

Lucyna Florkowska, Jan Walaszczyk**

MODELOWANIE NUMERYCZNE STANU NAPRĘŻENIA W SĄSIEDZTWIE PRZODKA WYROBISKA ŚCIANOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM OBECNOŚCI METANU

1. Wstęp

Prowadzenie eksploatacji podziemnej złóż kopalin użytecznych wywołuje trwałe zmiany w środowisku naturalnym. Zmiany te dokonują się w największym stopniu w górotworze, którego pierwotny stan równowagi zostaje zniszczony. Wywołane eksploatacją deformacje warstw skalnych przenoszą się na powierzchnię, powodując szkody w infrastrukturze technicznej i zabudowie. Zmiany stanu naprężenia w sąsiedztwie wyrobiska górnicza obejmują także zmiany ciśnienia złożowego metanu towarzyszącego pokładom węgla. W efekcie następuje wypływ metanu zdeponowanego w złożu, co stanowi poważne zagrożenie bezpieczeństwa.

Prawidłowa prognoza stanu naprężenia w sąsiedztwie wyrobiska z uwzględnieniem zmian ciśnienia gazu, jego przepływu w pokładzie i wypływu do wyrobiska jest ważnym elementem odpowiedniego planowania robót górniczych.

W pracy przedstawiono sposób wyznaczania stanu górotworu w otoczeniu wyrobiska ścianowego, oparty na modelowaniu numerycznym MES z wykorzystaniem pakietu Abaqus.

2. Opis zagadnienia

Stan pierwotnej równowagi górotworu, będący głównie wynikiem oddziaływań grawitacyjnych i tektonicznych oraz ciśnienia porowego płynów złożowych, zostaje mocno naruszony w procesie eksploatacji podziemnej. O ile zmiany wywołane wykonywaniem wyrobisk korytarzowych mają stosunkowo niewielki zasięg, to zmiany wywołane samą eksploatacją obejmują znaczny obszar górotworu, sięgając aż do powierzchni terenu i oddziaływując na zlokalizowane w pobliżu chodniki i szyby oraz sąsiadujące wyrobiska.

* Zakład Mechaniki Skał, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków

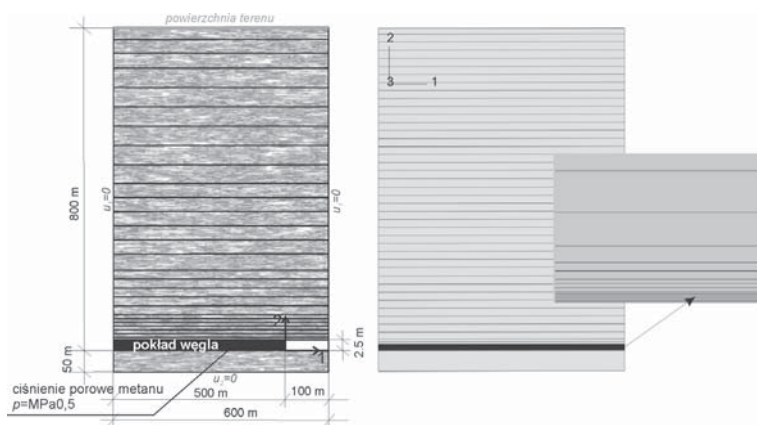
Mechanizm niszczenia skał stropowych oraz deformacji górotworu był wielokrotnie przedmiotem badań i rozważań specjalistów w dziedzinie mechaniki górotworu [6–8, 11, 12]. Warstwowa budowa górotworu, powodująca, że obszar nad wybranym wyrobiskiem jest niejednorodny wydaje się decydować o sposobie jego deformacji.

