wymiary komory mieszania, (rzut poziomy)

Model został zdyskretyzowany przy użyciu niestrukturalnej siatki trójkątnej (ang. *tri-pave*) o gęstości 20 mm. Przy użyciu programu Fluent, w celu uzyskania dokładniejszych wyników i skrócenia czasu obliczeniowego, dokonano konwersji na siatkę wielościnną (ang. *polyhedra*).

Przy projektowaniu siatki obliczeniowej wykorzystano porównania z danymi eksperymentalnymi i modelem obliczeniowym dla zagadnienia (ang. *test case*) propagacji strumienia propanu, opublikowanymi przez firmę Fluent w podręczniku walidacji [2006].

3.1.2. Warunki brzegowe

Podczas pomiaru przepływu i pól stężeń metanu w chodniku zarejestrowano stan ustalony dla normalnych warunków przepływu, stan przejściowy wywołany dławieniem przepływu w chodniku oraz stan przy zmniejszonym o 20% przepływie. W niniejszej pracy ograniczono się do analizy dwóch stanów ustalonych – dla normalnego i przydławionego przepływu. Uzyskując dane o strumieniu objętości przepływu było możliwe porównanie metod numerycznych z wynikami pomiarów dla dwóch wariantów różniących się średnią wartością prędkości na wlocie:

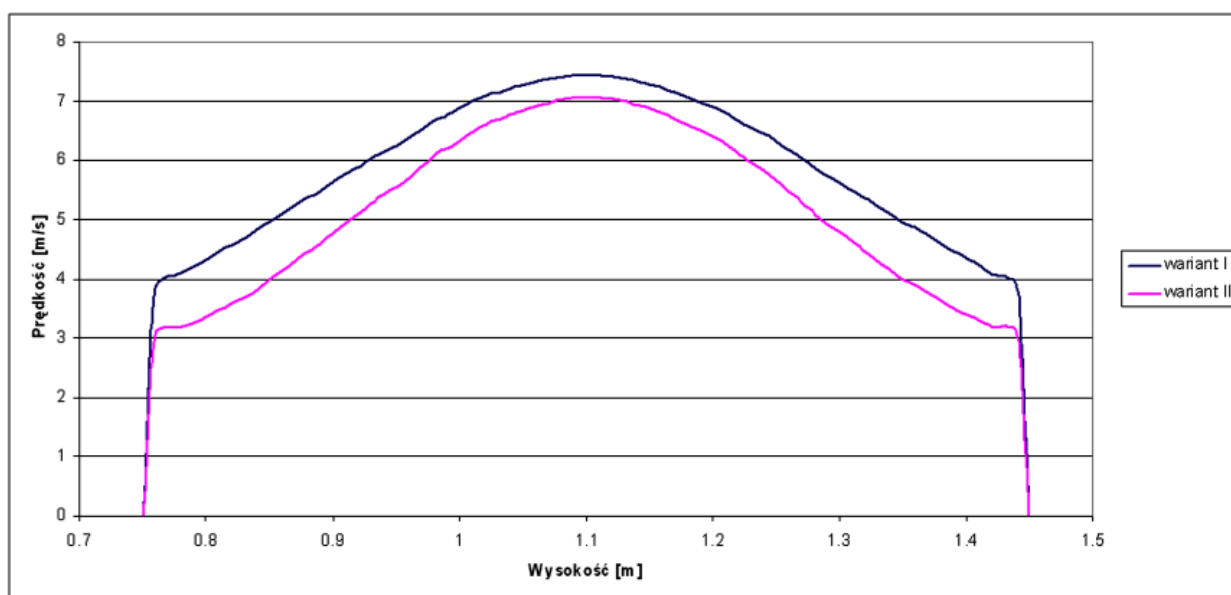
- wariant I – 4.11 m/s,
- wariant II – 3.25 m/s.

