

Barbara Dutka\*, Jan Walaszczyk\*\*, Mirosław Wierzbicki\*

## OKREŚLENIE CIŚNIENIA ZŁOŻOWEGO METANU NA PODSTAWIE POMIARÓW METANONOŚNOŚCI ORAZ BADAŃ SORPCYJNYCH WĘGLA NA PRZYKŁADZIE KWK „KRUPIŃSKI”

---

### 1. Wprowadzenie

Doświadczenia światowe oraz nabyte w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym pokazują, iż bezpośredni pomiar ciśnienia złożowego w warunkach naturalnych jest zadaniem trudnym. Trudności wynikają przede wszystkim z przyczyn technicznych i powodują, że parametr ten, mimo, iż niezwykle istotny, bywa mierzony bardzo rzadko zarówno w polskim jak i światowym górnictwie. W takim wypadku dobrym rozwiązaniem jest stosowanie metod pośrednich. Jedną z takich metod opisana została w pracy [6]. Polega ona na odtworzeniu ciśnienia złożowego na podstawie porównania wyników pomiarów desorbometrycznych w warunkach *in situ* oraz w laboratorium.

W niniejszym opracowaniu posłużono się metodą oceny ciśnienia złożowego metanu polegającą na porównaniu metanonośności węgla z izotermą sorpcji metanu na badanej próbce węgla. Znając metanonośność złoża oraz zależność pomiędzy ciśnieniem, temperaturą i pojemnością sorpcyjną próbki a także jej porowatość, można podjąć próbę odtworzenia ciśnienia złożowego gazu.

### 2. Charakterystyka badanego węgla

W Laboratorium Układu Węgiel – Gaz Pracowni Mikromerytyki IMG PAN przeprowadzono badania na węglu pobranym z pokładu 328/1 KWK „Krupiński”.

---

\* Instytut Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk, Kraków

\*\* Instytut Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Węgiel rozdrobniono do następujących frakcji:

- kawałkowej o objętości ok. 17 cm<sup>3</sup> w celu wyznaczenia gęstości objętościowej,
- klasy ziarnowej 0,315÷0,5 mm w celu określenia gęstości rzeczywistej węgla oraz wyznaczenia izotermy sorpcji metanu,
- klasy ziarnowej < 0,200 w celu oznaczenia zawartości części lotnych, popiołu oraz jego wilgotności.

Charakterystykę badanego materiału zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1  
Parametry charakteryzujące badany węgiel

Gęstość objętościowa, g/cm <sup>3</sup>	1,31
Gęstość rzeczywista, g/cm <sup>3</sup>	1,58
Porowatość, %	16,8
Zaw. części lotnych, %	41,35
Zaw. popiołu, %	25,22
Wilgotność, %	2,40

Gęstość rzeczywistą (helową) węgla  $\rho_{He}$  określono metodą piknometrii helowej, natomiast gęstość objętościową  $\rho_p$  metodą piknometrii quasi-cieczowej na aparatach AccuPyc oraz GeoPyc firmy Micromeritics.

Badany węgiel charakteryzuje się dużą gęstością rzeczywistą wynoszącą 1,58 g/cm<sup>3</sup>. Tak wysoka gęstość szkieletu węglowego próbki wynika z obecności wtrąceń w postaci substancji mineralnych. Dla badanego węgla oznaczono zawartość popiołu wynoszącą 25,22%.

Porowatość węgla  $\varepsilon$  została określona na podstawie gęstości objętościowej i rzeczywistej, z równania:

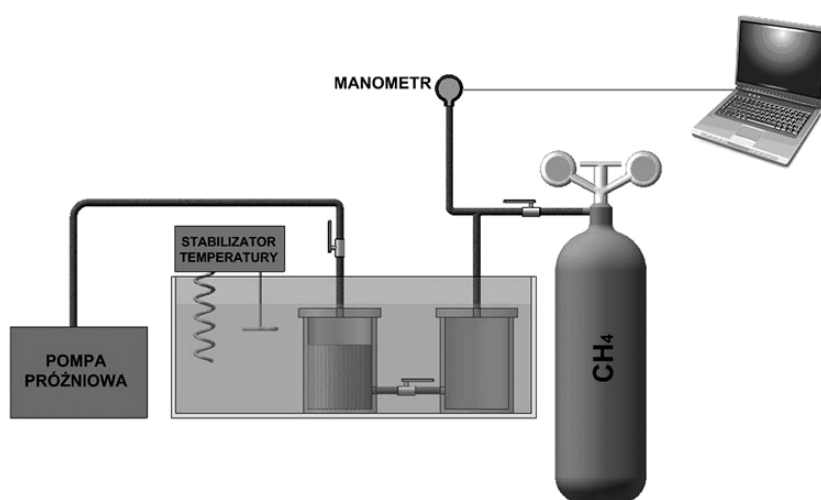
$$\varepsilon = 1 - (\rho_p / \rho_{He}). \quad (1)$$