Zalegające bezpośrednio na wybranym fragmencie warstwy skalne odspajają się od siebie, następnie bloki skalne odrywają się od stropu zasypując powstałą pustkę. Utworzona w ten sposób luźna struktura wypełnia wyrobisko aż do jego samopodsadzenia. Zalegające wyżej warstwy, które również uległy odprężeniu, także uginają się, odspajają, pękają i opierają na leżącej niżej strukturze. Ponad nimi kolejne warstwy też ulegają ugięciu przenosząc deformacje aż do powierzchni terenu. Procesy te przebiegają aż do ustalenia się nowego stanu równowagi.

W pracy zaproponowano taki sposób modelowania górniczych deformacji górotworu, którego celem jest wyznaczenie stanu naprężenia panującego w pobliżu przodka wyrobiska ścianowego oraz ciśnienia złożowego metanu. Koncepcja tego modelu opiera się na warstwowej budowie górotworu, która wydaje się mieć duże znaczenia dla zachowania się nadkładu, a co za tym idzie na ukształtowanie się nowego stanu równowagi wokół wyrobiska.

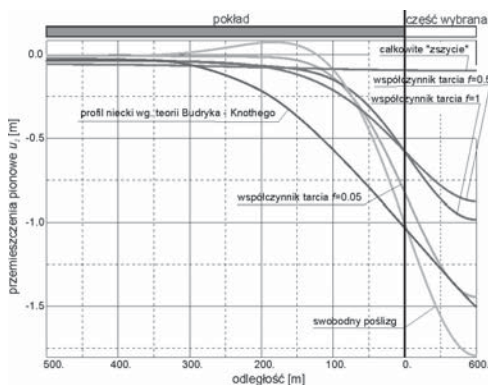
3. Model zagadnienia

Do opisu zagadnienia przyjęto model płaski (płaski stan odkształcenia), pokazany na rysunku 1. Model przedstawia myślowo wycięty fragment górotworu zawierającego pokład węgla kamiennego, w którym dodatkowo znajduje się metan pod ciśnieniem porowym 0,5 MPa. Dla uproszczenia przyjęto, że skały otaczające pokład są jednego typu i nadano im właściwości materiałowe piaskowców. Cechą charakterystyczną modelu jest wprowadzenie układu warstw, połączonych więzami kontaktowymi, w celu oddania budowy górotworu, która w istotny sposób wpływa na jego zachowanie. Model składa się z 51 warstw nadkładu, o grubości 1–20 m, warstwy reprezentującej pokład węgla oraz warstwy spagowej. Warstwy



Rys. 1. Model zagadnienia z podziałem na warstwy

nadkładu połączone zostały więzami kontaktowymi, które w całości przekazują naprężenia ściskające w kierunku normalnym do powierzchni styku aż zerwania kontaktu, które następuje, gdy charakter tych oddziaływań zmienia się na rozciągający. Na kierunku stycznym oddziaływania pomiędzy powierzchniami kontaktowymi przekazywane są według modelu tarcia Coulomba. Współczynnik tarcia coulombowskiego f pomiędzy powierzchniami kontaktowymi dobierany był w ten sposób, by profil osiadania powierzchni był jak najbardziej zbliżony do profilu niecki wynikającego z teorii Budryka–Knothego [3]. Wyniki eksperymentów numerycznych przedstawiono na rysunku 2. Ze względu na pewne niedoskonałość modelu, w szczególności w odniesieniu do warunków brzegowych, nie udało się uzyskać dokładnego profilu niecki Knothego. Najlepszą zgodność wartości obniżeń powierzchni nad wybraną częścią w opisanym modelu uzyskano dla współczynnika tarcia $f = 0,05$ i taka wartość f została zastosowana w dalszych obliczeniach.



