

Związek pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonością dla pokładów kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka – przybliżona zawartość metanu w węglu

BARBARA DUTKA, MIROSLAW WIERZBICKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Przeprowadzono badania statystyczne dla 24 pokładów kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka polegające na statystycznej analizie związku występującego pomiędzy mierzonymi w warunkach *in situ* wartościami wskaźnika desorpcji dp oraz metanonością pokładu Mn . Zbiory danych obejmowały wyniki pomiarów kopalnianych prowadzonych na obszarze górniczym „Zofiówki” w latach 2007-2014. Zgodnie z obowiązującą metodą desorbometryczną, zależność pomiędzy wartościami wskaźnika desorpcji i metanonością przybliżoną uśredniona funkcja liniowa, która obowiązuje dla wszystkich polskich kopalni. W obrębie poszczególnych pokładów kopalni wyznaczono wartości współczynnika korelacji Pearsona oraz przeprowadzono badanie siły korelacji i jej istotności. Posługując się metodą regresji liniowej, określono indywidualne równania opisujące zależność pomiędzy parametrami Mn i dp dla różnych pokładów Ruchu Zofiówka. Zgodnie z przeprowadzoną analizą można zauważyć, że relacja pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonością nie jest stała, lecz zmienia się w zależności od pokładu. Uzyskane rezultaty pozwalają przypuszczać, że zmienność relacji Mn - dp może wynikać ze zmian właściwości sorpcyjnych pokładów charakteryzujących się różnym wiekiem geologicznym. Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych prac.

Słowa kluczowe: metanoność, wskaźnik intensywności desorpcji, korelacja, regresja, model statystyczny

1. Wprowadzenie

Wśród pośrednich metod oznaczania metanoności wymienić można metodę wskaźnikową, ciśnieniową, bilansu metanowego oraz metodę desorbometryczną. Ostatnia z tych metod jest najczęściej stosowana w górnictwie polskim. Metoda desorbometryczna opiera się na istnieniu korelacji między intensywnością desorpcji metanu i całkowitą zawartością metanu w węglu (metanonością) [Borowski, 1975; Tarnowski, 1992; Szlązak et al., 2011; Korzec, 2013], przez co pozwala ona na określenie przybliżonej metanoności pokładów. Na przestrzeni lat zmieniano sposób poboru próbki, konstrukcję mierników desorpcji (desorbometrów) oraz metodykę badawczą. Borowski [1975] wykonywał pomiary desorpcji *in situ*, a następnie porównywał je z wyznaczonymi laboratoryjnie prostymi wzorcowymi. Pomiar objętości desorbowanego gazu V_{2p} polegał na poborze zwiercin klasy ziarnowej 0,5 mm÷1,0 mm z otworów badawczych, które w drugiej minucie od rozpoczęcia wiercenia zamykano w desorbometrze izobarycznym [Stączek, 2002]. Następnie w czasie od 2. do 10. minuty pomiaru mierzono ilość gazu wydzielającego się z węgla. Otrzymany wynik V_{2p} wyrażony w $\text{cm}^3/\text{g}_{\text{CSW}}$, wprowadzano do równania regresji prostej wzorcowej, co pozwalało na określenie ilości gazu sorbowanego. Poprzez porównanie ilości gazu sorbowanego z izotermą sorpcji wyznaczano wartość równowaznego ciśnienia gazu w pokładzie. Całkowita zawartość metanu w węglu, w miejscu poboru zwiercin, stanowiła sumę ilości gazu sorbowanego oraz ilości gazu wolnego wydzielającego się samorzutnie w momencie nawiercania próbki.

Obecnie do pomiaru wskaźnika intensywności desorpcji stosowany jest desorbometr manometryczny cieczowy DMC-2 [Lama i Bodziony, 1996; Stączek i Simka, 2004], w którym umieszczany jest pojemniczek z próbką węgla. Pobrane zwierciny, przed umieszczeniem w pojemniku desorbometru, zostają przesiane do

klasy ziarnowej 0,5 mm÷1,0 mm. Pomiar desorbometryczny, wykonywany pomiędzy od 2. do 4. minuty od chwili rozpoczęcia wiercenia odpowiedniego odcinka otworu, polega na rejestracji ciśnienia metanu uwolnionego z próbki. Zmierzona wartość ciśnienia, wyrażana w kPa, stanowi podstawę do wyznaczenia metanonośności przybliżonej M_d z zależności obowiązującej dla wszystkich polskich kopalń, która koreluje wartość wskaźnika desorpcji dp z zawartością metanu w badanym węglu [PN-G-44200:2013-10]:

$$M_d = 4,5427dp + 0,8927 \quad (1)$$

gdzie:

M_d – metanonośność przybliżona, m^3/Mg_{csw} ,

dp – wskaźnik intensywności desorpcji mierzony w warunkach dołowych pomiędzy 2. i 4. minutą od rozpoczęcia wiercenia, kPa.

