

Marek Kwaśniewski, Stanisław Lasek***

ANALIZA NUMERYCZNA MIGRACJI METANU Z WARSTW SPĄGOWYCH DO WYROBISKA ŚCIANOWEGO

1. Wprowadzenie

W artykule tym przedstawione są wyniki numerycznego modelowania górotworu w sąsiedztwie pokładu 349 w partii B w KWK „Murcki” i komputerowej symulacji eksploatacji tego pokładu systemem ścianowym z zawalem warstw stropowych. Pracę tę wykonano w celu zweryfikowania hipotezy, że wzmożony dopływ metanu do zrobów i do wyrobiska ścianowego w polu wybierkowym 801 z pokładów węgla zalegających poniżej pokładu 349 może następować w wyniku silnego deformowania się i pęknięcia warstw spągowych poddanych wpływowi eksploatacji [3]. Hipotezę tę należało uznać za prawdopodobną, gdyż rzeczywiście pomiędzy pokładem 349 i zalegającym poniżej w odległości kilkunastu metrów pokładem 350 występuje pakiet warstw o niewielkiej grubości, zbudowanych ze skał o stosunkowo dużej odkształcalności i niewysokiej wytrzymałości.

Oczekiwano, że w przypadku jej potwierdzenia możliwe będzie:

- zbadanie procesu migracji metanu z pokładu 350 do wyrobisk ścianowych w pokładzie 349 przez szczeliny w odkształcających się i pękających pod wpływem eksploatacji pokładu 349 warstwach skalnych występujących pomiędzy pokładem 350 i pokładem 349 i, na tej podstawie,
- opracowanie prognozy ilości metanu dopływającego do wyrobiska ścianowego w różnych stadiach eksploatacji.

Rozpoznanie stopnia zagrożenia metanowego miało stanowić punkt wyjścia do przygotowania odpowiednich metod i środków tzw. profilaktyki metanowej podczas przygotowywanej eksploatacji pokładu 349 w polach wybierkowych 802 i 803.

* Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice

** Katowicki Holding Węglowy SA, KWK „Murcki”, Katowice

Na pracę tę składały się następujące zadania badawcze:

- 1) zbudowanie za pomocą kodu metody elementów odrębnych *UDEC*, numerycznego modelu górotworu w sąsiedztwie pola wybierkowego 800 (ściany 801–803) w pokładzie 349;
- 2) komputerowa symulacja eksploatacji pokładu 349 systemem ścianowym z zawałem warstw stropowych na odcinku długości kilkuset metrów i monitorowanie wypływu metanu z górotworu do wyrobiska ścianowego;
- 3) badanie towarzyszących eksploatacji zmian pola odkształceń, przemieszczeń i naprężeń w górotworze. Przedmiotem szczególnego zainteresowania były deformacje nieciągłe warstw spągowych, tzn. tych zalegających poniżej pokładu 349, oddzielających ten pokład od pokładu 350;
- 4) badanie właściwości procesu przepływu metanu (kierunek, ciśnienie, ilość, prędkość) przez szczeliny w pękających pod wpływem eksploatacji pokładu 349 warstwach spągowych;
- 5) opracowanie prognozy ilości metanu dopływającego do wyrobiska ścianowego w różnych stadiach eksploatacji.

Pracę wykonano przy użyciu komputerowego kodu metody elementów odrębnych *UDEC* v. 3.10, którego twórcami są dr P.A. Cundall i jego współpracownicy z Itasca Consulting Group Inc. [1]. Korzystano także z materiałów dostarczonych przez służby geologiczne i górnicze kopalni „Murcki”: map pokładowych, profili i przekrojów geologicznych sporządzonych na podstawie danych pochodzących z wielu różnych otworów wiertniczych i szybu, tzw. zdjęcia geologicznego uskoku „Mieszko”, dokumentacji techniczno-ruchowej obudowy ścianowej oraz wyników badań metanonośności pokładów węgla zalegających poniżej pokładu 349.

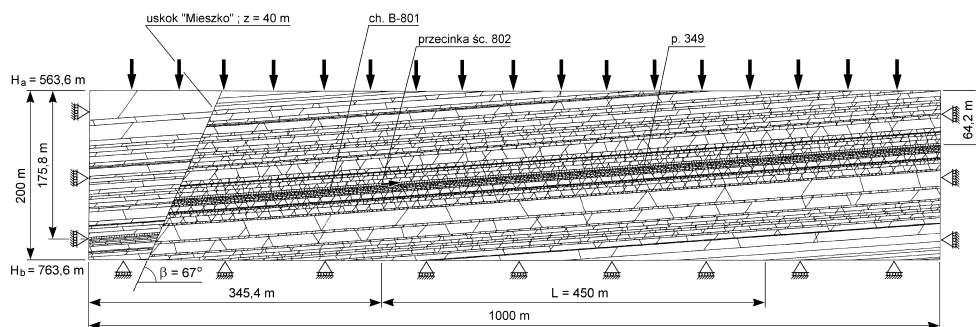
UDEC bazuje na schemacie obliczeniowym Lagrange’a, który jest szczególnie odpowiedni do modelowania dużych przemieszczeń i deformacji ośrodków o budowie blokowej. Kod ten jest niezwykle przydatny do symulowania i analizy wpływu płaszczyzn zmniejszonej spójności, spękań i szczelin na zachowanie się górotworu i stateczność wykonywanych w nim wyrobisk i budowli podziemnych i naziemnych. W Laboratorium Mechaniki Skał Katedry Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni Politechniki Śląskiej od kilkunastu lat wykorzystywany jest z powodzeniem do badania zachowania się górotworu poddanego wpływem eksploatacji pokładów węgla systemem ścianowym z zawałem warstw stropowych [2, 5].

Należy podkreślić, że opierając się na równaniach ruchu, *UDEC* jest wprost stworzony do symulowania zjawisk dynamicznych w górotworze i badania wpływu wstrząsów na wyrobiska oraz budowle podziemne i naziemne. Umożliwia również — i ta właśnie właściwość tego kodu została wykorzystana w tej pracy — symulowanie przepływu płynów przez szczeliny pomiędzy blokami skalnymi.