Rys. 2. Profil powierzchni uzyskiwany z eksperymentów numerycznych z zastosowaniem różnych warunków na kontakcie warstw w odniesieniu do profilu niecki wg. teorii Budryka–Knothego

W tabeli 1 zestawiono przyjęte parametry materiałowe dla węgla oraz skał otaczających pokład. Oba rodzaje skał opisano modelem ciała idealnie sprężystego, izotropowego. Założono, że skały otaczające pokład są nieprzepuszczalne. Metan zamodelowano jako gaz ściśliwy, o ciężarze właściwym (w warunkach normalnych) $\gamma_{CH_4} = 7,024 \text{ [N/m}^3\text{]}$ i lepkości dynamicznej $\mu = 10,9 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$, którego przepływ przez pory opisywany jest prawem Darcy’ego [9]. Przyjęto, że przepuszczalność metanu zmienia się liniowo ze zmianą porowatości.

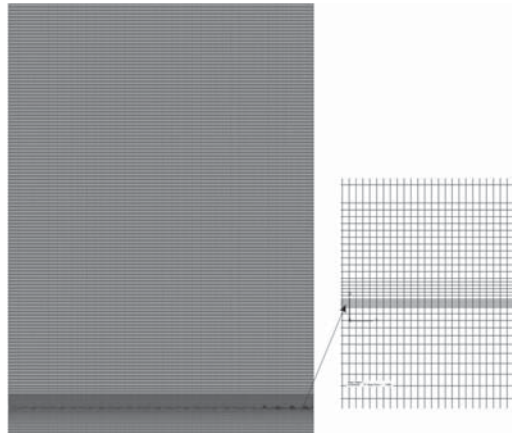
Pierwszy krok obliczeń stanowiła analiza geostatyczna. Następny krok obejmował symulację natychmiastowego wybrania części pokładu poprzez usunięcie grupy elementów stanowiących umowny obszar wyrobiska. W kolejnym kroku następował przepływ metanu w warstwie węgla i jego wypływ do wyrobiska. Analiza obejmowała 30 dni.

W wyniku dyskretyzacji przestrzennej obszaru powstał model numeryczny o ok. 156 000 stopni swobody. Siatkę elementów skończonych przedstawia rysunek 3. Obliczenia przeprowadzono w Laboratorium Obliczeń Numerycznych Mechaniki Ośrodków Wielofazowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, przy użyciu pakietu programów MES Abaqus.

TABELA 1

Przyjęte do obliczeń właściwości węgla i metanu

parametr	jednostka	węgiel	skały nadkładu i spagu
gęstość ρ	kg/m ³	1 600	2 500
porowatość początkowa n	%	5,0	—
początkowy wskaźnik porowatości $e = \frac{n}{1-n}$ gdzie n — jest porowatością	—	0,05263	—
współczynnik filtracji k	m/s	2,4·10 ⁻⁸ dla $e = 0,05263$ 2,0·10 ⁻³ dla $e = 0,06383$	—
moduł Younga E	Pa	3·10 ⁹	9·10 ⁹
współczynnik Poissona ν	—	0,25	0,22
moduł ściśliwości szkieletu	Pa	3,4·10 ⁹	—
moduł ściśliwości metanu	Pa	5·10 ⁵	—
współczynnik lepkości dynamicznej metanu	N·m/s ²	10,9·10 ⁻⁶	—

