

*Jacek Sobczyk**

BADANIE PRZEBIEGU NIEKTÓRYCH ZJAWISK PROWADZĄCYCH DO WYRZUTU W WARUNKACH LABORATORYJNYCH Z UŻYCIEM WĘGLA GÓRNOŚLĄSKIEGO**

1. Wstęp

Badania laboratoryjne nad przebiegiem zjawisk prowadzących do wyrzutu węgla i gazu opisane w niniejszej pracy miały na celu określenie podstawowych warunków jakie powinien spełniać układ węgiel – gaz, aby doszło do zapoczątkowania procesu wyrzutu. Wykonano je na preparowanym materiale węglowym pochodzącym z jednej z górnośląskich kopalń zagrożonych wyrzutami.

Zaprezentowane tu rozważania wynikają z doświadczeń uzyskanych na wcześniej rozpoznanych węglach dolnośląskich.

Wyrzut węgla i gazu jest splotem wielu procesów. Do najważniejszych należą proces niszczenia calizny węglowej i transportu produktów wyrzutu. Calizną nazywamy tą część brykietu węglowego, która w danym momencie czasowym nie utraciła spójności. Proces niszczenia calizny rozgrywa się w cienkiej warstwie węgla sąsiadującego z granicą calizny. Proces wyrzutu jest procesem cyklicznym, polegającym na odrywaniu kolejnych warstw węgla od granicy calizny — w laboratorium obserwuje się, że masy powyrzutowe składają się z cienkich płatków (rys. 1).

Po oderwaniu od calizny fragmenty węgla (masy powyrzutowe) transportowane są w głąb wyrobisk górniczych, a granica calizny w rezultacie cyklicznych destrukcji przemieszcza się w głąb pokładu węgla.

* Instytut Mechaniki Górniczej, Polska Akademia Nauk, Kraków

** Praca została sfinansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Projekt badawczo-rozwojowy nr R09 027 02



Rys. 1. Zdjęcie fragmentu mas powyrzutowych, które otrzymano w wyniku kontrolowanego wyrzutu węgla i gazu w warunkach laboratoryjnych. Kadr obejmuje powierzchnię o wymiarach około 10×7 cm

2. Materiał przeznaczony do badań

Do badań laboratoryjnych przeznaczono węgiel pobrany w rejonie chodnika transportowego D-8 pokładzie 409/4 KWK „Zofiówka”. Miejsce pobrania znajdowało się w rejonie skrzyżowania chodnika transportowego D-8 z chodnikiem podścianowym D-6, w odległości około 100 m od miejsca, w którym w dniu 22 listopada 2005 r. nastąpił wyrzut metanu i skał.

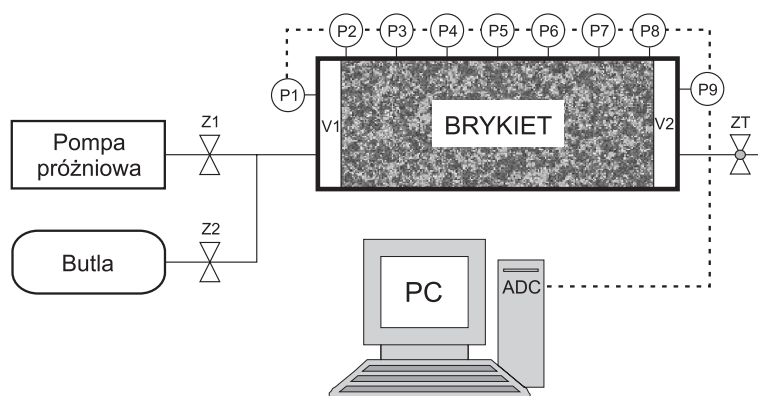
Węgiel pobrano w postaci prób kawalkowych, w ilości ok. 50 kg. Został on pokruszony na kruszarce szczękowej do wielkości ziarna maksymalnego około 7 mm, a następnie poddany mieleniu w młynie kulowym, celem uzyskania granulacji poniżej 0,2 mm. Całość próby uśredniono za pomocą podzielnika Jonesa.

