

Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii i Automatyzacji Produkcji

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Doroty Palka nt.: „Zastosowanie badań modelowych do analizy stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej”

Promotor: dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. PŚ.

Promotor pomocniczy: dr inż. Magdalena Tutak

Podstawa opracowania: pismo z dnia 15.02.2023 r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, prof. dr. hab. inż. Ewy Majchrzak

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 231 stron, a w tym: streszczenie w języku polskim (2 str.) i w języku angielskim (2 str.), spis treści (2 str.), zasadniczą część składającą się z 8 rozdziałów (200 str.), wykaz 355 pozycji bibliografii (19 str.), spis rysunków (4 str.), spis tabel (2 str.).

We wprowadzeniu - rozdział 1 (s.7-s.10) Autorka rozprawy zwraca uwagę na główne uwarunkowania, które wpływają na podjęcie decyzji odnośnie do planowanych badań, tj.:

- możliwość szerokiej, wielowariantowej analizy zjawisk, które w warunkach rzeczywistych są trudne bądź praktycznie niemożliwe do badania, a uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi jest zbyt skomplikowane, a nawet niemożliwe;
- zastosowanie badań modelowych w przypadkach, gdy bezpośrednie wykonywanie eksperymentów w warunkach rzeczywistych na fizycznym modelu jest zbyt pracochłonne, niebezpieczne lub kosztowne, albo wręcz niemożliwe do przeprowadzenia;
- stosując badania modelowe należy mieć na uwadze ich ograniczenia, a przede wszystkim to, że modele odwzorowują analizowane zjawisko, proces lub obiekt w sposób przybliżony, przez co uzyskane wyniki mogą różnić się od rzeczywistych;
- produkcja górnicza należy do najbardziej niebezpiecznych procesów, a zagrożenie metanowe jest szczególnie niebezpieczne dla życia i zdrowia pracowników powodując także duże straty materialne;
- mając świadomość zalet i możliwości badań modelowych oraz symulacji komputerowych, a także ograniczeń tego typu prac, Autorka rozprawy postanowiła zastosować je do badania stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej, bowiem modelowanie i symulacja różnego typu zjawisk oraz procesów i obiektów ułatwia ich badanie, a także zrozumienie istoty ich działania.

W świetle tych uwarunkowań podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję za w pełni uzasadniony, gdyż jest on aktualny oraz ważny z naukowego i użytecznego punktu widzenia. Należy też podkreślić, że poprawa bezpieczeństwa i efektywności procesów produkcyjnych należą do podstawowych problemów inżynierii mechanicznej, w szczególności w obszarze produkcji.

W rozdziale 2 - uzasadnienie celowości podjęcia tematu (s.11-s.24) Pani mgr inż. Dorota Palka bazując na analizie obszernej bibliografii wykazała, że:

- badanie stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej może być realizowane z zastosowaniem badań modelowych i symulacji komputerowej;

- wpływ zagrożenia metanowego na bezpieczeństwo i efektywność procesu produkcji górniczej jest znaczący;
- celowe jest podjęcie zaproponowanego tematu pracy oraz opracowanie nowej metodyki badań stanu zagrożenia metanowego, opartej na modelu strukturalnym procesu, wynikach pomiarów w warunkach rzeczywistych oraz wykorzystanie metody objętości skończonych.

Te stwierdzenia zostały poparte analizą obszernej bibliografii dotyczącej:

- roli i znaczenia badań modelowych w analizie stanu zagrożenia metanowego;
- wpływu zagrożenia metanowego na bezpieczeństwo i efektywność procesu produkcji górniczej;

Analiza została uzupełniona opracowaniami własnymi Doktorantki, które dotyczyły:

- zestawienia niebezpiecznych zdarzeń związanych z zagrożeniem metanowym wraz z wielkością wydobywania węgla kamiennego w polskich kopalniach w latach 2008-2021 (rys.2.2);
- metanowości pokładów węglowych eksploatowanych w Polsce w latach 2008-2021 wraz z ilością metanu ujętego przez systemy odmetanowania oraz metanu zagospodarowanego (rys.2.3);
- zestawienia czasów przekroczeń dopuszczalnych stężeń metanu oraz postojów w jednej ze ścian eksploatacyjnych w ciągu jednego miesiąca pracy (rys.2.4).