Zgodnie z wiedzą zawartą w literaturze, decydujący wpływ na wynik pomiaru desorbometrycznego mają początkowa zawartość metanu w próbce oraz wartość efektywnego współczynnika dyfuzji D_e [Wierzbicki, 2011]. Zważywszy na to, iż efektywny współczynnik dyfuzji zależy od temperatury układu węgiel-metan [Charrière et al., 2010; Wierzbicki, 2013], a jego wartość zmienia się w szerokim zakresie wartości od $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ do $5 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ [Skoczyła i Topolnicki, 2016], relacja pomiędzy wskaźnikiem desorpcji oraz metanonośnością musi się zmieniać w zależności od pokładu. Mając to na uwadze, przanalizowano związek (współzależność) pomiędzy wartościami wskaźnika intensywności desorpcji i oznaczoną metanonośnością różnych pokładów Ruchu Zofiówka kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”.

2. Analiza parametrów gazowych stosowanych dla rozpoznania zagrożenia metanowego i wyrzutowego

IMG PAN uzyskał zgodę Jastrzębskiej Spółki Węglowej na pozyskanie od kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka wyników pomiarów metanonośności Mn oraz wskaźnika intensywności desorpcji dwuminutowej dp , wykonywanych przez uprawnionych rzeczoznawców WUG w latach 2007-2014. Po uporządkowaniu danych zgromadzonych przez kopalnię otrzymano, celem dalszych analiz, zbiór wyników obejmujący 2172 oznaczenia metanonośności, w trakcie których mierzono również zwięźłość węgla f oraz określano zawartość części lotnych V^{daf} . Wyniki zostały poddane obróbce statystycznej, którą rozpoczęto od opisu zmienności parametrów oznaczanych podczas pomiarów metanonośności w analizowanym okresie czasu.

Dla każdego z badanych parametrów określono miary tendencji centralnych [Żebrowska-Łucyk, 2014]:

- średnią arytmetyczną x_{sr} zbioru danych:

$$x_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

gdzie:

x_i – wartość parametru dla i -tego pomiaru,

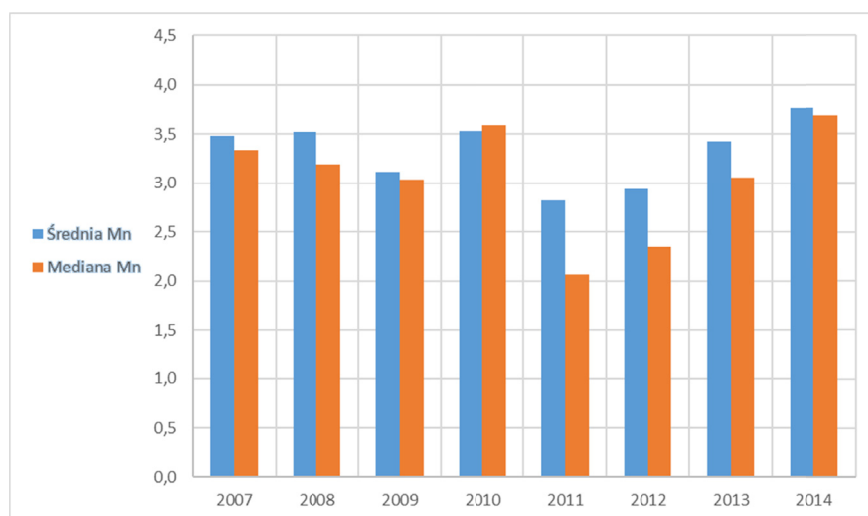
n – ilość wykonanych pomiarów.

- medianę Me_x zbioru danych:

$$Me = \left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{n+1}}{2} \\ \frac{x_n + x_{n+1}}{2} \\ \frac{x_n}{2} \end{array} \right\} \quad \text{dla nieparzystej liczby wykonanych pomiarów} \quad (3)$$