2. Numeryczne modelowanie górotworu

2.1. Strukturalny model górotworu

Przystępując do badań procesu migracji metanu w górotworze poddanym wpływowi eksploatacji górniczej zbudowano numeryczny strukturalny model wycinka górotworu w rejonie pola eksploatacyjnego 802 w pokładzie 349 w partii B w KWK „Murcki”. Model ten jest płaską prostokątną tarczą o długości (szerokości) 1000 m i wysokości 200 m. Górna krawędź tarczy założona została na głębokości 563,6 m tak, żeby pokład 349 wznoszący się pod kątem 4,09° od lewej (południowej) krawędzi tarczy ku krawędzi prawej (północnej) podzielił ją na dwie równe części: górną (tę powyżej pokładu 349) i dolną (poniżej pokładu 349). U lewej krawędzi model naruszony jest uskokiem normalnym „Mieszko”, który zapadając ku południowi pod kątem 67° zrzuca warstwy skalne o 40 m (rys. 1).



Rys. 1. Strukturalny model górotworu o budowie warstwowo-blokowej w sąsiedztwie pokładu 349 w polu wybierkowym ściany 802 w partii B w Kopalni „Murcki”

W zasadniczej (głównej) części modelu, tej położonej na prawo (na północ) od uskoku „Mieszko”, poniżej 2,5-metrowego pokładu 349, zamodelowano 31 warstw skalnych (w tym trzy pokłady węgla) o grubości od 0,9 m (pokład 353/2) do 18,3 m, powyżej — 27 warstw o grubości od 1,0 m (pokład 348) do 11,5 m zbudowanych z różnych odmian piaskowca i mułowca oraz łupków: piaszczystego, ilastego i węglowego.

Poszczególne warstwy, oddzielone od siebie równoległymi stykami (system I), były podzielone na bloki systemem styków zorientowanych względem styków systemu I pod kątem $\alpha_1 \approx 60^\circ$ (system II) i pod kątem $\alpha_2 \approx 120^\circ$ (system III)¹. Tylko przeznaczony do eksploatacji pokład 349 został podzielony na prostokątne bloki systemem styków zorientowanych do płaszczyzny spągu/stropu pokładu pod kątem α równym 90° (system IV). Były to wszystkie systemy tzw. styków fikcyjnych, to znaczy takich, których własności mechaniczne są takie same jak własności materiału skalnego budującego bloki. Styki te mogą

¹ Dokonując za pomocą komputera automatycznej generacji styków między blokami wprowadzano doń tylko średnie wartości kątów α oraz maksymalne wartości odchyłek od wartości średnich.

uaktywnić się, jeśli tylko w trakcie obliczeń w miejscach ich występowania dojdzie do przekroczenia wytrzymałości granicznej na rozciąganie lub na ścinanie. Decydując się podzielić górotwór na bloki trzema systemami styków (pęknięć) fikcyjnych, oczekiwano, że dzięki takiemu zabiegowi będzie można lepiej zbadać pękanie materiału skalnego i powstawanie tensyjnych i/lub ścięciowych nieciągłości w górotworze o cechach, pierwotnie, ośrodka ciągłego. Te systemy styków podzieliły model górotworu na 8916 bloków (fikcyjnych) o średniej wielkości równej 22,4 m², kontaktujących się ze sobą na 52 827 stykach. Liczba stref (elementów różnic skończonych o kształcie trójkątnym), na które zostały podzielone bloki i liczba węzłów siatki, były równe odpowiednio 22 167 i 39 204 (tab. 1).

TABELA 1
Podstawowe parametry strukturalne modelu górotworu

Rozmiary modelu, $L, m \times H, m$	1000,0 × 200,0
Liczba warstw skalnych (łącznie z pokładami węgla)	61
Liczba bloków (fikcyjnych)	8916
Wielkość bloków, m ² : min. / max. / śr.	0,14 / 3613,0 / 22,4
Liczba styków (fikcyjnych)	52 827
Liczba elementów różnic skończonych (stref)	22 167
Liczba węzłów (stopni swobody)	39 204

2.2. Modele konstytutywne i stałe materiałowe

Blokom skalnym przyporządkowany został model ośrodka sprężysto-plastycznego z osłabieniem (sprężysto-krucho-plastycznego) o wytrzymałości granicznej i wytrzymałości resztkowej opisanej zmodyfikowanym warunkiem stanu granicznego Coulomba–Mohra. Modelowi temu właściwe są następujące stałe materiałowe: współczynnik sprężystości objętościowej (K), współczynnik sprężystości postaciowej (G), kąt tarcia wewnętrznego (φ), resztkowy kąt tarcia wewnętrznego (φ_r), spójność (c), spójność resztkowa (c_r), granica wytrzymałości na rozciąganie (σ_T), kąt dylatacji (ψ) i resztkowy kąt dylatacji (ψ_r). Wartości tych stałych dla różnych skał budujących górotwór w sąsiedztwie pokładu 349 w polu ścianowym 802 w KWK „Murcki” zestawione są w tabeli 2. Wartości pozostałych obliczano posługując się następującymi zależnościami: $c_{Mr} = 0,1c$, $\varphi_r = \frac{2}{3}\varphi$, $\psi = 0,5\varphi$ i $\psi_r = \frac{2}{3}\psi$.

Przyjęty model pozwala opisać dowolne nieliniowe zachowanie się materiału skalnego w stadium po przekroczeniu granicy wytrzymałości (punktu plastyczności). W odróżnieniu od modelu plastyczności Coulomba, w którym spójność, tarcie i dylatacja pozostają stałe, w modelu krucho-plastycznym wielkości te są pewnymi funkcjami plastycznego odkształcenia postaciowego (e^{ps}). Osłabienie materiału skalnego po przekroczeniu granicy wytrzymałości na ścinanie opisano odpowiednimi tablicami: $c = f(e^{ps})$, $\varphi = f(e^{ps})$ i $\psi = f(e^{ps})$.