Powstanie mieszaniny wybuchowej o określonym stężeniu metanu w powietrzu jest czynnikiem decydującym o zaistnieniu pożaru i/lub wybuchu. Stan ten ujmuje „trójkąt wybuchowości Cowarda”, który Doktorantka przedstawiła na rys.2.5. Dla określenia stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach górniczych są prowadzone pomiary stężenia metanu w określonych punktach tych wyrobisk. Przykład (rys.2.6) rozmieszczenia metanomierzy w wyrobiskach górniczych w rejonie ściany eksploatacyjnej opracowała Doktorantka na podstawie danych z przedsiębiorstwa górniczego.

W podsumowaniu tego rozdziału Autorka rozprawy stwierdza m in, że „... zagrożenie metanowe stanowi poważny problem dla bezpieczeństwa i efektywności procesu produkcji górniczej. Dotychczasowe metody diagnozowania i prognozowania stanu zagrożenia metanowego nie do końca spełniają swoją rolę, o czym świadczą zaistniałe zdarzenia oraz występujące coraz częściej w trakcie eksploatacji nieplanowane przerwy spowodowane przekroczeniem dopuszczalnych stężeń metanu”.

„Uwzględniając obecny stan badań i działań podejmowanych dla ograniczenia zagrożenia metanowego, w pełni zasadnym jest opracowanie nowej metodyki oceny stanu tego zagrożenia umożliwiającej wyznaczenie jego miary, czyli stężenia metanu, w poszczególnych punktach rejonu eksploatacji. Te wymagania uzasadniają, biorąc także pod uwagę warunki środowiskowe w jakich prowadzona jest eksploatacja, wykorzystanie do tego celu badań modelowych, opartych na modelach strukturalnych i wykorzystujących obliczeniową mechanikę płynów”.

Rozdział 3 - cel i zakres pracy (s.25- s.28) zawiera klarownie przedstawioną koncepcję przeprowadzenia badań.

Celem poznawczym jest opracowanie metodyki wyznaczania niebezpiecznych stref w wyrobiskach górniczych w rejonie prowadzonej produkcji węgla, opartej na badaniach modelowych i wynikach pomiarów zagrożeń metanowych w warunkach rzeczywistych.

Zostały również określone także **cele szczegółowe**, zawierające:

- „...opracowanie metody pozyskiwania danych o parametrach wentylacyjnych i wytrzymałościowych skał w rejonie prowadzonej eksploatacji;

- *opracowanie modelu strukturalnego rejonu eksploatacji górniczej do wyznaczania rozkładów stężeń metanu oraz innych składników atmosfery kopalnianej w tym rejonie;*
- *uwzględnienie w opracowanym modelu zrobów zawałowych, jako ośrodka porowatego i przepuszczalnego;*
- *określenie wpływu pomocniczych urządzeń wentylacyjnych na rozkład stężenia metanu w badanym rejonie;*
- *wyznaczenie wpływu zmienności parametrów wentylacyjnych, wynikających np. ze zmiany wydajności eksploatacji na rozkład stężenia metanu w badanym rejonie”.*

Sformułowany został **cel utylitarny** pracy, którym jest „...opracowanie wytycznych dla poprawy stanu bezpieczeństwa metanowego w procesie produkcji górniczej oraz wynikającej z tego poprawy efektywności tego procesu”.

Zaproponowane przez Doktorantkę cele szczegółowe zwracają uwagę na konieczność podjęcia obszernych, interdyscyplinarnych badań w ramach realizowanej pracy doktorskiej.