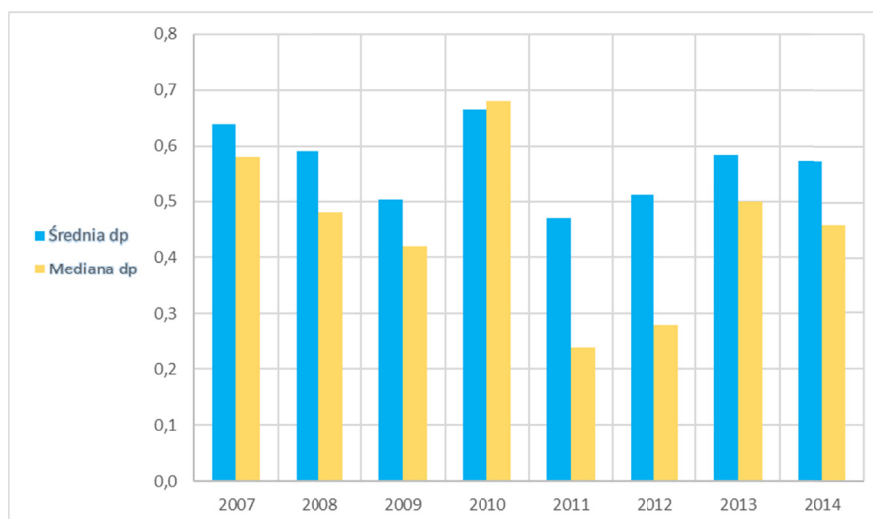
Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wartości średniej oraz mediany metanonośności w poszczególnych latach. Dane na wykresie słupkowym pokazują, iż średnia metanonośność kopalni utrzymywała się na poziomie około $3,50 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{csw}$, po czym w roku 2011 nastąpił wyraźny spadek metanonośności średniej o $0,70 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{csw}$ (20%). Najniższe średnie zawartości metanu w węglu przypadały na lata 2011 i 2012. Od 2012 roku następował regularny wzrost metanonośności i w roku 2014 średnia metanonośność kopalni przekroczyła wartość średnią z początkowych lat badanego okresu. Osiągnęła wtedy najwyższą

wartość średnią wynoszącą $3,77 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$. Podobną zmiennością charakteryzowała się mediana metanoności, przy czym minimum jej wartości, przypadające również na lata 2011 i 2012 było mocniej zarysowane. Najwyższe wartości mediany metanoności przypadają na lata 2010 i 2014, wynosząc odpowiednio $3,59 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$ i $3,69 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$.



Rys. 1. Metanoność średnia oraz mediana metanoności w latach 2007-2014

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wartości średniej oraz mediany wskaźnika intensywności desorpcji metanu w poszczególnych latach. Cechą charakterystyczną analizowanego okresu było maksimum średniej wartości wskaźnika desorpcji (pokrywające się z maksimum jego mediany), przypadające na rok 2010. Maksimum to poprzedzone było widocznym spadkiem wskaźnika desorpcji w latach 2007-2009. W roku 2011 intensywność desorpcji osiągnęła minimum. Wzrost średniej wartości wskaźnika desorpcji od roku 2012 zakończył ponowny spadek jego wartości w roku 2014. W latach 2011 i 2012 różnice pomiędzy wartością średnią i medianą wskaźnika desorpcji były silniej widoczne, podobnie było w przypadku metanoności. Mediana wskaźnika desorpcji wyraźnie przesuwiała się w kierunku wartości niższych od wyznaczonych w kolejnych latach wartości średnich.



Rys. 2. Wartość średnia oraz mediana wskaźnika intensywności desorpcji w latach 2007-2014

Obraz zmienności analizowanych parametrów przedstawiony na rysunkach 1 i 2 wskazuje *a priori* na obecność korelacji pomiędzy Mn i dp . Od tego obrazu nieznacznie odbiegają wartości z 2014, w którym metanoność jest największa z całego analizowanego przedziału lat, natomiast wartość wskaźnika desorpcji jest stosunkowo niska.

3. Analiza związku pomiędzy wartościami wskaźnika intensywności desorpcji i oznaczoną metanonością pokładów Ruchu Zofiówka

Dla poszczególnych pokładów dokonano zestawienia wskaźników intensywności desorpcji metanu względem oznaczonych metanoności pokładu. Zestawione rezultaty nie uwzględniały wyników pomiarów metanoności, którym towarzyszyła zerowa wartość wskaźnika intensywności desorpcji (brak zarejestrowanej desorpcji metanu).

Siłę statystycznego związku liniowego pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonością wyrażono liczbowo za pomocą współczynnika korelacji Pearsona r_{xy} :

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{s_x \cdot s_y}, \quad -1 \leq r_{xy} \leq 1 \quad (4)$$

gdzie:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\dot{s}r})(y_i - y_{\dot{s}r}) - \text{kowariancja pomiędzy zmiennymi } x \text{ i } y,$$

$x_{\dot{s}r}, y_{\dot{s}r}$ – średnia arytmetyczna zmiennych x oraz y z próby o liczności n ,

s_x, s_y – odchylenia standardowe dla zmiennych x i y .