TABELA 2

Zestawienie materiałów skalnych wyróżnionych w górotworze w sąsiedztwie pokładu 349 w KWK „Murcki” i wartości ich parametrów mechanicznych

Rodzaj skały	ρ kg m ⁻³	K_M MPa	G_M MPa	c_M MPa	φ deg	σ_{TM} MPa
Piaskowiec gruboziarnisty	2475	5000	3750	5,4	39	0,85
Piaskowiec średnioziarnisty	2500	5323	4160	6,0	40	0,97
Piaskowiec drobnoziarnisty	2525	5667	4610	6,5	41	1,07
Mułowiec piaszczysty	2550	4885	3512	5,0	38	0,78
Mułowiec	2575	4762	3279	4,8	36	0,79
Łupek piaszczysty	2600	4286	2951	4,3	34	0,71
Łupek ilasty (iłowiec) zapiaszczony	2650	4038	2540	3,3	33	0,60
Łupek ilasty (iłowiec) twardy	2675	3600	2160	2,7	32	0,52
Łupek ilasty (iłowiec)	2675	3400	2040	2,4	31	0,44
Łupek ilasty (iłowiec) miękki	2675	3200	1920	2,2	30	0,38
Łupek węglowy	2200	1705	879	1,4	26	0,32
Węgiel	1500	1600	533	1,8	30	0,33

gdzie:

- ρ — gęstość objętościowa,
- K_M — współczynnik sprężystości objętościowej (w masywie),
- G_M — współczynnik sprężystości postaciowej (w masywie),
- c_M — spójność (w masywie),
- φ — kąt tarcia wewnętrznego,
- σ_{TM} — wytrzymałość graniczna na rozciąganie (w masywie).

Stykom pomiędzy blokami przypisano model mechaniczny mający zdolność do normalnych i stycznych odkształceń sprężystych oraz do plastycznego, dylatacyjnego poślizgu z osłabieniem i do pęknięcia rozdzielczego. Równania opisujące zachowanie się tego modelu omówione są szczegółowo w pracy pierwszego z autorów [2]. Wprowadzone do numerycznego modelu górotworu wartości parametrów mechanicznych występujących w tych równaniach — współczynnika sztywności normalnej (k_n), współczynnika sztywności stycznej (k_s), kąta tarcia (φ_j), spójności (c_j), wytrzymałości granicznej na rozciąganie (σ_{Tj}) i kąta dylatacji (ψ_j) — były oczywiście różne dla różnych rodzajów skał. W tabeli 3 podane są tylko najmniejsze i największe wartości tych stałych. Przypomnijmy, że warstwy skalne podzielono na bloki tzw. stykami fikcyjnymi (zob. część 2.1 artykułu), a więc przyjęto dla nich, że $c_j = c_M$, $\varphi_j = \varphi$ i $\sigma_{Tj} = \sigma_{TM}$.

W tabeli 3 podane są także wartości stałych materiałowych przyporządkowane w numerycznym modelu górotworu uskokowi „Mieszko”.

TABELA 3

Wartości parametrów mechanicznych styków pomiędzy (fikcyjnymi) blokami skalnymi oraz uskoku „Mieszko”

k_n MPa m ⁻¹	k_s MPa m ⁻¹	c_j MPa	φ_j deg	σ_{Tj} MPa	ψ_j deg
Styki pomiędzy blokami skalnymi					
2880±10 880	1066±4610	1,8±6,5	30±41	0,33±1,07	20±27
Uskok „Mieszko”					
1000	400	0,3	30	0,01	20

gdzie:

- k_n — współczynnik sztywności normalnej,
- k_s — współczynnik sztywności stycznej,
- c_j — spójność,
- φ_j — współczynnik tarcia,
- σ_{Tj} — wytrzymałość graniczna na rozciąganie,
- ψ_j — kąt dylatacji.

2.3. Fizyczny model przepływu metanu przez szczeliny w górotworze

Za pomocą kodu *UDEC* można symulować przepływ płynu przez szczeliny pomiędzy (nieprzepuszczalnymi) blokami skalnymi. Dokonywana jest w tym celu w pełni sprzężona analiza mechaniczno-hydrauliczna, w której przewodność hydrauliczna szczeliny uzależniona jest od odkształcenia mechanicznego i, odwrotnie, ciśnienie płynu w szczelinie wpływa na odkształcenie.

W kodzie wykorzystywane jest znane z mechaniki płynów równanie

$$v = k_f J \quad (1)$$

opisujące średnią prędkość (v) laminarnego przepływu lepkiego płynu pomiędzy równoległymi płytami. W równaniu tym J oznacza gradient hydrauliczny, a k_f jest współczynnikiem przewodności hydraulicznej szczeliny określonym formułą

$$k_f = \frac{a^2 g}{12\mu_k} \quad (2)$$

gdzie:

- a — oznacza rozwarcie szczeliny,
- g — przyspieszenie ziemskie,
- μ_k — współczynnik lepkości kinematycznej płynu.

Natężenie przepływu na jednostkę rozwarcia szczeliny można wyrazić za pomocą wyrażenia

$$q = va = \frac{a^3 g}{12\mu_k} J \quad (3)$$

W hydraulice wyrażenie to nazywane jest potocznie prawem potęgowym trzeciego stopnia. Prawo to można zapisać także, w inny sposób, równaniem

$$q = -\frac{a^3}{12\mu_d} \frac{\Delta p}{l} \quad (4)$$

Poza rozwarciem (a), w równaniu tym występuje gradient (spadek) ciśnienia (Δp), długość odcinka przepływu (l) oraz współczynnik lepkości dynamicznej płynu (μ_d), przy czym $\mu_d = \rho_f \mu_k$, gdzie ρ_f jest gęstością płynu.