Dla badanej próbki węgla porowatość wynosi 16,8%.

### 3. Badania sorpcyjne — metoda pomiarowa

Pomiary sorpcyjne prowadzono metodą objętościową. Metoda ta pozwala na wyznaczenie wielkości sorpcji, czyli ilości metanu zasorbowanego na powierzchni węgla, gdy układ znajduje się w stanie równowagi sorpcyjnej. Stosowana jest do badania przebiegu sorpcji a jej wyniki są zgodne z wynikami uzyskiwanymi metodą grawimetryczną [7].

Na rysunku 1 przedstawiono układ pomiarowy do badań sorpcyjnych. Składa się on z dwóch metalowych pojemników sorpcyjnych połączonych zaworem. Do jednego z nich podawany jest gaz. W drugim umieszczona jest próbka węgla o znanej objętości. Warunki izotermiczne układu zapewnia łaźnia wodna, a kontrolę ciśnienia przetwornik umożliwiający rejestrację ciśnienia w pamięci komputera PC.



Rys. 1. Schemat układu do badań sorpcyjnych

Badania prowadzono na próbce węgla o klasie ziarnowej  $0,315 \div 0,5$  mm, uprzednio wysuszonej w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  do stałej masy. Odważoną ilość węgla zamknięto w pojemniku sorpcyjnym i odgazowano w temperaturze  $45^{\circ}\text{C}$  do uzyskania ciśnienia końcowego poniżej  $1,3$  Pa.

Badania sorpcyjne polegały na wyznaczeniu izotermy sorpcji metanu na węglu z KWK „Krupiński” dla ciśnień równowagowych od 0 do około  $1,4$  MPa. Ponieważ temperatura wpływa na ilość gazu zasorbowanego przez węgiel, pomiary sorpcyjne prowadzono w temperaturze  $38^{\circ}\text{C}$  ( $318$  K), jako najbardziej zbliżonej do warunków panujących w pokładzie. Zastosowano następującą procedurę:

- dozowanie znanej ilości metanu do pojemnika gazowego,
- oczekiwanie na stabilizację ciśnienia metanu w temperaturze  $311$  K,
- rozpoczęcie procesu sorpcji przez otwarcie zaworu łączącego pojemnik z próbką oraz pojemnik z gazem,
- obserwacja spadku ciśnienia spowodowanego sorpcją metanu na węglu,
- oczekiwanie na osiągnięcie ciśnienia równowagowego w układzie pomiarowym,
- wyliczenie ilości gazu zasorbowanego na podstawie bilansu gazowego układu,

- zamknięcie zaworu łączącego pojemniki sorpcyjne,
- dozowanie kolejnej porcji metanu,
- przeprowadzenie analogicznych czynności jak po pierwszym dozowaniu,
- prowadzenie procesu sorpcji do chwili uzyskania punktów izotermy w założonym przedziale ciśnień równowagowych.

#### 4. Wyniki pomiarów oraz ich analiza

Gaz w węglu można podzielić na gaz sorbowany, związany z powierzchnią wewnętrzną węgla ( $a$ ) oraz gaz „wolny” występujący w jego porach i szczelinach ( $w$ ).