Przyjęto płaski profil prędkości w przekroju, którym powietrze z chodnika wpływa do komory mieszania. Przy dopływie z iniektora zastosowano uproszczone podejście, w którym nie odtwarzano procesu zasysania mieszanki metanu z powietrzem przez strugę sprężonego powietrza w iniektorze. Przyjęto jednorodny profil prędkości (ang. *velocity inlet*) w przekroju wlotowym modelu iniektora o wartości 41.40 m/s, tak aby otrzymać żądany strumień mieszanki metanu i powietrza o stężeniu 15% metanu. Założono, że w dyfuzorze iniektora wytworzy się odpowiedni profil prędkości na jego wylocie. Zadano warunki swobodnego wypływu z komory mieszania (ang. *outflow*).

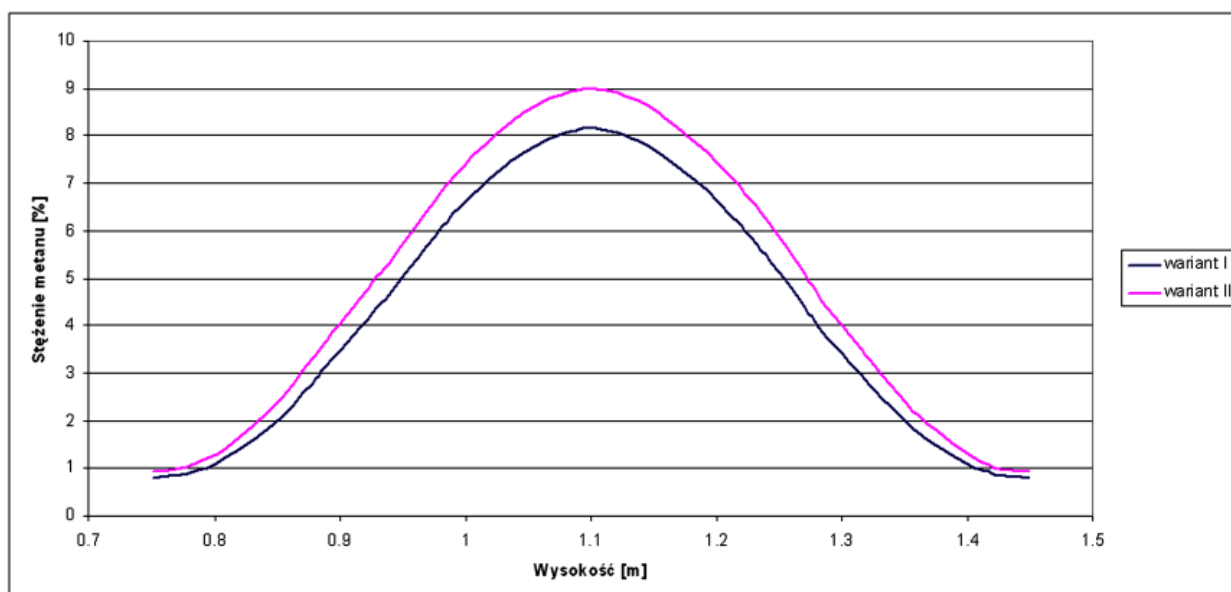
3.1.3. Omówienie wyników

Przykładowe profile prędkości na wylocie komory mieszania zamieszczono na rys. 8.

Wyraźnie zauważalny jest wpływ zmiany prędkości powietrza napływającego do komory mieszania w skutek regulacji prowadzącej do zmniejszenia wydatku w wyrobisku.