Rozdział 4 - charakterystyka badań modelowych (s.29-s.51). We wprowadzeniu do tego rozdziału Doktoranta przedstawiła rodzaje i istotę modelowych badań doświadczalnych oraz matematycznych.

Modelowanie doświadczalne dotyczy zagadnień opartych na prawdopodobieństwie fizycznym lub na analogiach fizycznych. Badania te są prowadzone z wykorzystaniem analogii zjawisk zachodzących w określonej skali i charakteryzujących się podobnymi prawami.

Modelowanie matematyczne dotyczy zastosowania języka matematyki do opisu zachowania układu, procesu czy też zjawiska. Podstawowe znaczenie ma w tym przypadku model matematyczny, który reprezentuje istniejący lub hipotetyczny fragment rzeczywistości, tworzony w określonym celu, z wykorzystaniem skończonego zbioru symboli i operatorów matematycznych. Modele matematyczne są wykorzystywane między innymi w symulacjach komputerowych, które umożliwiają weryfikację wpływu istotnych czynników na opracowany model oraz analizę zjawisk i badanych procesów. Zaletą jest możliwość wprowadzania korekt i ponownego testowania modelu.

Pani mgr inż. D. Palka trafnie wybrała do badań modelowych metodę numerycznej mechaniki płynów (*CFD - Computational Fluid Dynamics*), która jest najszerszej stosowaną metodą umożliwiającą wirtualne badanie zjawisk fizyko-chemicznych, związanych z przepływem płynów. CFD bazuje na równaniach opisujących pole ciśnienia i prędkości przepływu oraz na równaniach zachowania ciągłości i przepływu Naviera-Stokesa. Metoda ta w połączeniu z nowoczesnymi systemami informatycznymi znajduje zastosowanie do badania tych procesów w górnictwie, w tym do badań zagrożenia metanowego.

Doktorantka obszernie omówiła te zagadnienia podkreślając także, że problematyka mechaniki górotworu ściśle wiąże się z problemem współpracy obudowy górniczej z górotworem.

Kolejnym i szczególnie ważnym zagadnieniem, które podjęła Doktorantka jest zastosowanie numerycznej mechaniki płynów w badaniach naukowych. **Analiza literatury z tego zakresu została wykonana w sposób, który może prezentowany doktorantom jako wzorcowy** (np. w szkole doktorskiej). Wykazała, że występuje luka badawcza „...w zakresie kompleksowego podejścia do badania stanu zagrożenia metanowego w rejonie prowadzonej podziemnej eksploatacji, z uwzględnieniem zrobów zawałowych, jako ośrodka przepuszczalnego oraz wykorzystania pomocniczych urządzeń wentylacyjnych oraz wyników badań w warunkach rzeczywistych, w celu poprawy stanu bezpieczeństwa w tym rejonie”.

Dlatego za w pełni trafny uznaje sformułowany wniosek końcowy, wynikający z tej analizy, iż „ w pełni zasadnym jest zatem przyjęcie do oceny stanu zagrożenia metanowego

metody badań modelowych oraz wykorzystanie do tego celu numerycznej mechaniki płynów i metody objętości skończonych”.

Rozdział 5 - charakterystyka procesu podziemnej produkcji węgla kamiennego i występujących w trakcie jego realizacji zagrożeń naturalnych (s.52 - s.85) zawiera kompleksowe ujęcie podziemnego procesu produkcji węgla kamiennego, który syntetycznie został przedstawiony na rys.5.1. Obejmuje on procesy realizowane w podziemnej części kopalni oraz procesy realizowane na powierzchni. Każdy z tych obszarów został odpowiednio omówiony.