TABELA 4

Wartości parametrów występujących w modelu opisującym ustalony przepływ metanu przez szczeliny w górotworze

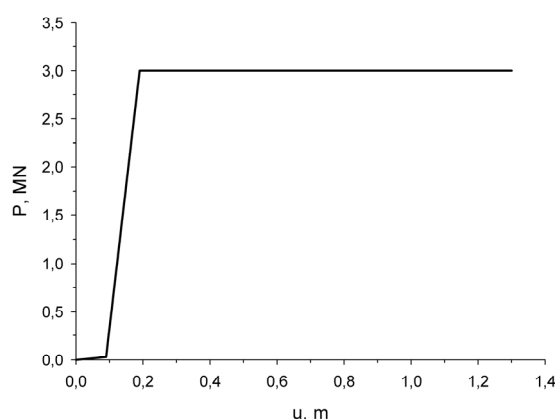
ρ_f kg m ⁻³	K_f MPa	μ_d MPa s	k_j MPa ⁻¹ s ⁻¹	a_o mm	a_r mm
0,7	100	10 ⁻¹¹	8,0·10 ⁹	1,0	0,5

W pracy tej symulowany był tzw. ustalony przepływ gazu przez szczeliny w górotworze. W równaniach opisujących ten rodzaj przepływu występują następujące wielkości: gęstość metanu (ρ_f), współczynnik ściśliwości metanu (K_f), współczynnik przepuszczalności szczeliny (związany z dynamicznym współczynnikiem lepkości zależnością $k_j = 1/(12\mu_d)$), rozwarcie początkowe szczeliny (a_o), tzn. rozwarcie przy naprężeniu normalnym równym zero i tzw. rozwarcie rezydualne szczeliny (a_r), czyli najmniejsze, tzw. hydrauliczne rozwarcie szczeliny². Wprowadzone do numerycznego modelu górotworu wartości tych wielkości zestawione są w tabeli 4.

² Jeżeli nawet w wyniku działania dużych obciążeń ściskających dochodzi do zaciśnięcia szczeliny, to mechaniczne zamknięcie nie ma wpływu na jej przepuszczalność.

2.4. Model obudowy ścianowej

Obudowa wyrobiska ścianowego o wysokości 2,5 m w pokładzie 349 została zamodelowana za pomocą 7-członowego płaskiego elementu strukturalnego o charakterystyce $P = f(u)$ przedstawionej na rysunku 2. Maksymalna podporność modelu obudowy ($P_{\max} = 3,0$ MN) jest równa nominalnej podporności stosowanej w rzeczywistości w ścianie 801 dwustożkowej zmechanizowanej obudowy podporowo-osłonowej FAZOS-12/28-POz-B/BSN. Obudowa odsunięta jest od czoła ściany na odległość 0,45 m i podpira strop na odcinku długości 3,9 m.



Rys. 2. Charakterystyka modelu obudowy ścianowej

2.5. Warunki brzegowe i początkowe

W przygotowywanym do obliczeń modelu numerycznym górotworu zadane zostały mieszane (przemieszczeniowo-naprężeniowe) warunki brzegowe. Przyjęto, że punkty węzłowe na pionowych, bocznych krawędziach modelu mają swobodę przemieszczania się w kierunku pionowym, a w kierunku poziomym przemieszczenia ich są równe zero. Węzły znajdujące się na dolnej krawędzi modelu mają możliwość przemieszczania się w kierunku poziomym, a w kierunku pionowym ich przemieszczenia są równe zero. Do górnej krawędzi modelu przyłożono naprężenie pionowe równe 13,818 MPa i poziome równe 4,606 MPa.

Inicjalizując pierwotny stan naprężenia w modelu przyjęto, że naprężenie pionowe w górotworze pochodzi od sił masowych i zdeterminowane jest gęstością objętościową skał i węgla, natomiast naprężenie poziome, zgodnie z klasycznym rozwiązaniem wywodzącym się z teorii sprężystości, jest ułamkiem właściwym naprężenia pionowego zależnym od wartości współczynnika Poissona. I tak obliczono i zadano jako warunek początkowy, że w górnej części modelu (tej powyżej pokładu 349) składowa pionowa pierwotnego stanu naprężenia (σ_{z0}) wynosi 15,362 MPa, a składowe poziome ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0}$) równe są 5,121 MPa. Dla pokładu wprowadzono wartości naprężeń σ_{x0} i σ_{y0} równe, odpowiednio, 15,399 MPa

i 8,292 MPa. W dolnej części modelu zadano naprężenie początkowe $\sigma_{x0} = 18,777$ MPa i $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 5,609$ MPa.

Korzystając z informacji zdobytych na podstawie analizy hydrogeologicznych profili otworów wiertniczych G-15/2006, G-17/2006 i G-14/2006, dla pokładu 350 i dla pakietu warstw zalegających poniżej tego pokładu, wprowadzono do modelu jako dodatkowy warunek początkowy ciśnienie złożowe metanu równe 2,0 MPa. Szacując tę wartość ciśnienia metanu, skorzystano m.in. z wyników badań metanonośności prób węgla pobranych z rdzenia wiertniczego z otworu G-14/2006 oraz z danych zaczerpniętych z prac na temat zależności pomiędzy ciśnieniem złożowym metanu a metanonośnością oraz zależności pomiędzy ciśnieniem złożowym metanu a głębokością (zob. m.in. [4]).

Uruchomiono następnie obliczenia, doprowadzając model do stanu równowagi początkowej (wymagało to wykonania 1500 kroków obliczeniowych) i ustalenia się pierwotnego stanu naprężenia w całym modelu w stanie sprężystym. Następnie uzupełniono model konstytutywny materiału skalnego warunkiem stanu granicznego (i wartościami odpowiednich stałych materiałowych) oraz tablicami opisującymi zachowanie się skał w stanie pokrytycznym i powtórzono obliczenia naprężeń pierwotnych w górotworze, tych odpowiadających stanowi równowagi jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji pokładu 349; wartości największego i najmniejszego naprężenia głównego w rejonie przyszłej przecinki ściany 802 w pokładzie 349 wyniosły, odpowiednio, 16,60 MPa i 4,56 MPa. Dopiero wtedy rozpoczęto symulację eksploatacji i właściwą analizę zachowania się badanego modelu górotworu.