Rys. 8. Profile prędkości na wylocie komory mieszania dla dwóch wariantów

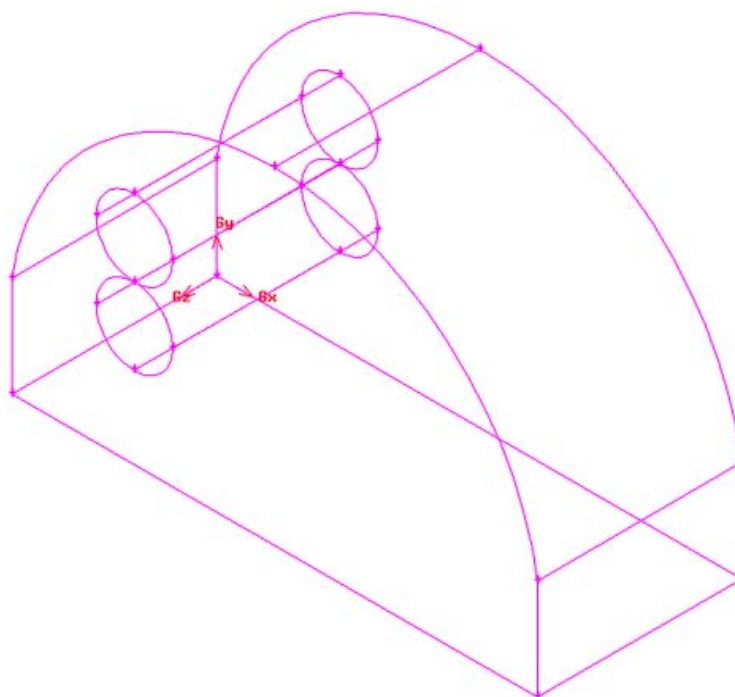


Rys. 9. Rozkład stężeń metanu na wylocie komory mieszania dla dwóch wariantów

Na rysunku 9 zaprezentowano rozkład stężeń metanu na wylocie z komory mieszania. Stwierdzono, że przy zadanych warunkach brzegowych struga metanu wypływająca ze strumienicy nie dociera do ścian komór mieszania, co za tym idzie, komora mieszania nie spełnia swojego zadania. Obliczone profile nie zostały zweryfikowane doświadczalnie. Wskazane byłoby wykonanie dodatkowych pomiarów dla weryfikacji. Ewentualnie można rozważyć wprowadzenie modyfikacji konstrukcji – poprzez wprowadzenie dodatkowych elementów na przykład kierownic, które usprawniłyby proces mieszania poprzez zawirowanie strugi.

3.2. Symulacja rozplywu powietrza w odcinku chodnika kopalnianego zawierającym stację odmetanowania

Zagadnienie to sformułowano dla oszacowania kształtu profilu prędkości powietrza we fragmencie chodnika kopalnianego na długości komór mieszania zarówno dla normalnego jak i przydławionego przepływu. Na zaprojektowany model (Rys. 10) nałożono niestrukturalną siatkę trójkątną typu *tri-pave* a następnie dokonano konwersji na siatkę wielościenneą typu *polyhedra*.