Jako kluczowy problem w odniesieniu do zakresu rozprawy Doktorantka uznała „...działania realizowane w podziemnej części kopalni, w szczególności te związane z samą eksploatacją górotworu”. „...jest bowiem najbardziej narażony na występowanie i oddziaływanie zagrożeń naturalnych, które mają znaczący wpływ na bezpieczeństwo i efektywność całego procesu produkcji”.

Korzystając z danych przemysłowych zawartych w sprawozdaniach Wyższego Urzędu Górniczego **Pani mgr D. Palka wykonała szereg analiz i zestawień tabelarycznych oraz wykresów dokumentujących różnorakie zagrożenia naturalne** - pożary, zapalenia i wybuchy metanu, wybuchy pyłu węglowego, zawały, tąpnięcia, wyrzuty gazów i skał, występujące w górnictwie węgla kamiennego w Polsce. **Wnioski wynikające z tych obszernych analiz zwracają w szczególności uwagę na fakt, iż zagrożenie metanem w tych kopalniach jest bardzo wysokie.**

Niezależnie od stanu zagrożeń metanowych w kopalniach Doktoranta zauważa także, „...że metan jest bardzo niebezpiecznym gazem cieplarnianym i jego emisja do atmosfery także bardzo niekorzystnie wpływa na klimat i środowisko naturalne”.

Zagrożenie metanowe znacząco wpływa również na efektywność procesu produkcyjnego w górnictwie powodując (wymuszając) przerwy w eksploatacji węgla. Jest to zatem kolejne uzasadnienie do podjęcia badań „...w celu ograniczenia zagrożenia metanowego poprzez opracowanie metodyki wyznaczania jego rozkładów w rejonie prowadzonej eksploatacji”.

W podsumowaniu tej części rozprawy doktorskiej Kandydatka podkreśla, że „...zastosowanie badań modelowych do oceny stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej powinno być traktowane, jako kolejny etap działań w celu poprawy stanu bezpieczeństwa oraz efektywności tego procesu”.

Rozdział 6 - metodyka oceny zagrożenia metanowego w procesie podziemnej produkcji górniczej (s.86 - s.137). Główne zagadnienia podjęte w ramach zaproponowanej metodyki dotyczą opracowania strukturalnego modelu badanego rejonu oraz metody pozyskiwania parametrów wentylacyjnych, geometrycznych i górniczo-geologicznych, niezbędnych do opracowania tego modelu. Końcowym etapem będzie weryfikacja i walidacja modelu. Części składowe metodyki obejmują opracowanie:

- sposobu pozyskiwania rzeczywistych danych wentylacyjnych oraz geometrycznych i górniczo-geologicznych o realizowanym procesie produkcji;
- metody wyznaczania przepuszczalność zróbów zawałowych;
- strukturalnego modelu badanego rejonu;
- przeprowadzenie badań zasadniczych i sformułowanie końcowych wniosków.

Schemat metodyki badawczej do oceny stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej został klarownie przedstawiony na rys.6.1, a każdy z etapów został szczegółowo omówiony i udokumentowany przez Doktorantkę.

Zakres pozyskiwania danych dotyczył:

- systemów przewietrzania ścian eksploatacyjnych z obszerną ich charakterystyką (tab.6.1);
- systemów monitorowania zagrożeń wentylacyjnych wraz opracowanymi schematami zarządzania monitoringiem (rys.6.2) i schematem działania systemu monitoringu

- zagrożenia metanowego (rys.6.3) oraz przykładowymi oknami systemów stosowanych w przedsiębiorstwach górniczych (rys.6.4 - rys.6.7);
- charakterystyk urządzeń pomiarowych zastosowanych w badaniach (rys.6.8 - rys.6.14 oraz tab.6.3 - tab.6.6). Przykłady widoków części plików z zarejestrowanymi danymi pomiarowymi są przedstawione na rys.6.15 - rys.6.16;
- metod wyznaczania przepuszczalności zrobów zawałowych (schemat tworzenia się strefy zawału został przedstawiony na rys.6.17).