Dla układu sorbent–sorbat (w naszym przypadku węgiel–metan), będącego w stanie równowagi, wielkość sorpcji ( $a$ ) zależy od temperatury ( $T$ ) oraz ciśnienia gazu ( $p$ ) znajdującego się w fazie objętościowej (niezwiązanego sorpcją):

$$a = f(p, T).$$

Przy zachowaniu stałej temperatury układu można wyznaczyć izotermę sorpcji:

$$a = f(p)_{T=const.}$$

Na rysunku 2 pokazano izotermy sorpcji metanu na węglu z KWK „Krupiński”. Metan sorbowany przeliczono na warunki standardowe i czystą substancję węglową. Do punktów doświadczalnych dopasowano optymalne przebiegi spełniające równanie Langmuira:

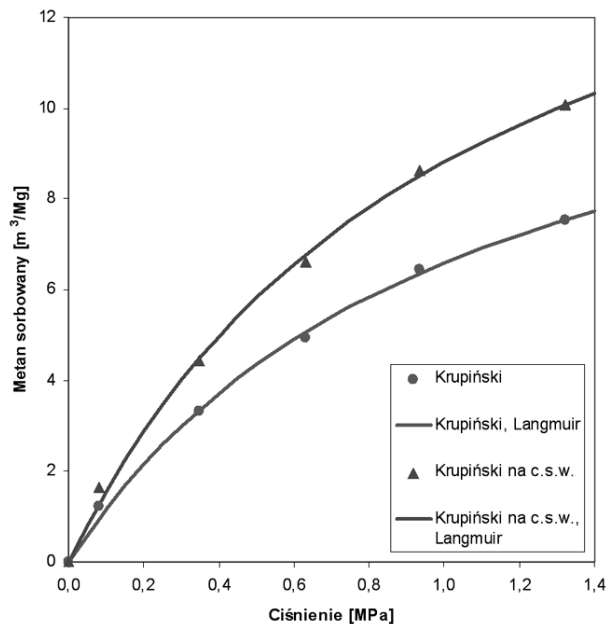
$$a = a_m \frac{bp}{1 + bp} \quad (2)$$

gdzie:

- $a$  — ilość metanu zasorbowanego przy danym ciśnieniu równowagowym  $p$ ,  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}$ ;
- $a_m$  — maksymalna wielkość sorpcji, gdy  $p \rightarrow \infty$ ,  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}$ ;
- $b_b$  — stała charakterystyczna dla układu węgiel–metan,  $\text{MPa}^{-1}$ ;
- $p$  — ciśnienie gazu wolnego (w fazie objętościowej),  $\text{MPa}$ .

W równaniu Langmuira stała  $a_m$  jest wielkością maksymalnej pojemności sorpcyjnej węgla natomiast stała  $b$  jest odwrotnością ciśnienia, przy którym zapełnienie jego powierzchni osiąga  $0,5 a_m$ . Dla danego węgla wartości stałych równania Langmuira  $a_m$  oraz  $b$  są uzależnione od temperatury:

$$a(p, T) = a_m(T) \frac{b(T)p}{1 + b(T)p} \quad (3)$$



**Rys. 2.** Izotermy sorpcji metanu na węglu z KWK „Krupiński” wyznaczone w temperaturze 38°C (311 K)

Wzrost temperatury zmniejsza ilość gazu zasorbowanego w węglu. Lama i Bodziony [2] stwierdzili, że przy ciśnieniu 1 MPa wzrost temperatury o 10 stopni obniża pojemność sorpcyjną węgla o około 1 m<sup>3</sup>/Mg. W pracy [7] określono zmiany pojemności sorpcyjnej węgla zdeformowanego strukturalnie wynikające ze zmiany temperatury ośrodka węglowego. Przykładowo, podniesienie temperatury układu sorbent–sorbat z 298 na 313 K, przy ciśnieniu równowagowym 1 MPa, powoduje obniżenie pojemności sorpcyjnej o 2 m<sup>3</sup>/Mg<sub>csw</sub>, czyli o około 20%. Zjawisko obniżenia zdolności sorpcyjnych węgla ze wzrostem temperatury obserwowali również inni badacze, czego wynikiem są m.in. prace [1, 3, 5].

W temperaturze 38°C (311 K) węgiel może zasorbować maksymalnie 18,08 m<sup>3</sup>/Mg<sub>csw</sub> a połowa maksymalnej pojemności sorpcyjnej zostaje osiągnięta przy ciśnieniu 1,05 MPa. Podstawiając wartości stałych  $a_m$  oraz  $b$  uzyskano zależność, pozwalającą na wyliczenie pojemności sorpcyjnej badanego węgla w temperaturze 38°C dla dowolnej wartości ciśnienia:

$$a(p, 311K) = 18,08 \frac{0,95p}{1 + 0,95p} \quad (4)$$

Dopasowanie równania Langmuira do punktów doświadczalnych daje możliwość ekstrapolacji ilości metanu sorbowanego dla wyższych ciśnień.