Rys. 10. Geometria chodnika kopalnianego na długości komór mieszania

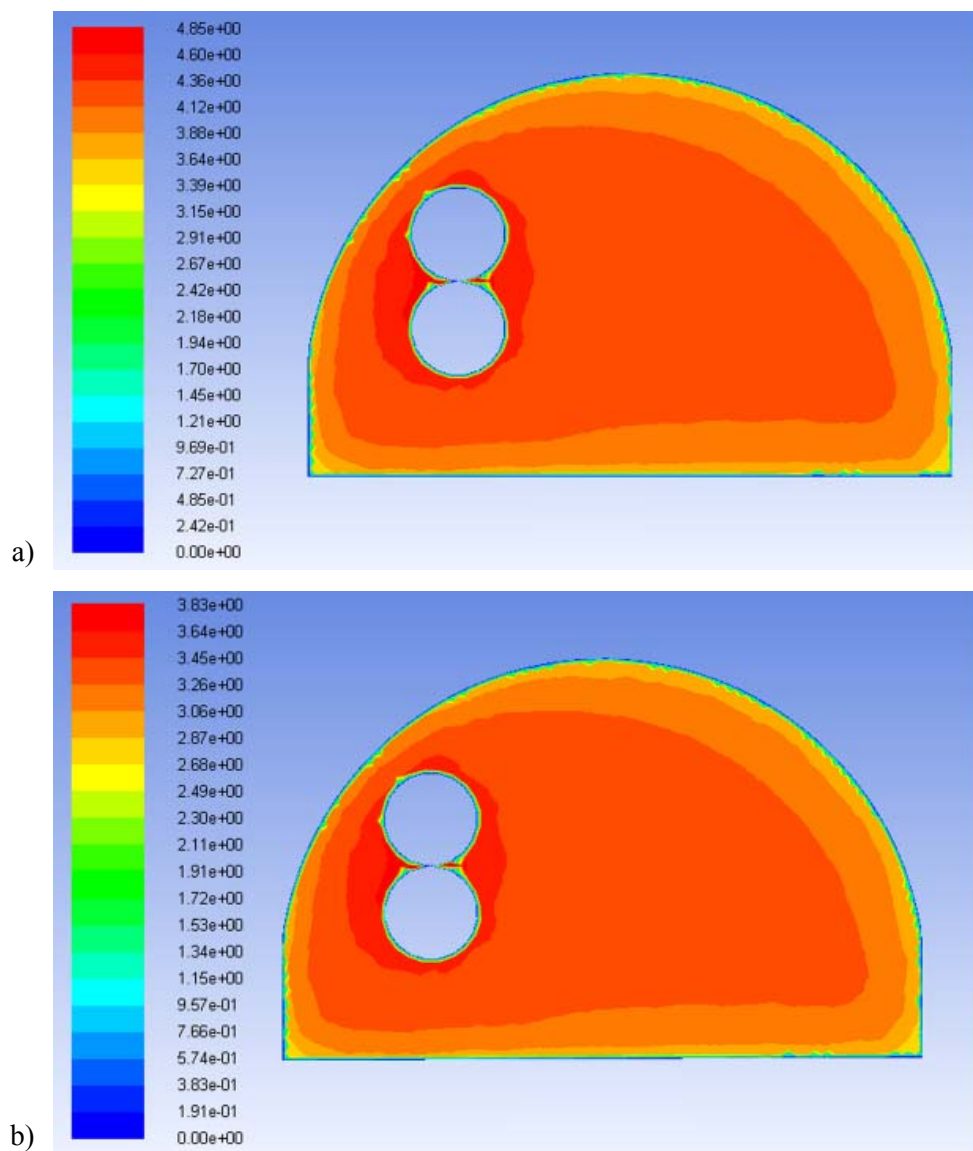
Najpierw obliczono rozwinięty profil prędkości w chodniku nie zawierającym komór mieszania. Następnie zadano go jako profil wlotowy, obliczono ustalony przepływ i zapisano warunki na wylocie. Kształt profilu wylotowego dla poszczególnych wariantów przedstawiono na Rys. 11.

3.3. Symulacja rozplywu mieszaniny powietrza i metanu w odcinku chodnika kopalnianego zawierającym stację odmetanowania

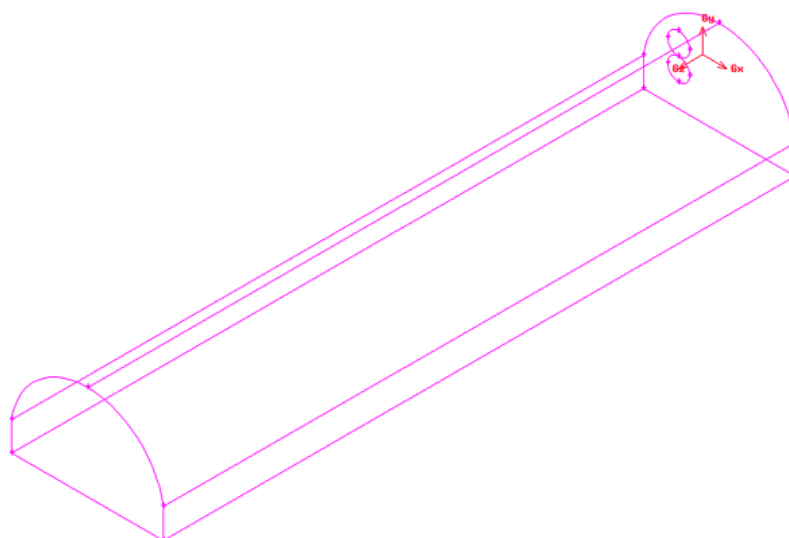
W ostatnim etapie, mającym na celu oszacowanie rozplywu metanu w chodniku kopalnianym za stacją iniekcyjną, zaprojektowano fragment modelu chodnika o długości 20 m (Rys. 12). Długość ta była wystarczającą dla objęcia całej stacji iniekcyjnej oraz przekroju pomiarowego.