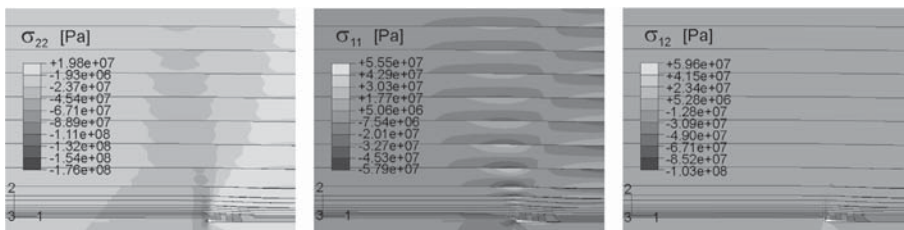


Rys. 3. Siatka elementów skończonych modelu numerycznego

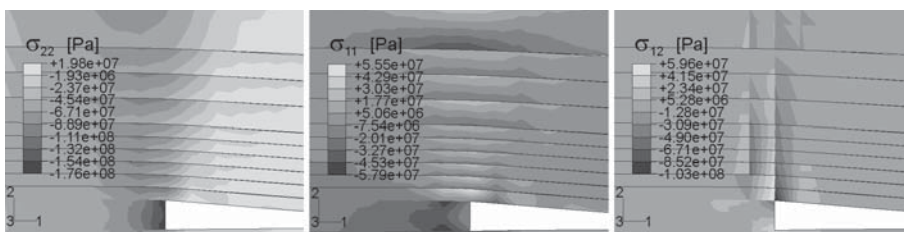
4. Analiza uzyskanych wyników

Stan początkowy układu odwzorowywał stan pierwotnych naprężeń górotworu. Przyjęto, że jest on wynikiem wyłącznie oddziaływań grawitacyjnych oraz ciśnienia złożowego metanu. W następnym kroku analizy usunięta została grupa elementów obrazujących fragment złoża, co symulowało natychmiastowe wybranie części pokładu węgla, bez zastosowania wypełnienia zrobów. Mocno ściśnięte pierwotnie obszary nad i pod pustką poeksploatacyjną uległy odprężeniu, natomiast wzrost naprężeń ściskających nastąpił przy krawędzi wyrobiska, co można zaobserwować na rysunku 4. Na mapach naprężeń widoczne jest odprężenie

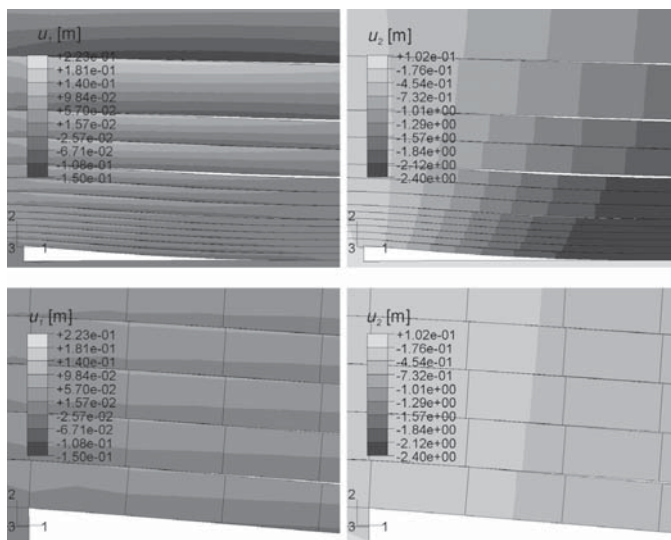
nadkładu i spągu oraz koncentracja naprężeń ściskających i ścinających przy czole wyrobiska, zwłaszcza w warstwie węgla. Odprężenie powoduje także pojawienie się naprężeń rozciągających w skałach, co, przy ich niewielkiej wytrzymałości na rozciąganie prowadzi do niszczenia struktury górotworu. Na rysunkach 4, 5 i 6 zauważyć można rozwarstwienie nadkładu będące konsekwencją tych oddziaływań.



Rys. 4. Stan naprężenia w pobliżu krawędzi wyrobiska



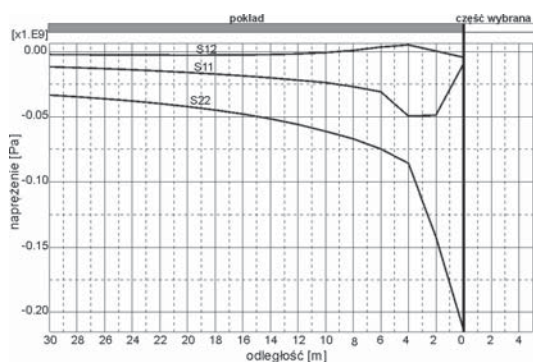
Rys. 5. Stan naprężenia w pobliżu krawędzi wyrobiska — powiększenie. Widoczne rozwarstwienie warstw stropowych (pustki Webera)