Na podstawie wartości współczynnika korelacji Pearsona r_{xy} określono stopień zależności pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonością opierając się na następującej skali:

$0,0 \leq |r_{xy}| \leq 0,2$ – praktycznie brak związku liniowego pomiędzy parametrami dp i Mn ,

$0,2 < |r_{xy}| \leq 0,4$ – zależność liniowa wyraźna, lecz słaba,

$0,4 < |r_{xy}| \leq 0,7$ – zależność liniowa średnia,

$0,7 < |r_{xy}| \leq 0,9$ – zależność liniowa silna,

$0,9 < |r_{xy}| \leq 1,0$ – zależność liniowa bardzo silna.

Współczynnik r_{xy} (z próby) stanowi ocenę współczynnika korelacji q w danym pokładzie, a zatem jest obciążony pewnym błędem. Należało zatem wykazać, że zależność liniowa, stwierdzona pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonością w badanej próbie, będzie występowała również w pokładzie. Z punktu widzenia statystyki, należało wykazać istotność statystyczną modelu korelacji $Mn(dp)$ na podstawie weryfikacji hipotezy o niezależności cech.

Sformułowano hipotezę zerową $H_0: q = 0$ i hipotezę alternatywną $H_1: q \neq 0$. Zgodnie z hipotezą H_0 proponowany model nie może wyjaśnić poziomu zmiennej zależnej (wartość metanoności), natomiast hipoteza H_1 wskazuje, że model zależności $Mn(dp)$ wyjaśnia poziom zmiennej zależnej.

Obliczono statystyki t_0 (lub w przypadku prób liczniejszych od 122 statystyki z_0):

$$t_0 = |r_{xy}| \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (5)$$

lub

$$z_0 = |r_{xy}| \cdot \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (\alpha, f = n - 2) \quad (6)$$

a następnie porównano je z wielkością tablicową t_{kr} , którą odczytano z tablic rozkładu t -Studenta dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ oraz dla liczby stopni swobody równej $n - 2$.

Jeżeli $t_0 \geq t_{kr}$ to korelacja jest istotna statystycznie (przyjmujemy hipotezę H_1).

Jeżeli $t_0 < t_{kr}$ to korelacja jest nieistotna statystycznie (przyjmujemy hipotezę H_0).

W tab. 1 zestawiono wartości współczynników korelacji r_{xy} Pearsona, rezultaty badania siły korelacji oraz jej istotności.

Analiza wartości współczynnika korelacji Pearsona r_{xy} wykazała, że zależność pomiędzy wartościami wskaźnika desorpcji i metanonością jest bardzo silna dla 4 pokładów Ruchu Zofiówka, dla 16 pokładów jest silna, dla 3 pokładów średnia, a dla 1 pokładu (502/1 C) zależność liniowa praktycznie nie występuje.

W przypadku 23 pokładów „Zofiówki” należy odrzucić hipotezę H_0 i przyjąć jako prawdziwą hipotezę H_1 . Przyjęcie hipotezy H_1 oznacza, że związek liniowy pomiędzy metanonością i wskaźnikiem

Tab. 1. Siła oraz istotność związku pomiędzy metanonością i wskaźnikiem intensywności desorpcji

Pokład	n_{par}	r_{xy}	Korelacja	$f = n - 2$	$t_{kr}(0,05;f)$	t_0	Istotność	p
404/4 F	132	0,673	średnia	130	1,978	10,449	tak	$p < 0,001$
405/1 B	61	0,785	silna	59	2	9,735	tak	$p < 0,001$
405/1 F	17	0,938	bardzo silna	15	2,131	10,454	tak	$p < 0,001$
405/2 F	70	0,785	silna	68	1,996	10,455	tak	$p < 0,001$
406/1 B	73	0,905	bardzo silna	71	1,994	17,894	tak	$p < 0,001$
406/1 F	115	0,701	silna	113	1,981	10,455	tak	$p < 0,001$
409/3 G	54	0,836	silna	52	2,007	10,992	tak	$p < 0,001$
409/4 D	32	0,876	silna	30	2,042	9,965	tak	$p < 0,001$
409/4 G	19	0,943	bardzo silna	17	2,11	11,687	tak	$p < 0,001$
409/4 G	21	0,824	silna	19	2,093	6,35	tak	$p < 0,001$
410 D	102	0,693	średnia	100	1,984	9,608	tak	$p < 0,001$
410 G	148	0,848	silna	146	1,976	19,475	tak	$p < 0,001$
412 D	76	0,706	silna	74	1,993	8,576	tak	$p < 0,001$
412 E	103	0,862	silna	101	1,984	17,121	tak	$p < 0,001$
412 G	154	0,847	silna	152	1,976	19,778	tak	$p < 0,001$
413/2 E	53	0,862	silna	51	2,008	12,128	tak	$p < 0,001$
413/2 G	36	0,751	silna	34	2,032	6,63	tak	$p < 0,001$
413/2 G	34	0,857	silna	32	2,037	9,413	tak	$p < 0,001$
415/4 F	11	0,947	bardzo silna	9	2,262	8,799	tak	$p < 0,001$
416/3 E	37	0,727	silna	35	2,03	6,264	tak	$p < 0,001$
417/1 C	97	0,771	silna	95	1,985	11,797	tak	$p < 0,001$
418/1-2 E	35	0,713	silna	33	2,035	5,836	tak	$p < 0,001$
502/1 C	167	0,164	brak	165	1,975	2,153	tak	0,033
502/1 E	75	0,581	średnia	73	1,993	6,102	tak	$p < 0,001$