Możliwie dogłębne rozpoznanie i analiza przepuszczalności zrobów zawałowych jest istotne ze względu ich wpływ na procesy wentylacyjne w kopalniach zawałowych. Doktorantka przeprowadziła taką analizę z uwzględnieniem odpowiednich zależności dotyczących;

- oporu warstwowania skał stropowych (wzór 6.1);
- oporu rozwarstwiania skał stropowych (wzory 6.2 i 6.3) oraz współczynników w tych wzorach, odniesionych do stanów rzeczywistych w rejonie eksploatacji (wzory 6.4 - 6.6).

Do badań stanu zagrożenia metanowego Doktorantka zastosowała metodę objętości skończonych (*MOS, FVM - Finite Volume Method*), która jest jedną z głównych metod stosowanych w numerycznej mechanice płynów (*CFD*) do dyskretyzacji obszaru obliczeniowego. Zasady tworzenia siatek w procedurach dyskretyzacji zostały przedstawione na rys.6.18. Wyboru tej metody dokonała po dość gruntownej analizie zalet i wad metod numerycznych, opartych na modelowaniu strukturalnym (tab.6.7).

Algorytm obliczeń dla metody objętości skończonych został przedstawiony na rys.6.20. Zawiera on trzy główne bloki obliczeniowe dotyczące rozwiązania równań:

- zasady zachowania masy (wzory 6.7 - 6.9);
- zasady zachowania pędu (wzór 6.10);
- zasady zachowania energii (wzór 6.11).

Wszystkie zależności zostały odpowiednio wyjaśnione i skomentowane.

Natomiast przepływy powietrza i gazów w wyrobiskach górniczych należą do zjawisk turbulentnych, a efektami tych zjawisk są procesy turbulentnego transportu oraz zachowania masy, pędu i energii. Do symulacji prostych przepływów turbulentnych jest stosowany model DNS (*Direct Numerical Simulations*) - przykład symulacji - rys.6.21. Wymaga on bardzo gęstych siatek obliczeniowych i małego kroku całkowania w czasie, co zwiększa koszty obliczeń, a przez to ogranicza jego stosowanie.

Model LES/DES (*Large and Detached Eddy Simulation*) symuluje duże wiry o nieregularnej (anizotropowej) strukturze (przykład - rys.6.22). Wymaga zastosowania szerokiego zakresu skali czasu i długości, które wpływają na pole przepływu. Ten model nie znalazł szerszego zastosowania w rozwiązaniach przemysłowych.

Doktorantka stwierdziła, że w badaniach komputerowej mechaniki płynów (*CFD*) najczęściej wykorzystywaną metodą modelowania turbulencji jest rozwiązywanie równania RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), które jako uśrednione równanie Reynoldsa (RANS) jest przystosowane do opisu przepływów burzliwych. Jego istotę stanowi założenie, iż „...chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących przepływ wielkości fizycznych, w danym punkcie obszaru przepływu są sumą wielkości uśrednionych w czasie i składowej fluktuacji (turbulencji), która jest losową funkcją czasu i przestrzeni”. W rozprawie zostały przedstawione odpowiednie równania (wzory 6.12 - 6.15) oraz przykład symulacji numerycznej przepływu turbulentnego RANS (rys.6.23).

Ponieważ równania Naviera-Stokesa są nieliniowe, a ich uśrednianie prowadzi do generowania dodatkowych niewiadomych, konieczne jest stosownie dodatkowych metod w celu rozwiązania tych równań. **Doktorantka omówiła zwięźle te metody i stosowane modele.**

Jako narzędzie badawcze do wykonania analiz Doktorantka wybrała komercyjny program ANSYS Fluent będący jednym z najlepszych i najczęściej stosowanych programów do badania zjawisk cieplnych i przepływowych w numerycznej mechanice płynów. W pracy przedstawiła główne moduły tego programu. Opracowała tok postępowania w trakcie realizacji własnych badań modelowych w programie ANSYS Fluent (rys.6.26) oraz przykłady wygenerowanych obiektów (rys.6.27 - rys.6.29). Określiła najważniejsze właściwości wybranych modułów (przykład - program SpaceClaim).