Izoterma sorpcji metanu stanowi bazę do odtworzenia ciśnienia złożowego metanu. Na podstawie znajomości metanonośności pokładu, z którego pobrano badany węgiel, pojem-

ności sorpcyjnej w funkcji ciśnienia (izotermy sorpcji) oraz porowatości węgla, niezbędnej do wyliczenia ilości gazu wolnego w węglu można podjąć próbę przełożenia wyników pomiarów laboratoryjnych na warunki *in situ* w celu oszacowania wielkości ciśnienia złożowego.

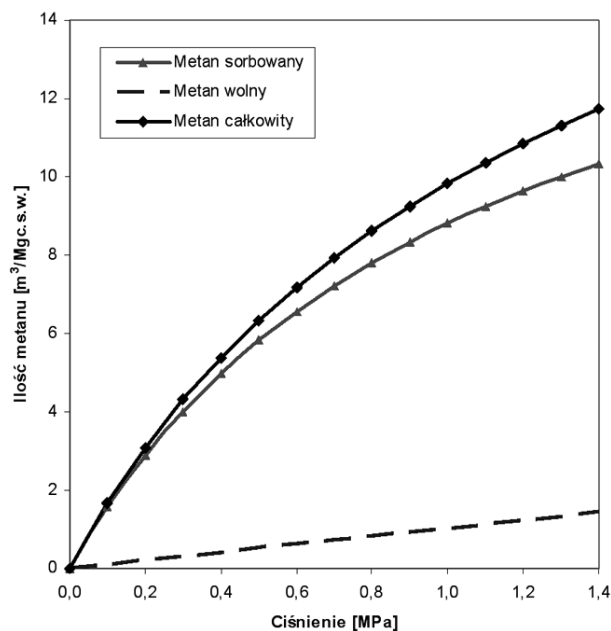
Ilość gazu wolnego odniesioną do warunków standardowych obliczono na podstawie zależności:

$$w = \frac{\varepsilon}{\rho_{He}} \frac{P}{P_0} \cdot \frac{298}{T} \quad (5)$$

gdzie:

- $w$  — ilość metanu wolnego przy danym ciśnieniu równowagowym  $p$ ,  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}$ ;
- $\varepsilon$  — porowatość [-];
- $P$  — ciśnienie absolutne gazu wolnego, MPa;
- $P_0$  — ciśnienie atmosferyczne, MPa;
- $T$  — temperatura absolutna górotworu, K;
- $\rho_{He}$  — gęstość rzeczywista węgla,  $\text{Mg}/\text{m}^3$ .

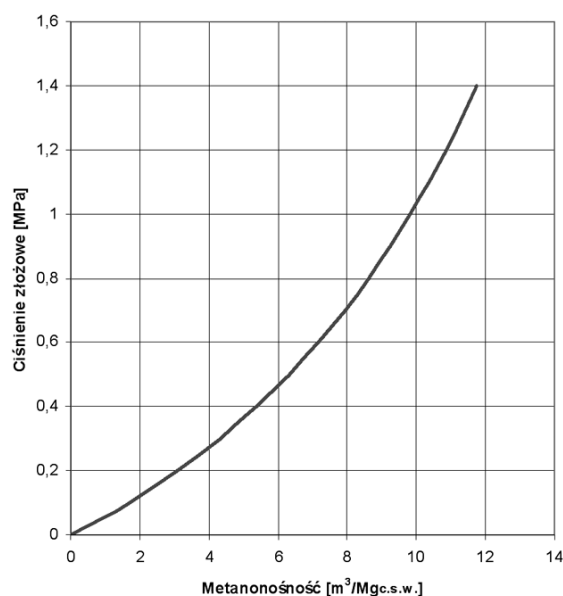
Ilość gazu wolnego oraz zasorbowanego w funkcji ciśnienia równowagowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zawartości metanu wolnego, sorbowanego oraz ich suma w funkcji ciśnienia w temperaturze 38°C (311 K)