intensywności desorpcji w próbach dla tych pokładów jest istotny statystycznie. Ponadto, wartości $p < 0,001$ świadczą o wysokiej istotności statystycznej korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami. Uzyskany wynik uprawnia do przybliżania danych kopalnianych dp i Mn modelem liniowym, natomiast rezultaty obserwowane w badanej próbie można uznać za reprezentatywne dla całego pokładu. Oznacza to również, że w zdecydowanej większości pokładów Ruchu Zofiówka można posługiwać się statystycznym modelem liniowym relacji $Mn - dp$, który w wystarczającym stopniu pozwala na wyznaczanie metanoności przybliżonej.

Pomimo największej liczby pomiarów metanoności ($n = 167$), wykonanych w pokładzie 501/2 należącym do partii C, związek liniowy pomiędzy wartościami dp i Mn praktycznie nie występuje. W pokładzie tym wyznaczanie metanoności przybliżonej wymaga bardziej wnikliwej analizy danych zgromadzonych przez kopalnię. Analiza ta wymaga poszukiwania innego modelu statystycznego służącego opisowi związku pomiędzy parametrami dp i Mn .

W rezultacie przeprowadzonych badań, dla 23 z 24 pokładów Ruchu Zofiówka, przyjęto model liniowy dla zmiennych dp i Mn .

4. Badanie zależności pomiędzy wskaźnikiem intensywności desorpcji i metanonością w celu szacowania metanoności przybliżonej

4.1. Model statystyczny do określania przybliżonej zawartości metanu w pokładzie

W kolejnych pokładach Ruchu Zofiówka wyznaczono zależność pomiędzy wskaźnikiem intensywności desorpcji i metanonością poprzez aproksymację danych pomiarowych funkcją liniową:

$$Mn = a \cdot dp + b \quad (7)$$

gdzie:

Mn – metanoność (zmienna objaśniana), m^3CH_4/Mg_{csw} ,

dp – wskaźnik desorpcji (zmienna objaśniająca), kPa,

a – współczynnik kierunkowy prostej, $m^3CH_4/(Mg \cdot kPa)$,

b – wyraz wolny, m^3CH_4/Mg_{csw} .

W przyjętym modelu statystycznym wskaźnik desorpcji stanowi zmienną objaśniającą, na podstawie której estymowane są wartości metanonośności, czyli zmiennej objaśnianej.

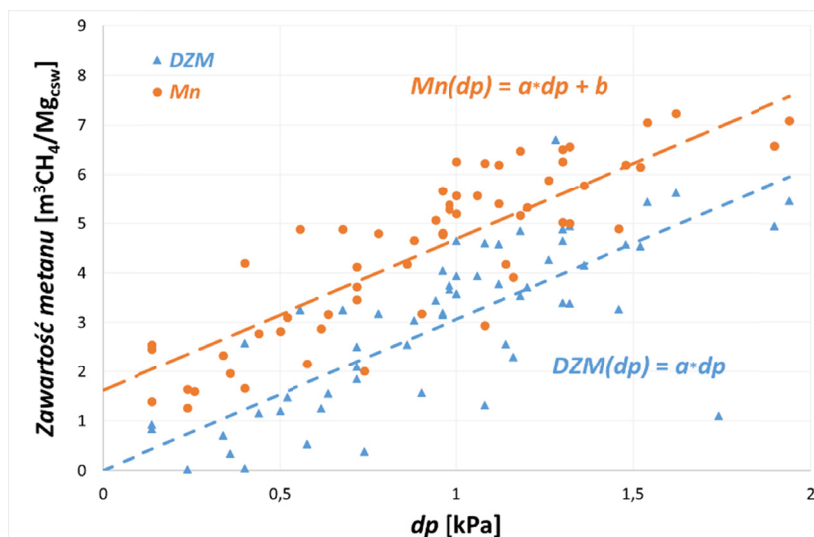
W równaniu (7) występują parametry a i b , które można interpretować następująco:

- współczynnik a , określający nachylenie prostej regresji dla poszczególnych pokładów, charakteryzuje węgiel pod względem zdolności akumulowania metanu oraz intensywności jego uwalniania,
- parametr b , będący wyrazem wolnym powyższej relacji podaje wartość metanonośności przy desorpcji $dp = 0$.

Brak obserwowalnej emisji metanu z węgla może być wynikiem zrównania ciśnienia metanu, jakie panuje w pokładzie, z ciśnieniem atmosferycznym. W takiej sytuacji, całkowita zawartość metanu w pokładzie (metanonośność) nie będzie wyższa od pojemności sorpcyjnej węgla w temperaturze złożowej pod ciśnieniem barycznym (a_{1bar}). Przy $dp = 0$ maksymalna objętość metanu, jaka może uwolnić się z pokładu naruszonego działalnością górnictwem do wyrobiska, czyli tzw. desorbowlana zawartość metanu DZM , będzie równa zero. Można zatem zauważyć, że wartość a_{1bar} wyznacza dolną granicę stosowalności metody desorbometrycznej, natomiast zależność pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i desorbowlaną zawartością metanu przedstawić można w sposób przybliżony jako:

$$DZM = a \cdot dp \quad (15)$$

Na rysunku 3 pokazano przykładową zależność pomiędzy zawartością metanu w węglu (desorbowlaną – DZM oraz całkowitą – Mn) i wskaźnikiem intensywności desorpcji dp .



Rys. 3. Zależność pomiędzy zawartością metanu w węglu i wskaźnikiem desorpcji: linia pomarańczowa – całkowita zawartość metanu, linia niebieska – desorbowlana zawartość metanu

4.2. Metoda regresji liniowej

Rozszerzeniem korelacji liniowej jest regresja liniowa, która pozwala na określenie równania opisującego zależność dwóch zmiennych. Linie regresji zostały wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, polegającą na minimalizacji sumy kwadratów odchyłek punktów pomiarowych od tej linii. Współczynniki a i b linii regresji wyznaczono z odpowiednich wzorów:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

oraz

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (9)$$

Współczynnik a jest nachyleniem linii regresji, natomiast współczynnik b jest punktem przecięcia linii regresji z osią Mn . Określa on przewidywaną wartość metanoności w sytuacji, gdy wskaźnik desorpcji przyjmuje wartość równą 0.

Błąd oszacowania współczynników a i b obliczono na podstawie wariancji resztowej s_r^2 , określającej dyspersję wartości uzyskanych z pomiarów kopalnianych wokół wartości teoretycznych [Makać i Urbanek-Krzysztofiak, 2008]:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k} \quad (10)$$

gdzie:

- n – liczebność próby,
- k – liczba szacowanych parametrów funkcji regresji ($k = 2$),
- y_i – obserwowana (zmierzona) wartość zmiennej objaśnianej,
- \hat{y}_i – przewidywana wartość zmiennej objaśnianej na podstawie modelu regresji.

Odchylenia standardowe współczynników regresji można zapisać:

$$\text{dla współczynnika } a: \quad s_a^2 = \frac{n \cdot s_r^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

$$\text{dla współczynnika } b: \quad s_b^2 = \frac{s_a^2}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (12)$$

W kolejnym kroku określono wartość współczynnika determinacji R^2 , który wskazuje jaka część zmienności uzyskanych wyników metanoności została wyjaśniona przez przyjęty model statystyczny:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{sr})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{sr})^2}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (13)$$

gdzie:

- i – kolejne obserwacje w próbie,
- y_{sr} – średnia obserwowana wartość zmiennej objaśnianej.

Przyjęto, że miarą obserwowanej zmienności metanoności, nie wyjaśnionej przez model liniowy jest suma kwadratów odchyłeń poszczególnych wyników od modelu, czyli suma kwadratów reszt. Na jej podstawie obliczono odchylenie standardowe składnika resztowego, które informuje o przeciętnym odchyleniu zmierzonych wartości metanoności od wartości teoretycznych otrzymanych z funkcji regresji [Sobczyk, 2000]:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k}} \quad (14)$$

gdzie:

- $y_i - \hat{y}_i$ – reszty modelu,
- n – liczba obserwacji,
- k – liczba szacowanych parametrów.