3.3.1. Obszar obliczeniowy

Podobnie jak w etapie I oraz II, model został zdyskretyzowany niestrukturalną siatką trójkątną typu *tri-pave* a następnie dokonano konwersji na siatkę wielościenneą typu *polyhedra*.



Rys. 11. Rozkład prędkości przepływu powietrza w chodniku w płaszczyźnie wylotu komór mieszania:
a) – wariant I, b) – wariant II



Rys. 12. Geometria obszaru mieszania

3.3.2. Warunki brzegowe

Przekrój dolotowy obszaru obliczeniowego był sumą logiczną dwóch okrągłych wylotów z komór mieszania i pozostałej części przekroju wyrobiska, którą dopływało powietrze wentylacyjne. Profile prędkości i pola stężeń na wylocie każdej z komór mieszania dla poszczególnych wariantów obliczono w rozdziale 3.1, natomiast profile prędkości dopływającego powietrza został obliczony w rozdziale 3.2. W przekroju wylotowym zadano warunki swobodnego wypływu.

4. Porównanie symulacji komputerowej z wynikami pomiarów

Uzyskane wyniki przeprowadzonych obliczeń poszczególnych wariantów przedstawiono w formie tabelarycznej, przedstawiającej porównanie wartości stężeń metanu zarejestrowanych czujnikami z wynikami symulacji przy użyciu programu Fluent.

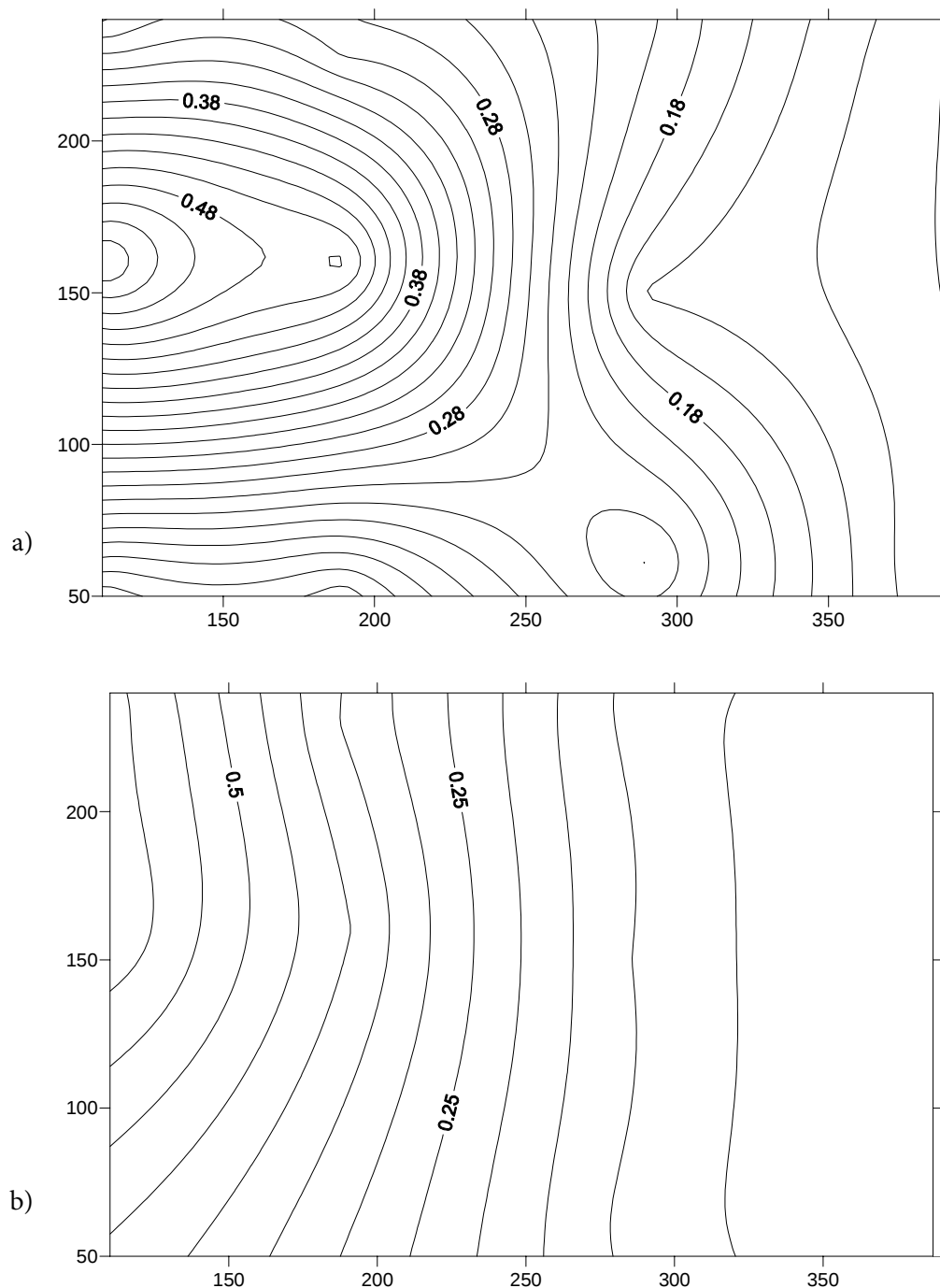
Tab. 3. Wariant I – porównanie zarejestrowanych stężeń metanu z obliczeniowymi