Krzywa zaznaczona kolorem czarnym obrazuje całkowitą zawartość metanu w węglu i może być porównywana z metanonością złoża. Warto zwrócić uwagę na fakt, że jej dominującym składnikiem gazu jest gaz sorbowany. Udział gazu wolnego w węglu jest niewielki nawet przy wyższych ciśnieniach i porowatości węgla rzędu 10÷20%. Uwaga ta dotyczy badanego zakresu ciśnień, gdyż ze wzrostem ciśnienia krzywa sorpcji zmierza ku wartości asymptotycznej a udział gazu wolnego (zmieniający się liniowo) będzie wzrastał.

Na podstawie wyników powyższych badań wykreślono krzywą przedstawiającą zależność ciśnienia porowego metanu w funkcji całkowitej ilości metanu zawartego w węglu. Krzywą tą pokazano na rysunku 4.



**Rys. 4.** Ciśnienie złożowe metanu określone metodą pośrednią w funkcji metanoności węgla z pokładu 328/1 KWK „Krupiński” dla temperatury 38°C (311 K)

Uwzględniając następnie wyniki pomiarów metanoności pokładu 328/1 KWK „Krupiński” podane przez K. Łukowicza [4] (zawiera się ona w przedziale od 0,57 do 6,86 m³/Mg<sub>csw</sub>, wartość średnia: 2,07 m³/Mg<sub>csw</sub>) oszacowano ciśnienie złożowe metanu. Wartość tego ciśnienia znajduje się w przedziale od 0,032 do 0,561 MPa, zaś ciśnienie odpowiadające średniej metanoności wynosi 0,1264 MPa.

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy technicznej oraz własności sorpcyjne węgla pobranego z pokładu 328/1 KWK „Krupiński”. Wyniki pomiarów zostały wykorzystane do

określenia pojemności sorpcyjnej oraz zawartości gazu wolnego w funkcji ciśnienia. Znając metanonośność złoża oraz bilans gazowy wyznaczony w warunkach laboratoryjnych określono ciśnienie złożowe metanu metodą pośrednią. Metoda ta wydaje się być dosyć prosta w wykonaniu. Jest pozbawiona problemów technicznych jakich dostarcza bezpośredni pomiar ciśnienia złożowego gazu. Ponadto metoda pozwala na określenie udziałów gazu sorbowanego oraz wolnego w całkowitej ilości metanu w węglu. Ponieważ ilość gazu zawartego w węglu przy danym ciśnieniu jest silnie zależna od temperatury układu węgiel–gaz, metodyka badań musi uwzględniać temperaturę złożową. Korzystając z badań przeprowadzonych w temperaturze innej niż złożowa należy dokonać poprawek korzystając np. z prac [3, 7].

#### LITERATURA

- [1] *Bustin R.M., Clarkson C.R.*: Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content, *International Journal of Coal Geology* Vol. 38 1–2 (1998) 3–26
- [2] *Lama R.D. Bodziony J.*: Outbursts of gas, coal and rock in underground coal mines, R.D. Lama & Associates Wollongong Australia, 1997
- [3] *Levy J.H., Day S.J., Killingley J.S.*: Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties, *Fuel* vol. 76, No.9 (1997) 813–819
- [4] *Łukowicz K.*: Określenie metanowości wybranych warstw karbońskich, Praca wykonana w ramach realizacji projektu badawczego nr 4T12A05530 Ministerstwa Edukacji i Nauki, nie publikowana, 2008
- [5] *Nodzeński A., Holda S.*: Isosteric heats of methane sorption on hard coals of different ranks at elevated pressures, *Archives of Mining Sciences* 46, 4 (2001) 481–490
- [6] *Sporysz G., Piątkowski S., Kulawik M.*: Wpływ ciśnienia gazu na stopień zagrożenia metanowego w pokładzie 352 KWK „Brzeszcze-Silesia” w oparciu o badania desorbometryczne wykonane przez CBiDGP Sp. z o.o., XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GZN 2005, 21–24. 11. 2005, Ustroń
- [7] *Wierzbicki M., Dutka B.*: Zmiany własności sorpcyjnych węgla zdeformowanego strukturalnie wywołane zmianami temperatury układu węgiel–gaz, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GZN 2008