3. Komputerowa symulacja eksploatacji pokładu 349

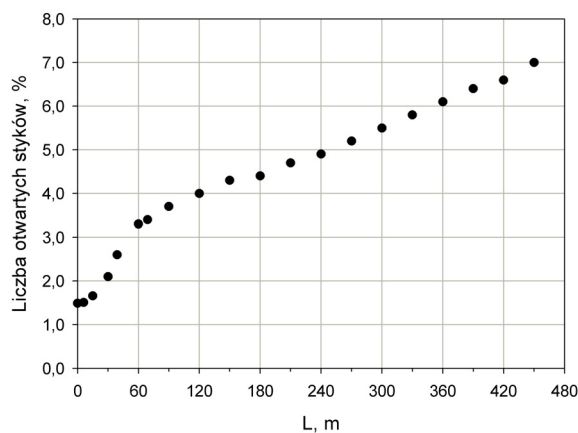
Przystępując do badania procesu migracji metanu w górotworze deformującym się pod wpływem eksploatacji ścianowej pokładu 349 w polu wybierkowym 802, w pierwszej kolejności zasymulowano wykonanie chodnika B-801 (tzw. zerowe stadium eksploatacji) i, następnie, wykonanie przecinki ściany 802 (stadium pierwsze) (rys. 1). W każdym ze stu czterdziestu ośmiu kolejnych stadiów symulacji eksploatacji, prowadzonej na odcinku długości 450 m w kierunku prawej (północnej) krawędzi modelu, usuwano z pokładu jeden blok o długości 3,0 m, zastępowano na tym odcinku przyporządkowany węglowi model konstytutywny tzw. modelem zerowym i przesuwno odpowiednio obudowę wyrobiska ścianowego. Dla każdego takiego stadium eksploatacji wykonywano 1500 kroków obliczeniowych. Obliczenia prowadzono za pomocą notebooka Acer TravelMate 634LC z procesorem Pentium 4 1,8 GHz, wyposażonego w 512 MB pamięci swobodnego dostępu (RAM) i za pomocą mikrokomputera biurkowego z procesorem AMD Athlon 64 3400+ (2,45 GHz), 1 GB RAM. W tym drugim przypadku wykonanie 1500 kroków obliczeniowych zajmowało 19 minut.

Analizując wyniki obliczeń, badano pole deformacji ciągłych i nieciągłych w górotworze w sąsiedztwie pola wybierkowego, ze szczególnym uwzględnieniem formowania się strefy zawału powyżej eksploatowanej części pokładu 349 oraz pęknięcia, rozwarstwiania się

i wypiętrzania warstw spągowych. Analizowano przemieszczenia styczne na stykach między blokami i śledzono rozwieranie się ścianek nieciągłości. Badano towarzyszące eksploatacji zmiany stanu naprężenia i odkształcenia samych bloków skalnych i określano wielkość, położenie i zasięg stref, w których przekroczona została wytrzymałość graniczna na ścinanie lub na rozciąganie i materiał skalny przeszedł w stan pokrytyczny. Badając migrację metanu w górotworze, analizowano kierunek i prędkość płynięcia gazu przez szczeliny pomiędzy blokami skalnymi oraz ciśnienie gazu i natężenie przepływu (ilość gazu płynącego przez szczeliny).

4. Omówienie wyników

Wykonanie chodnika B-801 i przecinki ściany 802 spowodowało pęknięcie blisko ośmiuset styków pomiędzy wcześniej tzw. fikcyjnymi blokami skalnymi; liczba ta stanowi ok. 1,5% całkowitej, równej 52 814, liczby styków. Liczba styków pękniętych, tzn. nie przenoszących sił normalnych i/lub stycznych, rośnie w miarę postępującej eksploatacji pokładu (rys. 3). Tempo tego wzrostu jest szczególnie wysokie podczas tzw. rozruchu ściany, tzn. do czasu, gdy front eksploatacji dociera do położenia $L = 60$ m. Dalszej eksploatacji pokładu towarzyszy niemal liniowy wzrost liczby pękniętych styków, jednak tempo tego wzrostu jest znacznie, ok. 3-krotnie mniejsze niż w pierwszych stadiach eksploatacji.



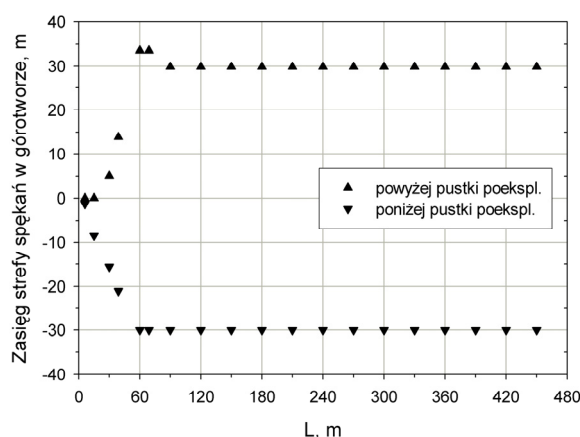
Rys. 3. Udział otwartych styków pomiędzy blokami skalnymi w ogólnej liczbie styków w zależności od długości wyeksploatowanego odcinka pokładu (położenia frontu eksploatacji)

W tym samym okresie rozruchu ściany gwałtownie powiększa się zasięg strefy spękań w górotworze w bezpośrednim sąsiedztwie pustki poeksploatacyjnej. Należy zwrócić przy tym uwagę, że strefa ta początkowo powstaje w stosunkowo cienkich, zbudowanych ze skał o niewysokiej wytrzymałości, warstwach spągowych. Przykładowo, po 9. stadium eksploatacji

tacji, tzn. po wyeksploatowaniu pokładu na odcinku długości 30 m, zasięg występowania magistralnych³ szczelin w górotworze obejmuje tylko jedną warstwę stropową o grubości 5,05 m i aż siedem warstw spągowych o łącznej miąższości równej 15,6 m.