Z tak uzyskanego materiału węglowego formowano brykiety metodą dwustronnego, bezlepiszczowego prasowania ciśnieniem statycznym. Wykonywano je bezpośrednio w rurze wyrzutowej. Przygotowując brykiety węglowe opierano się na doświadczeniach uzyskanych podczas prowadzenia eksperymentów „wyrzutowych” na węglach dolnośląskich [12].

W sumie wykonano 10 brykietów, po 5 sztuk w dwóch porowatościach $\varepsilon = 20,5 (\pm 0,5)\%$ oraz $\varepsilon = 22,5 (\pm 0,5)\%$. Wybór takich wartości tego parametru był nieprzypadkowy. Struktura brykietów węglowych jest zbliżona do struktury węgla odmienionych, w szczególności mylonitu. Po wyrzucie metanu i skał, który miał miejsce w dniu 22 listopada 2005 r. KWK „Zofiówka”, w masach powyrzutowych stwierdzono podwyższoną zawartość mylonitu, którego porowatość w nienaruszonym pokładzie kształtuje się na poziomie $20 \div 22,5\%$ [11].

3. Stanowisko pomiarowe i sposób prowadzenia eksperymentów

Stanowisko pomiarowe do badania przebiegu procesów prowadzących do wyrzutu węgla i gazu w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 2. Zasadniczym jego elementem jest grubościenna, stalowa rura, na poboczniczy której wykonano siedem gniazd na manometry. Rura zamykana jest dwoma stalowymi pokrywami, w których wykonano po jednym gnieździe na manometr i po jednym przyłączy pneumatycznym. Rura ta nazywana jest zwyczajowo rurą wyrzutową i została zaadoptowana z poprzedniego stanowiska badawczego [9]. W skład stanowiska wchodzi również: pompa próżniowa oraz butla z gazem zaopatrzona w reduktor lub manostat. W czasie eksperymentów, w których nie była wymagana znajomość bilansu gazu ani utrzymywanie stałego ciśnienia, gaz był podawany bezpośrednio z butli do wnętrza rury wyrzutowej. Manostat zastępował reduktor w pozostałych przypadkach. Ciśnienia mierzone przez manometry, odczytywane były w czasie rzeczywistym przez stację zbierania danych — komputer z kartą przetwornikową ADC.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego do badań filtracyjnych na brykietach węglowych.

Symbolami P1–P9 oznaczono manometry, Z1–Z2 — zawory, a ZT — zawór tłumiący.

Stację zbierania danych stanowi komputer stacjonarny — PC oraz karta przetwornikowa — ADC

Po zamknięciu wylotów rury wyrzutowej brykiety były nasycały gazem. Nasycaenie kończyło się w momencie uzyskania równomiernego rozkładu ciśnienia porowego w obrębie brykiety, zrównoważonego ciśnieniami w komorach V1 i V2. Taki układ pozostawał w równowadze. Prowokowanie wyrzutów w warunkach laboratorium polegało na naruszeniu tej równowagi. Realizowano to kontrolowanym obniżaniem ciśnienia w komorze V2, wypuszczając gaz poprzez zawór tłumiący ZT.

Każdy eksperyment składał się z serii pomiarów i związany był z jednym brykietem. W każdym kolejnym pomiarze w serii coraz gwałtowniej obniżano ciśnienie w komorze V2, przez co prowokacja była coraz intensywniejsza, aż do zajścia wyrzutu włącznie. Eksperyment kończył się destrukcją brykiety.