Ważnym zadaniem w badaniach symulacyjnych jest wygenerowanie siatek, które wpływają między innymi na dokładność modelu odwzorowującego stan rzeczywisty. Doktorantka zestawiała dostępne algorytmy i metody generowania siatek CFD w oprogramowaniu ANSYS Meshing (rys.6.30), a także podała przykłady wygenerowanych siatek w tym programie (rys.6.31 i rys. 6.32).

W kolejnym kroku model wraz z wygenerowaną siatką zostaje zaimportowany do programu Ansys Fluent. Podczas jego uruchamiania, w oknie dialogowym Fluent Launcher są wybierane preferowane opcje symulacji (rys. 6.33). Przygotowanie modelu obliczeniowego wymaga podjęcia szeregu kolejnych działań, które Autorka rozprawy w pełni opisała i ujęła na rys.6.34 - rys.6.38.

Kolejna faza realizacji badań dotyczy procesu obliczeniowego, którego przykłady opracowane przez Doktorantkę zostały przedstawione na 6.39 - rys.6.41.

Zaletą opracowanej przez Doktorantkę metodyki jest jej uniwersalność i możliwość dostosowywania do rzeczywistych warunków, które są charakterystyczne dla produkcji górniczej.

Rozdział 7 - zastosowanie badań modelowych do oceny zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej (s.138 - s.198) zawiera przykład zastosowania opracowanej przez Autorkę rozprawy metodyki dla rzeczywistego rejonu eksploatacji górniczej w jednej z polskich kopalń węgla kamiennego. Charakterystyka badanego rejonu eksploatacji górniczej została odpowiednio udokumentowana (rys.7.1 - rys.7.2 oraz tab. 7.1 - tab.7.3) wraz z niezbędnymi obliczeniami (wzory 7.1 -7.3). Wyniki obliczeń prognozowanej metanowości bezwzględnej badanej ściany dla określonych wydajności eksploatacji (postępu dobowego) i przy uwzględnieniu metanowości zrobów zostały przedstawione w tab.7.4.

Opracowany model do badania zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej został wygenerowany w środowisku ANSYS. Doktorantka opracowała model geometryczny badanego rejonu (rys.7.4 - rys.7.9), którego parametry geometryczne zawiera tab.7.5.

Za trafne i słuszne rozwiązanie uznaje przyjęcie przez Doktorantkę pewnych uproszczeń, dotyczących modelu geometrycznego, w którym nie zostały uwzględnione maszyny i urządzenia wchodzące w skład wyposażenia wyrobiska ścianowego oraz chodników przyścianowych. Uzasadnieniem jest konieczny kompromis pomiędzy dokładnością obliczeń, a czasem i kosztem uzyskania rozwiązania.

Korzystając z wbudowanych algorytmów generowania różnorodnych siatek w programie ANSYS (tab.7.6), Doktorantka do przeprowadzenia badań zastosowała mieszaną metodę siatkowania, w której wykorzystwała dwie metody, tj. Tetrahedrons oraz HexDominat (przykład - rys.7.11). Uzasadnieniem wyboru tych metod jest kształt i rozmiary siatkowanych elementów, zbliżony do zrobów zawałowych, zamodelowanych prostymi bryłami (sześciścianami).

Należy podkreślić, że Pani mgr D. Palka przeprowadziła również kontrolę jakości siatki, co udokumentowała na rys.7.12 - rys.7.15 oraz w tab.7.7 - tab.7.9.