Pierwszy zawał stropu pojawił się po wyeksploatowaniu pokładu na odcinku długości 39 m. W tym 12. stadium eksploatacji na spodku wyrobiska ścianowego, za obudową, oparły się dwa duże bloki skalne, które powstały w wyniku popękania zalegającej nad pokładem ponad 5-metrowej warstwy łupku ilastego. Zasięg strefy spękań obejmuje wtedy już cztery warstwy stropowe i sięga na wysokość 13,9 m powyżej wyeksploatowanej części pokładu. Strefa spękań w warstwach spągowych jest jednak nadal większa; obejmując dziewięć warstw sięga już na odległość ponad 21 m poniżej pokładu.

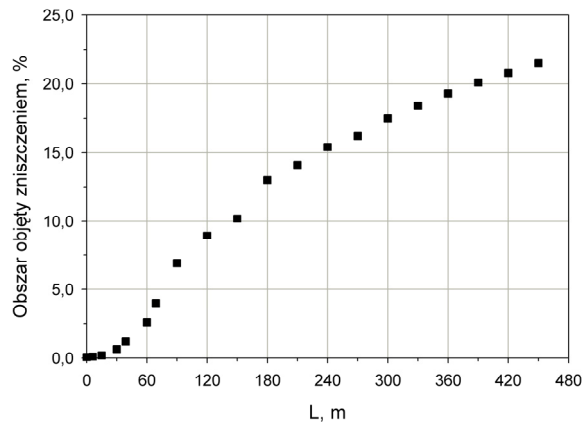
Gdy front eksploatacji dociera do położenia $L = 60$ m, zasięg strefy magistralnych szczelin w górotworze sięga ostatecznie ok. 30 m zarówno powyżej, jak i poniżej wyeksploatowanej części pokładu i nie ulega już zmianie pomimo kontynuowania eksploatacji (rys. 4).



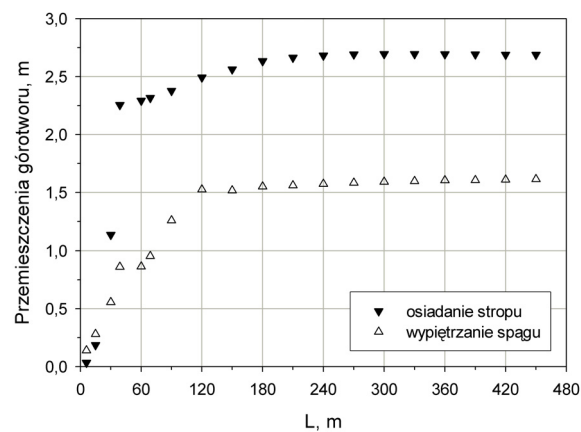
Rys. 4. Zasięg strefy spękań w górotworze powyżej wyeksploatowanej części pokładu w zależności od długości wyeksploatowanego odcinka pokładu (położenia frontu eksploatacji)

W okresie rozruchu eksploatacji wielkość obszaru, w którym dochodzi do przekroczenia wytrzymałości granicznej skał na ścinanie lub na rozciąganie rośnie bardzo szybko, chociaż dla $L = 60$ m obszar ten stanowi zaledwie 2,6% równej 200 000 m² powierzchni całego modelowanego wycinka górotworu. W miarę postępującej eksploatacji ten obszar powiększa się jednak znacznie (rys. 5) i po wyeksploatowaniu pokładu na odcinku długości 450 m zajmuje już blisko 22% powierzchni modelu. Szczególnie duży jest w warstwach zalegających powyżej pokładu 349, gdzie w wielu miejscach sięga górnej krawędzi modelu i ponadto wychodzi poza obszar wyznaczony tzw. krawędziami eksploatacji.

³ Szczelinami magistralnymi nazywane są tutaj szczeliny główne łączące się ze sobą.



Rys. 5. Wielkość obszaru górotworu objętego zniszczeniem, tzn. obszaru, w którym doszło do przekroczenia granicy wytrzymałości skał na ścinanie lub na rozciąganie, w zależności od długości wyeksploatowanego odcinka pokładu (położenia frontu eksploatacji)



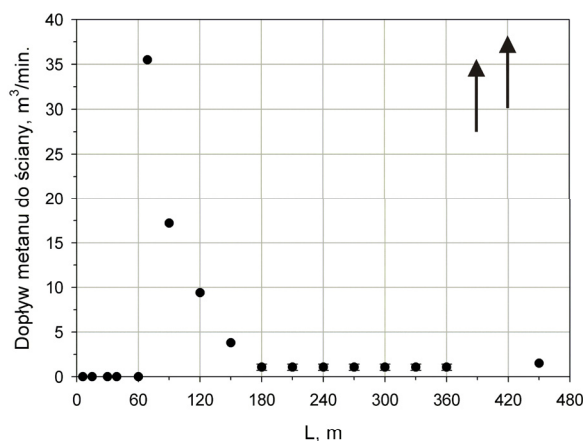
Rys. 6. Maksymalne przemieszczenia górotworu w sąsiedztwie pustki poeksploatacyjnej w zależności od długości wyeksploatowanego odcinka pokładu (położenia frontu eksploatacji)

Ta partia górotworu doznaje też największych przemieszczeń w kierunku pustki poeksploatacyjnej. Dla $L = 450$ m, wartości wektorów przemieszczenia sięgają blisko 2,7 m. Jak pokazano na rysunku 6, osiadanie warstw stropowych (a raczej opadanie bloków skalnych) nad pustką poeksploatacyjną jest większe od wypiętrzenia warstw spagowych. Ale i ono jest niebagatelne; już po 39. stadium eksploatacji ($L = 120$ m) sięga w strefie zrobów wartości przekraczających 1,5 m.

Przemieszczenia górotworu w zabezpieczonym obudową wyrobisku ścianowym są znacznie mniejsze. Po okresie rozruchu ściany konwergencja tej części wyrobiska ścianowego (o szerokości, przypomnijmy, 3,9 m) wynosi mniej więcej 10÷20 cm u czoła ściany i 20÷40 cm od strony zrobów.