Rys. 6. Przemieszczenia górotworu oraz rozwarstwienie nadkładu w otoczeniu przodka wyrobiska

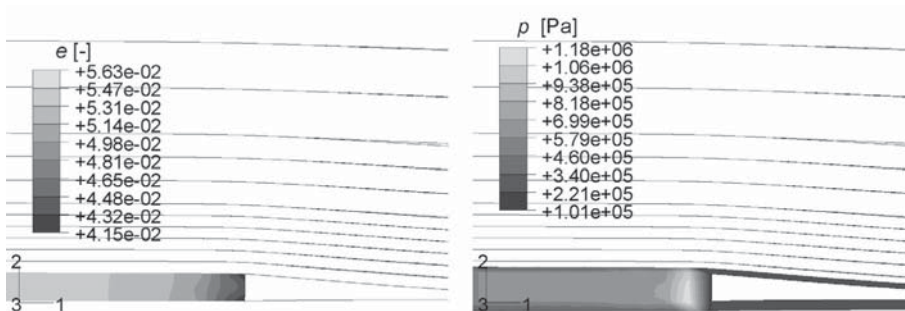
W wyniku powstania pustki poeksploatacyjnej, nastąpiło odspojenie warstw stropowych. W modelu górna krawędź geometrycznego obszaru pustki oparła się na krawędzi dolnej, co odpowiada zawalaniu się stropu wyrobiska. Mapy przemieszczeń dla całego obszaru oraz dla otoczeniu krawędzi wyrobiska przedstawia rysunek 6. Widoczna jest utrata spójności na kontaktach międzywarstwowych i przesuwanie się sąsiadujących warstw względem siebie. Tworzące się wskutek rozwarstwienia tzw. pustki Webera stanowią mogą rezerwuary metanu [4].

Silne naprężenia ściskające, koncentrujące się w sąsiedztwie przodka, powodują niszczenie struktury węgla. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy zmian naprężeń w pobliżu przodka. Widoczny jest bardzo duży wzrost wartości naprężeń normalnych σ_{22} , wynikający z nacisku stropu. Nacisk stropu wywołuje także wzrost wartości naprężeń normalnych σ_{11} , które wskutek swobody przemieszczeń w kierunku pustki, ulegają redukcji przy samej krawędzi pokładu. W wyniku koncentracji naprężeń węgiel na przodku ściany jest zatem mocno spękany i zniszczony (wyznaczone wartości naprężeń normalnych w obu kierunkach przekraczają wytrzymałość węgla na ściskanie). Zniszczenie struktury węgla przy krawędzi powoduje zredukowanie naprężeń w obszarze zniszczenia oraz dużą przepuszczalność, gdyż metan ma możliwość przepływu przez powstałe szczeliny. Ponieważ zastosowany model materiałowy nie opisuje zniszczenia i zachowania pozniszczeniowego, wzrost pionowych naprężeń ściskających na wykresie 7 utrzymuje się do samej krawędzi wyrobiska, podczas, gdy w rzeczywistości ekstremum tych oddziaływań przesunięte jest w głąb pokładu, poza strefę materiału spękanego. Konsekwencją przyjętego prawa materiałowego jest także wywołane ściśnięciem pokładu silne zmniejszenie porowatości przy samym przodku wyrobiska (rys. 8 i 9).