W miarę wzrostu liczbowej wartości odchylenia standardowego składnika resztowego statystyczna dobroć dopasowania funkcji regresji do danych pomiarowych maleje.

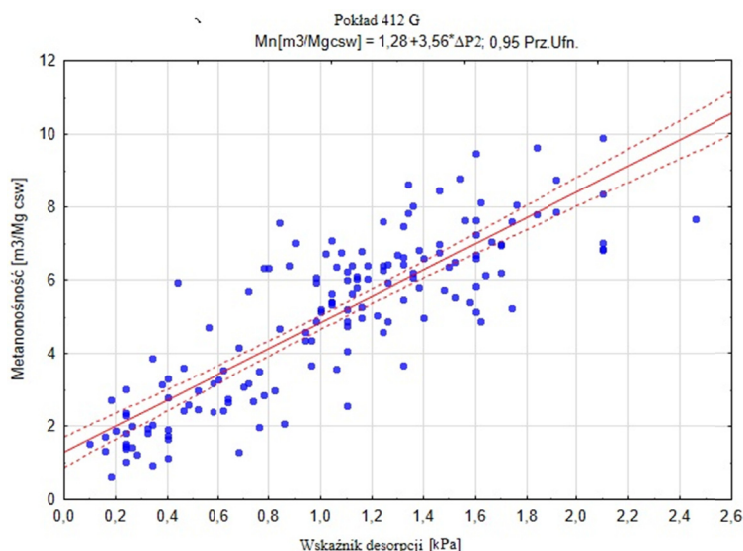
W celu określenia jaki procent średniej wartości metanoności stanowi odchylenie standardowe składnika resztowego, obliczono współczynnik zmienności losowej:

$$W_e = \frac{S_e}{y_{sr}} \quad (15)$$

W miarę zmniejszania wartości współczynnika zmienności losowej otrzymamy większą zgodność modelu z danymi pomiarowymi.

4.3. Zestawianie otrzymanych wyników

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres rozrzutu, sporządzony na podstawie pomiarów przeprowadzonych w pokładzie 412 należącym do partii G. Na wykresie zamieszczono linię trendu, równanie regresji z wartościami obliczonych współczynników a i b oraz przedziały ufności $1 - \alpha$.



Rys. 4. Zależność liniowa pomiędzy wskaźnika intensywności desorpcji dp i odpowiadającymi im wartościami metanonośności Mn dla pokładu 412 w partii G

W tabeli 2 zestawiono wyniki badań regresji liniowej pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonośnością. Obliczone zależności wynikają ze statystyki, niepewności oceny dp w warunkach dołowych i niepewności oznaczenia Mn .

Współczynnik a , charakteryzujący węgiel pod względem intensywności uwalniania metanu z poszczególnych pokładów, zawierał się w zakresie od $2,82 \text{ m}^3/(\text{Mg} \cdot \text{kPa})$ do $5,75 \text{ m}^3/(\text{Mg} \cdot \text{kPa})$, przy wartości średniej wynoszącej dla badanych pokładów $3,98 \text{ m}^3/(\text{Mg} \cdot \text{kPa})$. W przypadku 4 pokładów na 23 wartości współczynników a , reprezentujących nachylenie prostej o równaniu $Mn = a \cdot dp + b$ były większe od wartości zawartej w normie, równej $4,5427 \text{ m}^3/(\text{Mg}_{\text{csww}} \cdot \text{kPa})$ (PN-G-44200:2013-10). Współczynnik a dla pozostałych 19 pokładów był mniejszy od wartości „normatywnej”. Na rysunku 5 przedstawiono zmienność współczynnika a modelu liniowego dla poszczególnych pokładów kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka.

Zgodnie z rysunkiem 5, relacja pomiędzy wskaźnikiem desorpcji dp oraz metanonośnością Mn nie jest stała dla wszystkich pokładów kopalni, lecz ulega zmianom w zależności od nasycenia pokładów metanem i ich właściwości kinetycznych.