Jak wspomniano już w części 2.1 artykułu, badany model górotworu jest modelem dwuwymiarowym — płaską tarczą o jednostkowej grubości znajdującą się w płaskim stanie odkształcenia. W wyniku obliczeń ilości metanu dopływającego do wyrobiska ścianowego poprzez szczeliny w górotworze uzyskiwano wartości q odpowiadające właśnie jednostkowej grubości modelu. Żeby na tej podstawie ocenić ilość metanu dopływającego w rzeczywistości do całej ściany (Q), mnożono q przez długość ściany ($Q = q \cdot l$, gdzie $l = 240$ m).

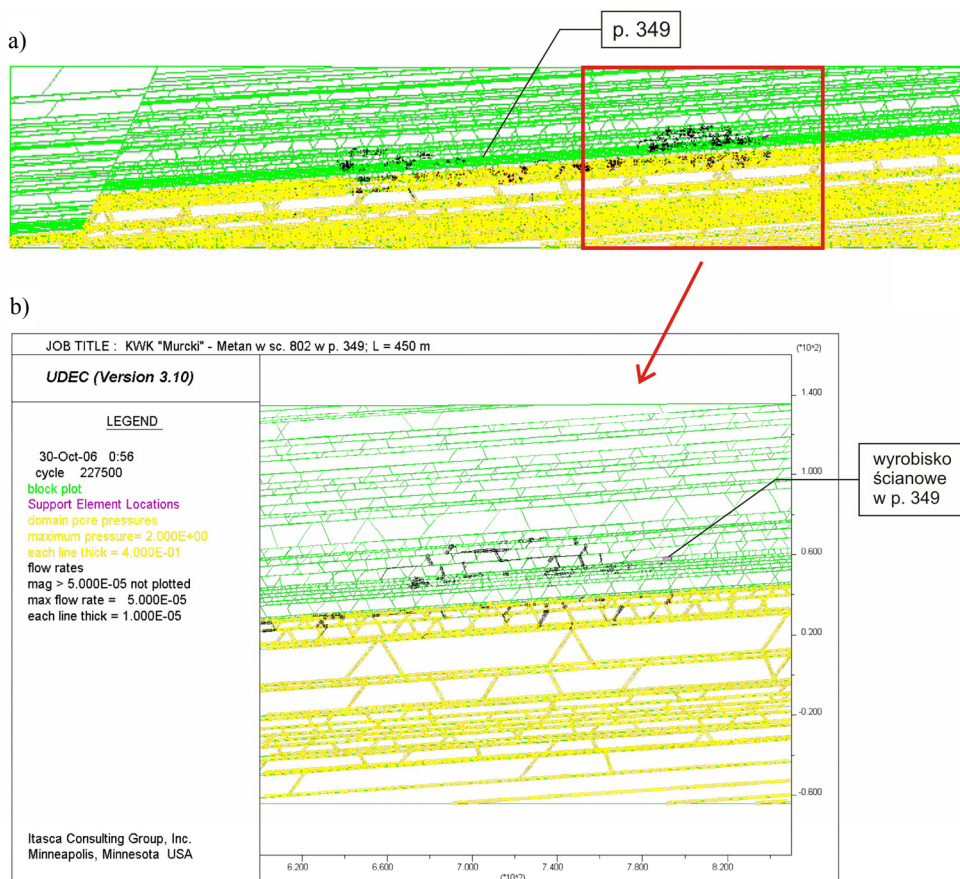
Metan migrujący z odkształcających się i pękających warstw spągowych pojawił się w ścianie w ilości ok. $35 \text{ m}^3/\text{min}$. dopiero po okresie rozruchu ściany (22. stadium eksploatacji, $L = 69$ m) i wytworzeniu się strefy szczelin magistralnych obejmującej jedenaście warstw spągowych i sięgającej aż do stropu grubej (18,3 m) warstwy średnioziarnistego piaskowca zalegającej kilkanaście metrów poniżej pokładu 350. Podczas dalszej eksploatacji pokładu 349, gdy proces rozwoju deformacji nieciągłych w górotworze znacznie stracił na intensywności (rys. 3, 4 i 6), ilość metanu dopływającego do ściany 802 zaczęła zmniejszać się i w stadiach nr 59–119 ($L = 180 - 360$ m) była już niewielka, równa od 0,7 do $1,4 \text{ m}^3/\text{min}$.



Rys. 7. Wielkość dopływu metanu do ściany w zależności od długości wyeksploatowanego odcinka pokładu. Strzałki oznaczają bardzo duże, przekraczające $100 \text{ m}^3/\text{min}$ ilości metanu

Należy podkreślić, że ilość metanu przedostającego się do wyrobiska ścianowego i do zrobów zdeterminowana jest drożnością systemu szczelin, o której decyduje wielkość rozwarcia oraz stopień połączenia rozwartych nieciągłości. W sytuacji gdy pęknięcia w sąsiadujących ze sobą warstwach rozłożone są przypadkowo i nie łączą się ze sobą można oczekiwać, że przepływ gazu będzie niewielki. Oczywiście, powiększanie się liczby spękań w górotworze zwiększa możliwość powstania szczeliny magistralnej, która przecinając wiele warstw połączy warstwy metanonośne z pustą przestrzenią powstałą po wyeksploatowaniu pokładu zalegającego powyżej. Tak stało się w 129. i 139. stadium eksploatacji, gdy ilość metanu dopływającego do wyrobiska ścianowego nagle gwałtownie wzrosła do, odpowied-

nio, 112 i 142 m³/min. (rys. 7), by dla położenia frontu eksploatacji $L = 450$ m powrócić do niewielkiej ilości 1,5 m³/min.



Rys. 8. Dopływ metanu (kolor czarny) do zrobów i do wyrobiska ścianowego z metanonośnych warstw spągowych (kolor żółty) po wyeksploatowaniu pokładu na odcinku długości 450 m (149. stadium eksploatacji); a — obraz globalny; b — obraz lokalny

Warto zwrócić uwagę (rys. 8), że metan przedostawszy się do strefy zrobów w eksploatowanym pokładzie i/lub do wyrobiska ścianowego migruje przez szczeliny w spękanych warstwach stropowych dalej w górę. Przykładowo, w 132. stadium symulowanej eksploatacji — gdy front eksploatacji dociera na odległość $L = 399$ m — metan dociera do spągu pokładu 348 zalegającego 12,9 m powyżej pokładu 349.