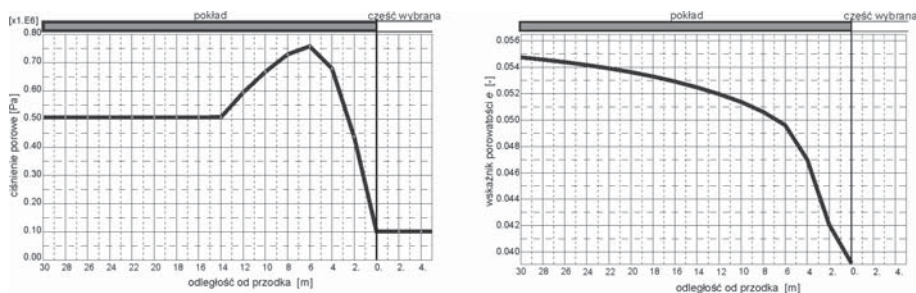


Rys. 7. Wykresy naprężeń normalnych σ_{11} i σ_{22} oraz stycznych σ_{12} w pokładzie w funkcji odległości od przodka wyrobiska

Zmniejszenie porowatości wskutek znacznych naprężeń ściskających powoduje zmniejszenie przepływu w tym obszarze, co skutkuje lokalnym wzrostem ciśnienia porowego, jak pokazano to na rysunku 9. W rzeczywistości przy czole wyrobiska zlokalizowana jest strefa spękań, w obszarze której ma miejsce szybki przepływ metanu, natomiast strefa spiętrzenia ciśnienia porowego odsunięta jest w głąb pokładu.

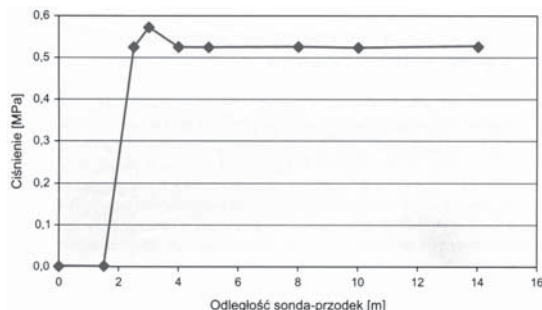


Rys. 8. Rozkład wskaźnika porowatości e oraz ciśnienia porowego p w pokładzie



Rys. 9. Rozkład wskaźnika porowatości oraz ciśnienia metanu w pobliżu przodka wyrobiska po 2 min od natychmiastowego wybrania fragmentu złoża. W części wybranej panuje ciśnienie atmosferyczne (0,1 MPa)

Zespół J. Topolnickiego z Instytut Mechaniki Górotworu PAN uzyskał podobne wyniki, prowadząc pomiary ciśnienia gazu przed czołem wyrobiska chodnikowego w pokładzie 357/1 KWK „Pniówek” [10]. Na rysunku 10 przedstawiono uzyskany w wyniku tych pomiarów wykres ciśnienia gazu w funkcji odległości od czoła [10, 12]. Na wykresie widoczny jest wzrost ciśnienia w odległości 2–4 m od krawędzi wyrobiska oraz następujący po nim szybki spadek.



Rys. 10. Ciśnienie porowe metanu (powyżej ciśnienia atmosferycznego) przed czołem chodnika na podstawie pomiarów bezpośrednich powadzonych przez zespół Topolinicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N.[za: 10, 12]

Na odcinku do 2 m w głąb pokładu ciśnienie jest praktycznie równe ciśnieniu atmosferycznemu, co pozwala wywnioskować o zasięgu strefy spekań w warstwie węgla. Wykresy na rysunku 7 wykazują, że strefa znacznych koncentracji naprężeń wynosi ok. 4 m od czoła wyrobiska. Zasięg tej strefy może być różny w zależności od warunków prowadzenia eksploatacji, w szczególności zaś oraz od wytrzymałości skał węglowych i wielkości naprężeń.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiona została koncepcja modelowania stanu górotworu w pobliżu przodka wyrobiska przy eksploatacji ścianowej węgla kamiennego. Zakres analizy obejmował zarówno stan naprężenia masywu, jak i ciśnienie i przepływ metanu w pokładzie. Zaproponowany model opierał się na koncepcji warstwowej budowy górotworu karbońskiego. Mimo pewnych zastrzeżeń, opracowany model wydaje się w sposób zadowalający opisywać podjęte w pracy zagadnienie. Potwierdzają to rezultaty obliczeń, które dają obraz niszczenia struktury górotworu zgodny z obserwacjami. W zakresie symulacji przepływu metanu uzyskano wyniki zbliżone z wynikami pomiarów prowadzonych w kopalni [10, 12].