Ważnym czynnikiem jest także określenie warunków brzegowych oraz warunków początkowych w badanym rejonie. Są nimi warunki fizyko-chemiczne (tab.7.10). Przepływ mieszaniny gazów przez wyrobiska górnicze jest przepływem turbulentnym. Warunki brzegowe dla badanego rejonu w programie ANSYS Fluent zostały przedstawione w tab.7.16.

Model fizyczny stanowił bazę do utworzenia modelu matematycznego zjawisk zachodzących w badanym rejonie. Model matematyczny w postaci równań różniczkowych był podstawą do utworzenia modelu numerycznego (obliczeniowego), który został wykorzystany do analizy badanego zjawiska, tj. przepływu mieszaniny strumienia powietrza i gazów kopalnianych - w tym metanu przez wyrobiska górnicze i zroby zawałowe. Przepływ ten opisany jest równaniami zachowania masy, pędu, energii oraz turbulentnego transportu substancji chemicznych (wzory 7.5 - 7.13).

Opracowany model wraz z przyjętymi warunkami, po analizie numerycznej oraz wyznaczeniu parametrów fizycznych i chemicznych powietrza przepływającego przez badane wyrobiska oraz zroby zawałowe, umożliwił wyznaczenie rozkładów stężeń metanu w badanym rejonie i określenie stanu zagrożenia metanowego.

Końcowym etapem badań była **weryfikacja opracowanej metodyki i modelu**. Jej celem było stwierdzenie, „...czy opracowany model w akceptowalny sposób odwzorowuje badane zjawisko i jest adekwatny do koncepcji opisu tego zjawiska...”. Doktorantka dokonała porównania wartości wyznaczonych parametrów w wybranych punktach pomiarowych z wartościami uzyskanymi z pomiarów w warunkach rzeczywistych. Opracowany model badanego rejonu (rys.7.17) został poddany diagnozie (rys.7.18), która potwierdziła, że bardzo dobra zbieżność wyników została uzyskana już po ok. 1000 iteracji. Kolejne przedstawione wyniki weryfikacyjne (rys.7.17 - rys.7.21) potwierdzają poprawność odwzorowania obiektu rzeczywistego przez opracowany model.

Także walidacja opracowanej metodyki i modelu z uwagi na dokładność uzyskiwanych wyników w odniesieniu do rzeczywistych pomiarów została wykonana przez Doktorantkę w sposób profesjonalny. Proces walidacji dotyczył wyznaczenia wartości stężeń metanu oraz tlenu, a także prędkości przepływu powietrza, na podstawie badań modelowych i pomiarów w warunkach rzeczywistych, w punktach montażu czujników. Wyznaczone zostały także rozkłady tych parametrów w wybranych obszarach badanego rejonu. Wyniki tych analiz zostały obszernie udokumentowane (rys.7.22 - rys.7.39 i tab.7.11 - tab.7.11 - tab.7.31).

W pełni uzasadnione jest zatem stwierdzenie Pani mgr D. Palki zawarte w podsumowaniu tej części rozprawy, że: „... prezentowana metodyka, a w szczególności model stanowiący jej podstawową część, zostały opracowane prawidłowo i umożliwiają w szerokim zakresie analizę zjawisk wentylacyjnych zachodzących w procesie podziemnej eksploatacji. Uzyskane w procesie walidacji wyniki badań w punktach kontrolnych jednoznacznie wskazują, że są one na akceptowalnym poziomie. Można zatem przyjąć, że także w pozostałych punktach badanego rejonu wyniki uzyskane z badań modelowych poprawnie odwzorowują wartości stężeń metanu i pozostałych parametrów strumienia wentylacyjnego. Opracowany model może zostać wykorzystany do dalszych analiz procesów wentylacyjnych, związanych z podziemną eksploatacją węgla kamiennego”.

Oryginalne i ważne dla praktyki przemysłowej są informacje uzyskane na podstawie **wielowariantowej analizy stanu wentylacyjnego w badanym rejonie**. Należy podkreślić, że wybór zakresu tych badań był dokonany na podstawie analizy procesu eksploatacji oraz wywiadów eksperckich, przeprowadzonych z pracownikami służb wentylacyjnych w badanej kopalni.