4. Model matematyczny i jego zastosowanie

Przyjęto, że gaz zawarty w brykiecie można podzielić na gaz „wolny” wypełniający makropory i gaz „związany” w obszarach mikro- i submikroporów. System połączonych makroporów stanowi drogę transportu (filtracji) gazu wolnego. Zazwyczaj ilość gazu zasorbowanego przewyższa znacznie ilość gazu wolnego. Aby gaz związany sorpcją mógł wziąć udział w procesach prowadzących do wyrzutu oraz podczas jego trwania, musi zostać wcześniej uwolniony i przetransportowany do makroporów, co wymaga upływu czasu. Dlatego uważa się, że istotną rolę w inicjacji i podtrzymywaniu wyrzutu pełni gaz wolny. Główna rola gazu związanego sorpcją może polegać na modyfikacji stanu naprężeń rezydualnych — na co wskazuje praca [8] oraz na dostarczaniu energii w procesie transportu zniszczonego materiału węglowego w głąb wyrobisk.

Naprężenia w obrębie brykietu wynikają z sumowania różnych składników. Są to przede wszystkim naprężenia rezydualne, zamrożone w trakcie formowania brykietu oraz naprężenia związane z obecnością gazu, wywoływane parciem ciśnienia gazu wolnego na ścianki makroporów w brykiecie. Do tego dojdą efekty pęcznienia matrycy węglowej towarzyszące sorpcji. Przyjmuje się, że zachwianie równowagi brykietu, które doprowadza do inicjacji wyrzutu jest związane z naprężeniami gazowymi.

Podczas eksperymentu z prowokowaniem wyrzutu we wnętrzu brykietu wytwarzał się zmienny w czasie rozkład naprężeń gazowych $\sigma(x, t)$, który z pewnym przybliżeniem opisuje empiryczna formuła podana przez Topolnickiego [9]:

$$\sigma(x, t) = \frac{P_0(t) - P(x, t)}{1 + \kappa x^2}, \quad (1)$$

gdzie:

$P(x, t)$ — ciśnienie gazu we wnętrzu brykietu [Pa] w funkcji położenia x [m] i czasu t [s];

$P_0(t)$ — ciśnienie gazu przed czołem brykietu (w komorze V2) [Pa];

κ — parametr określany na podstawie empirycznej zależności:

$$\frac{1}{1 + \kappa x_{0,5}^2} = \frac{1}{2};$$

$x_{0,5}^2$ — odległość od granicy brykietu równa połowie średnicy rury wyrzutowej [m²].

Postać równania (1) wynika z założenia, że filtracja gazu przez brykiet węglowy jest traktowana jako proces jednowymiarowy. Przestrzenno-czasowy rozkład ciśnienia $P(x, t)$ wyznaczano na podstawie pomiarów w trakcie eksperymentów z nieskuteczną i skuteczną prowokacją wyrzutów. Rozdzielczość czasowa takich pomiarów była w pełni zadowalająca. Natomiast ich rozdzielczość przestrzenna — wynikająca z rozmieszczenia manometrów na poboczniczy rury wyrzutowej — była niewystarczająca. Do jej „poprawy” wykorzystano matematyczny model filtracji gazu niesorbującego poprzez ośrodek porowaty. Model ten jest oparty na równaniu ciągłości [1], w którym prędkość płynu zastąpiono prędkością uno-

szenia zdefiniowaną prawem Darcy'ego [2], gęstość płynu opisuje równanie Clapeyrona, a przepuszczalność określona jest poprawką Klinkenberga [5]:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \frac{k_{\infty}}{\varepsilon\mu} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 P^2(x,t)}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} \right] \quad (2)$$

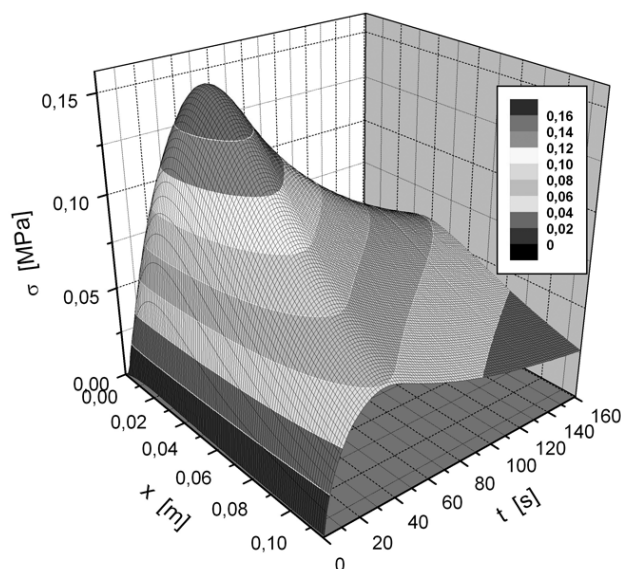
gdzie:

- k_{∞} — przepuszczalność przy ciśnieniu dążącym do nieskończoności [m^2];
- μ — współczynnik lepkości dynamicznej [P];
- b — parametr poślizgu (którego wartość zależy zarówno od właściwości gazu, jak i ośrodka porowatego) [Pa].

Badania Topolnickiego i Wierzbickiego [10] potwierdzają przydatność równania (2) do opisu filtracji helu, argonu i azotu poprzez brykiety węglowe.

Napisano dedykowany program komputerowy [8], którego jednym z zadań było wyznaczanie wartości parametrów k_{∞} i b . Wartości te pozwalały odtworzyć przestrzenno-czasowy rozkład ciśnienia w analizowanym pomiarze z co najmniej zadowalającą dokładnością i dla dowolnych wartości zmiennych x i t . Stąd model ten stanowił swego rodzaju formułę interpolacyjną wyników pomiarów w eksperymentach z prowokowaniem wyrzutów, zwłaszcza w dziedzinie położenia.

Kolejnym zadaniem wspomnianego programu komputerowego było obliczenie przestrzenno-czasowych rozkładów naprężeń $\sigma(x, t)$ zgodnie z formułą (1). Przykładowy wynik takich obliczeń w formie trójwymiarowego wykresu zaprezentowano na rysunku 3.

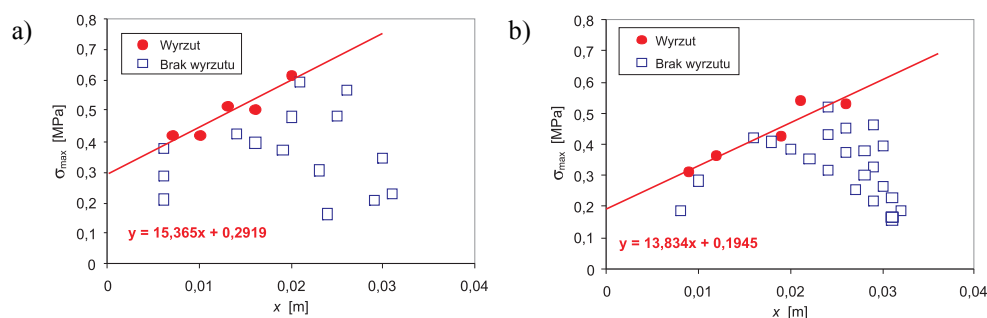


Rys. 3. Naprężenia gazowe w funkcji położenia i czasu w jednym z pomiarów

Wykres ten zawiera szereg istotnych informacji o przebiegu eksperymentu, jednak w dalszych rozważaniach zostanie wykorzystana jedynie najistotniejsza — położenie maksimum globalnego naprężeń gazowych $\sigma_{\max}(x, t)$.

5. Interpretacja uzyskanych wyników eksperymentalnych

Na rysunku 4 zebrano obliczone maksymalne wartości naprężeń gazowych σ_{\max} w funkcji odległości od czoła brykietu x . Kwadraty odnoszą się do prowokacji nieskutecznych, natomiast koła odnoszą się do prowokacji skutecznych. Do tych ostatnich dopasowano proste regresji, które oddzielają płaszczyzny wykresów (w sposób umowny) na dwa obszary. Pierwszy, znajdujący się powyżej tych prostych, to obszar naprężeń gazowych niemożliwych do uzyskania w dowolnie przeprowadzonym eksperymencie. Drugi, znajdujący się poniżej tych prostych, to obszar pomiarów, z których żaden nie zakończył się inicjacją wyrzutu węglowo-gazowego. Na granicy tych obszarów znajdują się eksperymenty, które zakończyły się wyrzutem. Stąd znajomość parametrów dopasowanych prostych pozwala przewidzieć warunki, spełnienie których będzie prowadziło do inicjacji wyrzutu. Oczywiście dotyczy to badanego materiału i rodzaju gazu.