Analiza otrzymanych wyników prowadzi do wniosku, że poprawę dokładności rozwiązania powinno przynieść zastosowanie prawa materiałowego zawierającego opis zniszczenia i zachowania pozniszczeniowego skał. Ujęcie w modelu istnienia w pokładzie strefy materiału zniszczonego pozwoliłoby uchwycić zjawisko redukcji naprężeń przy samym czole wyrobiska. W zakresie modelowania przepływu metanu pożądane wydaje się zastosowanie modelu, w którym istnieje możliwość przepływu płynu przez powstające wskutek niszczenia struktury materiału szczeliny. Interesujące wyniki w tym zakresie zawiera praca Kwaśniewskiego i Laska [5], którzy zastosowali do modelowania metodę elementów odrębnych. W pakiecie MES Abaqus możliwość modelowania przepływu przez rozwierające się szczeliny opiera się na zastosowaniu tzw. cohesive elements [2, 9]. Uzyskane na tym etapie prac wyniki pozwalają zakładać, że rozwój opisanej koncepcji modelowania może doprowadzić do uzyskania interesujących rezultatów.

LITERATURA

- [1] *Drzewiecki J.*: Wpływ postępu frontu ściany na dynamikę niszczenia górotworu karbońskiego. Katowice. Prace Naukowe GiG. Studia–Rozprawy–Monografie, nr 860, 2004
- [2] *Florkowska L.*: Obniżenia terenu wywołane eksploatacją podziemną w silnie naruszonym górotworze na przykładzie Rudy Śląskiej. Archives of Mining Sciences. Vol 55, 2010
- [3] *Knothe S.*: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, Tom 1, Zeszyt 1, 1953
- [4] *Krause E.*: Profilaktyka w pokładach metanowych zagrożonych sejsmicznie. Prace Naukowe GiG. Górnictwo i Środowisko. 3/2005, s. 65–79
- [5] *Kwaśniewski M., Lasek S.*: Analiza numeryczna migracji metanu z warstw spagowych do wyrobiska ścianowego. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 3.1 Zeszyt 3/1. 2007, s. 307–322
- [6] *Litwiniszyn J.*: Równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, Tom 1, Zeszyt 1, 1953

- [7] *Salustowicz A.*: Mechanika górotworu. Górnictwo tom III: Mechanika Górotworu, Część I, Wydawnictwo Górniczo–Hutnicze, Stalinogród, 1955
- [8] *Szefer G.*: Wpływ robót górniczych na stan naprężenia i odkształcenia górotworu w świetle teorii sprężystości. Zeszyty problemowe górnictwa, tom II, Zeszyt 1, 1964.
- [9] Theory Manual ABAQUS
- [10] *Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N.*: Wyrzutu skalno–gazowe w świetle badań laboratoryjnych i pomiarów kopalnianych. Archives of Mining Sciences. Vol. 49, 2004, s. 99–116
- [11] *Walaszczyk J., Drzewiecki J., Mutke G.*: Model zniszczenia skał stropowych górotworu będącego źródłem intensywnych zjawisk dynamicznych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria z Lampką Górnica, nr 10. Kraków, 2002
- [12] *Walaszczyk J., Florkowska L.*: Matematyczny model niszczenia struktury wewnętrznej górotworu uwarstwionego z uwzględnieniem ciśnienia porowego metanu. Archives of Mining Sciences. Seria: monografie. Numer 10. Kraków, 2010