Pierwszy przykład obejmował wyznaczenie rozkładów stężeń metanu dla systemów wentylacyjnych z pomocniczymi urządzeniami wentylacyjnymi i bez tych urządzeń.

Drugi przypadek dotyczył sytuacji, w której następuje zwiększenie emisji metanu w wyrobisku ścianowym na skutek zwiększenia intensywności eksploatacji.

Wyniki tych analiz zostały przedstawione w tab.7.32 - tab.7.34 oraz na rys.7.40 - rys.7.44. Ważnym osiągnięciem Doktorantki jest to, że opracowana metodyka i algorytm wskazują także

na szerokie możliwości zastosowania badań modelowych zarówno do diagnozy stanu zagrożenia metanowego, jak i do prognozowania tych stanów, z równoczesną wizualizacją i prezentacją wyników, co zdecydowanie ułatwia interpretację oraz ich zrozumienie przez podejmujących decyzję w kopalniach.

W rozdziale 8 - podsumowanie i wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań (s.199 - s.206) Autorka rozprawy potwierdza, że przedstawione wnioski poznawcze, użytkowe i propozycje podjęcia dalszych prac są w pełni efektem zrealizowanych analiz, opracowanych modeli i algorytmów badań oraz weryfikacji uzyskanych wyników.

Wieloaspektowość podjętego tematu oraz jego interdyscyplinarność uzasadniają szeroki zakres opracowania. Połączenie badań w warunkach rzeczywistych z badaniami modelowymi oraz wykorzystaniem wyników tych badań do opracowania modelu badanego rejonu, a także pozytywna weryfikacja i walidacja jednoznacznie potwierdzają wartość naukową i użytkową osiągnięć Doktorantki. Ponadto należy podkreślić, że opracowana metodyka może być wykorzystana do budowy narzędzia informatycznego, umożliwiającego wyznaczanie rozkładów stężeń metanu oraz innych gazów i parametrów wentylacyjnych w trakcie eksploatacji kopalni.

Opracowana metodyka może być także wykorzystana do badania innych zjawisk związanych z procesem eksploatacji, jak: wpływ zmiany geometrii wyrobisk na parametry wentylacyjne, uwzględnienie w tym procesie spękań górotworu i zmiany przepuszczalności zrobów zawałowych, zapylenie wyrobisk i jego wpływ na procesy wentylacyjne.

Stwierdzam, że obszerna i wieloaspektowa rozprawa doktorska została opracowana bardzo przejrzyście i starannie pod względem redakcyjnym. Badania zostały wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Również opracowanie redakcyjne pracy jest wysokim poziomem.

Uwaga ogólna: wykaz głównych pojęć i skrótów ułatwiłby czytanie i analizę tej rozprawy.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Dorota Palka przedstawiła spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu tematu rozprawy. Wykazała, że dysponuje bardzo dobrze opanowaną wiedzą logiczno-matematyczną i informatyczną do rozwiązywania złożonych problemów technicznych związanych z przemysłem wydobywczym, niezbędną do realizacji badań i merytorycznej analizy uzyskanych wyników.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z zarządzaniem eksploatacją i zapewnieniem bezpieczeństwa w przemyśle górniczym. Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także potwierdzone walory użytkowe. Uzyskane wyniki znacząco poszerzają wiedzę w zakresie możliwości prowadzenia badań modelowych w produkcji przemysłowej - w szczególności w przemyśle wydobywczym. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Palka w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Doroty Palka pt.: „Zastosowanie badań modelowych do analizy stanu zagrożenia metanowego w procesie produkcji górniczej” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r. wraz z późniejszymi zmianami, a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

Kraków, dnia 25 marca 2023 r.

Prof. Józef Gawlik

/podpis odręczny/