Analizując wyniki obliczeń, stwierdzono dodatkowo, że wpływy eksploatacji pokładu 349 w polu wybierkowym 802 nie sięgają uskoku „Mieszko”. Zaobserwowano przy tym, że szczelina uskokowa tej potężnej nieciągłości jest doskonałym duktem, którym z warstw metanonośnych migrują w górę duże ilości tego gazu.

5. Podsumowanie i uwagi końcowe

Posługując się komputerowym kodem metody elementów odrębnych *UDEC* zbudowano płaski (dwuwymiarowy) numeryczny model dużego ($1000\text{ m} \times 200\text{ m}$) wycinka górotworu w sąsiedztwie pokładu 349 w polu ścianowym 802 w partii B w KWK „Murcki”. Eksploatację tego pokładu systemem ścianowym z zawalem warstw stropowych symulowano w modelu na odcinku długości 450 m. Badano i analizowano towarzyszące eksploatacji pola naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w górotworze. Śledzono pękanie masywu skalnego i monitorowano rozwój stref, w których dochodziło do rozwierania się styków pomiędzy blokami skalnymi i powstawania tzw. szczelin magistralnych.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w warunkach silnie deformujących się, rozwarstwiających, pękających i dzielących na bloki warstw spągowych możliwa jest migracja metanu z pokładów węgla zalegających poniżej eksploatowanego pokładu. Pokazano, że strefa szczelin w cienkich i zbudowanych ze skał o niewysokiej wytrzymałości warstwach zalegających poniżej pokładu 349 powstaje szybciej niż strefa zawalu stropu i sięga na głębokość ok. 30 m poniżej pokładu. Warstwy spągowe ulegają przy tym silnemu wypiętrzaniu w strefie zrobów; już we wczesnych stadiach eksploatacji przemieszczenie to sięga wartości przekraczających 1,5 m.

Przy założeniu, że (1) warstwy metanonośne zalegają 15,6 m poniżej pokładu 349 i obejmują pokład 350 oraz pokłady węgla i warstwy skalne niżej leżące i (2) ciśnienie złożowe metanu wynosi 2 MPa, zbadano właściwości procesu przepływu metanu (kierunek, ciśnienie, ilość, prędkość) przez szczeliny powstające w pękających pod wpływem eksploatacji pokładu 349 warstwach spągowych. Na tej podstawie podano prognozę ilości metanu dopływającego do wyrobiska ścianowego w różnych stadiach eksploatacji. Pokazano, że metan pojawia się w wyrobisku ścianowym od razu w dużych ilościach po okresie rozruchu ściany, tzn. po wyeksploatowaniu pokładu na odcinku długości $60\div 70\text{ m}$. Następnym etapom eksploatacji towarzyszy mniej intensywny dopływ metanu do ściany i do zrobów. Jednak w przypadku łączenia się pojedynczych pęknięć w tzw. szczeliny magistralne, tzn. przecinające cały pakiet warstw zalegających pomiędzy pokładem 349 i pokładem 350, i łączących warstwy metanonośne bezpośrednio z wyrobiskiem ścianowym i/lub ze strefą zrobów, możliwe są — nagle i trudne do przewidzenia — duże wypływy metanu z warstw spągowych.

Właściwości zjawiska migracji metanu poprzez szczeliny w warstwach spągowych są bezpośrednio związane z cechami dobrze rozpoznanego procesu deformowania się i pęknięcia tych warstw. Prognoza jakościowa tego zjawiska nie budzi więc żadnych zastrzeżeń. Prognoza ilościowa byłaby jednak bez wątpienia znacznie bardziej rzetelna i wiarygodna, gdyby metanonośność pokładów węgla zalegających poniżej pokładu 349 rozpoznano w całym obszarze pola wybierkowego 800, a nie tylko punktowo, tzn. na podstawie badań próbek pobranych z zaledwie jednego otworu. Należy przy tym podkreślić, że szczególnie ważna dla powodzenia komputerowej symulacji przepływu metanu przez szczeliny w górotworze jest dobra (dokładna) znajomość warunków początkowych, czyli — w tym przypad-

ku — ciśnienia, pod jakim występuje gaz w nienaruszonych eksploatacją warstwach metanośnych. Niestety, wobec braku odpowiednich danych na ten temat dla pokładów węgla w KWK „Murcki” korzystano z informacji zaczerpniętych z literatury (podanych tam dla innych złóż i innych węgli) i — siłą rzeczy — bez większej pewności oszacowano tylko wartość ciśnienia złożowego metanu w pokładzie 350 i pokładach zalegających jeszcze niżej.

LITERATURA

- [1] Itasca Consulting Group, Inc. 2000: UDEC v. 3.1 User's Manual (8 vols), Minneapolis
- [2] *Kwaśniewski M.*: Analiza numeryczna zachowania się górotworu w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego w pokładzie eksploatowanym z zawałem warstw stropowych. W monografii pt. „Problematyka bezpiecznego użytkowania sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej” (M. Jaszczuk, red.), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2004, 38–68
- [3] *Lasek S.*: Wzrost zagrożenia metanowego podczas eksploatacji ściany 801 w pokładzie 349 w partii B w kopalni „Murcki”. *Wiadomości Górnicze*, 7–8, 2006, 389–393
- [4] *Pope J., Buttry D., Lamarre R., Noecker B., MacDonald S., LaReau B., Malone P., Van Lieu N., Petroski D., Accurso M., Harak D., Kutz R., Luker S., Martin R.*: Downhole geochemical analysis of gas content and critical desorption pressure for carbonaceous reservoirs. 2006 CSPG-CSEG-CWLS Joint Convention, Calgary, Alberta May 15–18 2006
- [5] *Smolnik G.*: Analiza numeryczna metodą elementów odrębnych deformacji powierzchni terenu wywołanych eksploatacją ścianową. *Materiały XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu „Geotechnika i budownictwo specjalne 2004”, t. II.* Kraków, Wydawnictwo Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH 2004, 1023–1033