Rys. 4. Wykresy ilustrujące zależność obliczonych wartości maksimum globalnych naprężeń gazowych w funkcji położenia względem czoła brykietu. Wykres a) dotyczy brykietów o średniej porowatości 20,3%, natomiast wykres b) dotyczy brykietów o średniej porowatości 22,5%

Skuteczność prowokacji (możliwość zaistnienia pierwszego pęknięcia w brykiecie) zależy m.in. od wartości naprężeń gazowych i od kompensującego wpływu tarcia warstwy brykietu o pobocznice rury wyrzutowej. Należy spodziewać się, że ów kompensujący wpływ będzie narastać w miarę oddalania się od czoła brykietu. Wpływ ten może mieć charakter liniowy, gdyż kółka na obu wykresach z rysunku 4 grupują się wokół linii prostych. Wartość naprężenia odpowiadająca pozycji $x = 0$ (czoło brykietu) określa wartość naprężenia gazowego w miejscu, gdzie zanika kompensacyjny wpływ tarcia, a więc może mieć bezpośredni związek z wytrzymałością brykietu na rozciąganie σ_R .

Aby to sprawdzić, wykonano pomiary σ_R metodą testu brazylijskiego. Mimo zastrzeżeń do próby brazylijskiej [6] uznano, że jest to jedyny praktycznie wykonalny sposób na uzyskanie parametru σ_R dla badanego materiału węglowego. Zarejestrowane w trakcie testów wartości obciążeń, przy których próbki pękały, przeliczono na wartości σ_R zgodnie z formułą [3]:

$$\sigma_R = -0,7 \frac{F}{\pi r l}, \quad (3)$$

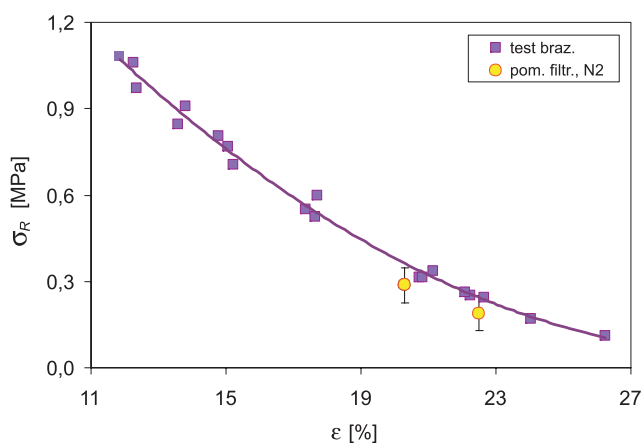
gdzie:

F — siła nacisku na pobocznicy próbki [kg],

r — promień próbki [m],

l — wysokość próbki [m].

Wzór ten różni się od najczęściej stosowanej zależności podanej przez Hondrosa (Hondros, 1959) współczynnikiem 0,7. Współczynnik o takiej wartości ma według Fairhursta kompensować niedoskonałość polegającą na odstępstwie od punktowego przyłożenia siły do pobocznic testowanej próbki. Nowakowski i Młynarczuk [7] potwierdzają, że test brazylijski prowadzony w rzeczywistych warunkach może dawać zawyżone wyniki, co uzasadnia dodatkowo użycie formuły (3).



Rys. 5. Rezultaty testów brazylijskich (kwadraty). Na wykres naniesiono również znalezione wartości naprężeń gazowych dla $x = 0$ (wraz z błędami wyznaczenia), uzyskane w pomiarach filtracyjnych (kółka)

Rezultaty testów brazylijskich w rozważanym zakresie porowatości układają się wzdłuż krzywej trendu zbliżonej do paraboli. Uzyskane w eksperymentach filtracyjnych naprężenia gazowe dla $x = 0$ znajdują się po stronie niższych wartości σ_R , jednak biorąc pod uwagę błędy ich wyznaczenia można powiedzieć, że są zgodne z wynikami testów brazylijskich.