Nr czujnika	Wartości zmierzone [%]	Wartości obliczone [%]
113	0.100	0.006
158	0.262	0.074
60	0.108	0.294
105	0.107	0.438
188	0.100	0.008
151	0.138	0.090
182	0.483	0.404
214	0.562	0.642
169	0.100	0.010
219	0.205	0.073
111	0.294	0.340
207	0.278	0.617
stężenie średnie	0.228	0.250

Tab. 3. Wariant II – porównanie zarejestrowanych stężeń metanu z obliczeniowymi

Nr czujnika	Wartości zmierzone [%]	Wartości obliczone [%]
113	0.100	0.008
158	0.300	0.093
60	0.146	0.369
105	0.145	0.549
188	0.126	0.011
151	0.235	0.114
182	0.587	0.506
214	0.754	0.801
169	0.100	0.012
219	0.300	0.092
111	0.350	0.427
207	0.358	0.770
stężenie średnie	0.292	0.313

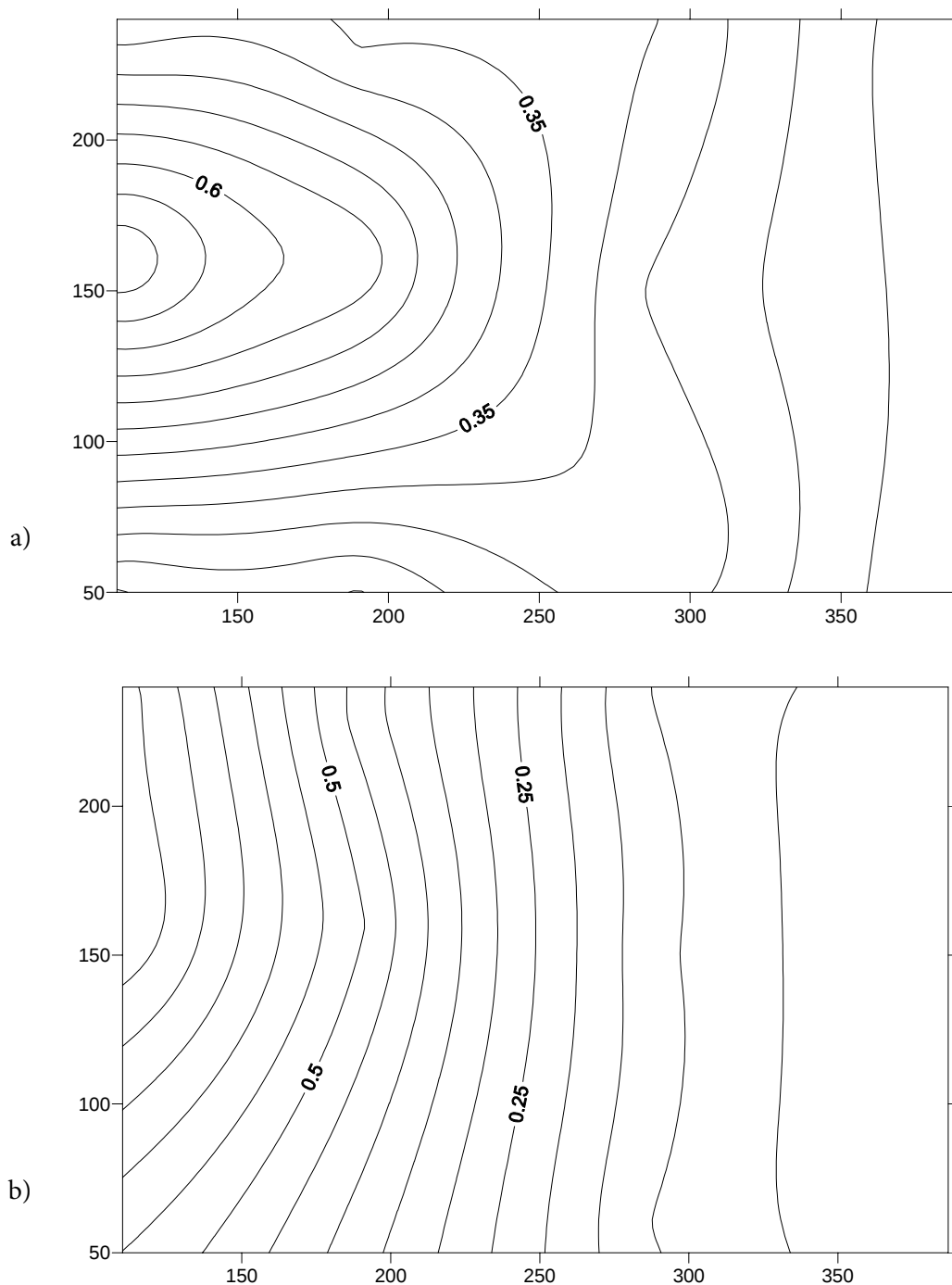
Wyniki zostały również przedstawione w formie graficznej w postaci izolinii rozkładu stężeń metanu w obszarze ustawionych czujników. Rysunek 13 przedstawia porównanie rozkładu stężeń dla wariantu I, rysunek 14 dla wariantu II.



Rys. 13. Izolinie rozkładu stężeń metanu dla wariantu I: a) – odczyt z metanomierzy, b) – wyniki symulacji

5. Podsumowanie

Celem niniejszej publikacji było przedstawienie wyników prac, zmierzających do pełnego wykorzystania możliwości badania propagacji mieszaniny powietrza i metanu w wyrobiskach kopalnianych jakie oferuje stacja inżektorowa. Obiekt ten jest względnie łatwo dostępny i niezmienny w długim okresie czasu. Badania w tym rejonie nie kolidują z działalnością wydobywczą kopalni. Można w nim w sposób bezpieczny i powtarzalny prowadzić badania w warunkach wykazujących wiele podobieństw do chodników w rejonie ściany wydobywczej. Uzyskanie dobrej zgodności obliczeń z danymi z pomiarów dla stacji zwiększa szansę na opracowanie właściwej metodyki zarówno pomiarów jak i symulacji w złożonych, zmiennych w czasie i trudno dostępnych obiektach w rejonie ścian wydobywczych.



Rys. 14. Izolinie rozkładu stężeń metanu dla wariantu I: a) – odczyt z metanomierzy, b) – wyniki symulacji

Przeprowadzono wstępne badania porównawcze pomiaru rozkładu stężeń metanu w przekroju chodnika za iniekcyjną stacją odmetanowania z symulacją komputerową propagacji strugi metanu. W symulacji wykorzystano metody Numerycznej Mechaniki Płynów, w szczególności metodę objętości skończonej dla turbulentnego przepływu mieszanin gazów. Uzyskane wyniki wykazują zauważalne różnice, zwłaszcza w obrębie strugi. Wśród przypuszczalnych przyczyn rozbieżności można wymienić przede wszystkim niewystarczające dane potrzebne zarówno dla sformułowania warunków brzegowych dla symulacji jak i weryfikacji poprawności modelowania. Rozbieżności te wskazują na trudności w odtworzeniu zjawiska, prawdopodobnie wskutek wrażliwości rozwiązania na warunki brzegowe. Kolejną przyczyną różnic może być uproszczenia w geometrycznej reprezentacji obiektu. Skutki takich uproszczeń zostały zaprezentowane w artykule [Janus i in. 2011]. Autorzy na ten moment nie dysponują dokładną dokumentacją ukształtowania badanego fragmentu chodnika jak i też elementów konstrukcyjnych znajdujących się w nim.

W celu uzyskania pełniejszego obrazu rzeczywistego przepływu w badanym fragmencie chodnika należy dokonywać większej ilości pomiarów tj:

- pomiar wydatku metanu i składu mieszanki dopływającej do strumienicy.
- pomiar prędkości i stężeń na wylocie komór mieszania
- oszacowanie ilości sprężonego powietrza zasilającego strumienicę
- pomiary rozkładów pól prędkości i stężeń metanu w przekrojach chodnika:
 - przed stacją (dla określenia warunków brzegowych)
 - w kilku miejscach za stacją dla zobrazowania propagacji strugi

Do pomiarów w przekrojach chodnika zostanie wykorzystany wielopunktowy system pomiaru pól prędkości, w projektowanej wersji sprzężonej z jednoczesnym wielopunktowym pomiarem stężeń metanu w miejscach pomiaru prędkości.

Należy również w większym stopniu zwracać uwagę na elementy mogące mieć wpływ na zaburzenia rozprzysygu strugi. Uzyskanie takich informacji pozwoli w przyszłości na dokładniejsze zaprojektowanie modelu obliczeniowego oraz dobór odpowiednich warunków brzegowych dla symulacji.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Branny M. [2000]: *Rozkład prędkości, temperatury i koncentracji gazów w komorach oraz strefach przodkowych wyrobisk z wentylacją odrębną*. AGH Uczeln. Wyd. Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- Fluent Inc. [2006]: *FLUENT 6.3 Validation Guide*, Wyd. Fluent Inc. s. 178.
- Janus J., Krawczyk J., Kruczkowski J. [2011]: *Porównanie symulacji numerycznych z wynikami pomiarów rozkładów pól prędkości w przekrojach chodników kopalnianych*. Artykuł złożony do druku w Pracach IMG-PAN.
- Kelsey A., Lea C., Lowndes I., Whittles D., Ren T. X. [2003]: *CFD modeling of methane movement in mines*. 30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
- Kissell F.N. [2006]: *Handbook for Methane Control in Mining*. DHHS [NIOSH] Publication No. 2006-127, Information Circular 9486, 2006 Jun. :1-184.

Experimental and model examination of the process of air and methane mixing in a stream created by an methane drainage injector station

Abstract

One of the common reasons behind mining disasters is the occurrence of local accumulations of methane in mine excavations. Methane is washed out of the post-mining excavations and diluted by ventilation air. Modelling the process of methane dilution in an air stream is an essential element for precise identification of the areas prone to methane outbursts. Tools for such modelling are provided by computational fluid mechanics, and by the finite volume method in particular. However, if this method is to be used, validation is necessary. For the purpose of comparison, one can make use of the measurement results for a given test case, bearing a satisfactory resemblance to the discussed issues. An example of such an issue can be the process of propagating the stream of the air-methane mixture created by an underground methane drainage injector station. Preliminary comparison of the calculations and measurements was made. Additionally, methodology of further measurements was specified with a view to obtaining a more comprehensive picture of the actual flow.

Keywords: numerical fluid mechanics, validation, methane, injector, stream