Z powyższej analizy wynika, że do wyrzutu węgla i gazu w warunkach laboratoryjnych może dojść w sytuacji, gdy naprężenie gazowe wygenerowane na czole brykietu ma wartość równą lub wyższą od jego wytrzymałości na rozciąganie. Podobne obserwacje poczyniono podczas prowadzenia eksperymentów wyrzutowych z użyciem węgla dolnośląskich [12].

6. Wnioski

Inicjacja wyrzutu może następować w miejscu i czasie wyznaczonym przez maksymalną wartość naprężeń gazowych wywołanych nierównomiernym rozkładem ciśnienia porowego.

Im wyższa porowatość węgla, tym niższa jego wytrzymałość na rozciąganie i niższa wartość naprężeń gazowych, która jest konieczna do inicjacji wyrzutu.

Maksymalna wartość, jaką mogą przyjmować naprężenia gazowe podczas prowokowania wyrzutu jest równa różnicy pomiędzy ciśnieniem nasycania (porowym) a ciśnieniem atmosferycznym. Wyrzuty mogą zachodzić w sytuacji, gdy różnica pomiędzy ciśnieniem porowym i atmosferycznym jest nie mniejsza niż wytrzymałość węgla na rozciąganie.

LITERATURA

- [1] *Bear J.*: Dynamics of fluids media. Amsterdam, American Elsevier Publishing Company 1972
- [2] *Dake L.P.*: Fundamentals of reservoir engineering. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub Co 1978
- [3] *Fairhurst C.*: On the validity of the Brazilian test for brittle materials. International Journal of Rock Mechanics, 1964, vol. 1, nr 4, s. 535–546
- [3] *Hondros G.*: The evaluation of Poison's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete., Aust. J. App. Sci., vol. 10, 1959, s. 243–268
- [4] *Klinkenberg, L.J.*: The permeability of porous media to liquids and gases, 200 pp., A.P.I. Drilling and Production Practice 1941
- [5] *Nagaraj T.S.*: Principles of testing solids. Amsterdam, Rock and Concrete, Elsevier 1993
- [6] *Nowakowski A., Młynarczuk M.*: Informacja ustna od A. Nowakowskiego, sformułowana na podstawie wyników badań porównawczych testów jednoosiowego rozciągania i testów brazylijskich wykonanych dla piaskowca, granitu, kwarcytu i dolomitu, 2008
- [7] *Sobczyk J.*: Zjawiska towarzyszące sorpcji/desorpcji w trakcie niestacjonarnego transportu gazu poprzez brykiety węglowe w aspekcie wyrzutów skalno-gazowych, IMG PAN, Kraków, 2008 (rozprawa doktorska)
- [8] *Topolnicki J.*: Wyrzuty skalno-gazowe w świetle badań laboratoryjnych i modelowych, Studia Rozprawy i Monografie nr 67, IGSMiE, Kraków, 1999
- [9] *Topolnicki J., Wierzbicki M.*: Phenomenological Description of Gas Seepage in Coal Briquettes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences — Earth Sciences, 2000, vol. 48, no. 1, s. 63–76
- [10] *Tor A., Jakubów A., Wierzbicki M.*: Zagrożenie wyrzutem metanu i skał przy drażeniu wyrobisk korytarzowych w pokładzie 409/4 partia D KWK „Zofiówka”, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, Nr IV/2007, Wydanie specjalne, str. 273–288, Katowice, 2007
- [11] *Wierzbicki M.*: Zmiany stanu naprężenia i wyłężenia materiału w trakcie prowokowania i inicjacji laboratoryjnego wyrzutu skalno-gazowego, [w:] Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Rozprawy, Monografie, nr 4, 2003