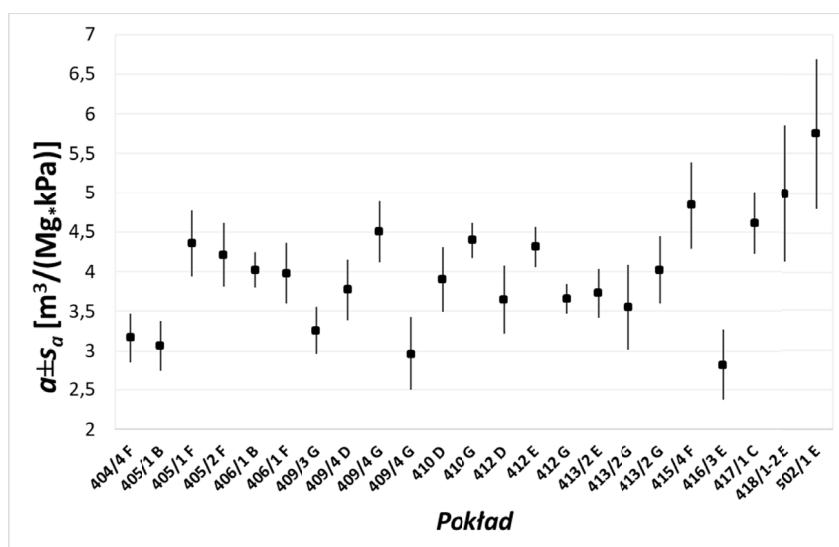
W przypadku współczynnika b , którego określa wartość pojemności sorpcyjnej węgla pod ciśnieniem barycznym (a_{1bar}), dla 6 pokładów na 23 przyjmował on wartość mniejszą od przyjętej przez normę wartości $0,8927 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{csww}}$. Dla przeważającej większości badanych pokładów wartość współczynnika b była większa od wartości „normatywnej”.

5. Podsumowanie i wnioski

Badania opisane w artykule pokazują, że model liniowy relacji $Mn(dp)$ dla większości pokładów kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka jest istotny statystycznie i wyjaśnia zmienność metanonośności w tych pokładach. Metoda regresji liniowej pozwala na wyznaczenie równania opisującego zależność pomiędzy wskaźnikiem desorpcji i metanonośnością pokładu w celu oznaczania metanonośności przybliżonej. Zmienność wartości współczynnika a wskazuje na korzyści określania metanonośności przy-

Tab. 2. Wyniki analizy regresji dla modelu liniowego zależności $Mn(dp)$ w pokładach kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka

Pokład	n_{par}	a	b	s_a	s_b	R^2	s_r^2	S_e	W_e
404/4 F	132	3,167	1,55	0,305	0,222	0,453	0,818	0,904	0,24
405/1 B	61	3,066	1,62	0,315	0,326	0,616	1,168	1,081	0,29
405/1 F	17	4,357	0,955	0,417	0,361	0,879	0,695	0,834	0,2
405/2 F	70	4,211	1,437	0,403	0,358	0,617	1,446	1,203	0,25
406/1 B	73	4,022	1,046	0,225	0,244	0,819	1,047	1,023	0,22
406/1 F	115	3,977	1,405	0,38	0,338	0,492	1,34	1,158	0,24
409/3 G	54	3,261	1,212	0,297	0,326	0,699	1,313	1,146	0,26
409/4 D	32	3,77	1,005	0,378	0,35	0,768	0,792	0,89	0,22
409/4 G	19	4,504	0,286	0,385	0,373	0,889	0,715	0,846	0,21
409/4 G	21	2,961	1,095	0,466	0,457	0,68	1,172	1,083	0,3
410 D	102	3,905	1,518	0,406	0,376	0,48	1,772	1,331	0,27
410 G	148	4,394	1,121	0,227	0,187	0,719	1,161	1,078	0,25
412 D	76	3,648	2,044	0,425	0,461	0,499	1,8	1,342	0,23
412 E	103	4,312	0,767	0,252	0,147	0,744	0,873	0,935	0,34
412 G	154	3,655	1,211	0,186	0,213	0,718	1,404	1,185	0,24
413/2 E	53	3,729	1,128	0,307	0,211	0,743	0,904	0,951	0,3
413/2 G	36	3,549	1,234	0,535	0,37	0,564	1,816	1,348	0,42
413/2 G	34	4,023	0,872	0,427	0,38	0,735	0,647	0,805	0,19
415/4 F	11	4,841	0,364	0,55	0,296	0,896	0,491	0,701	0,32
416/3 E	37	2,822	2,154	0,451	0,344	0,529	0,681	0,826	0,2
417/1 C	97	4,614	0,758	0,391	0,173	0,594	0,637	0,798	0,31
418/1-2 E	35	4,994	0,525	0,856	0,316	0,508	0,418	0,647	0,29
502/1 C	nie analizowano								
502/1 E	75	5,749	0,936	0,942	0,268	0,338	1,069	1,034	0,43

**Rys. 5.** Zmienność zależności liniowej pomiędzy wartościami wskaźnika intensywności desorpcji dp i odpowiadającymi im wartościami metanoności Mn dla pokładów kopalni „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Zofiówka

bliżonej za pomocą modelu liniowego $Mn(dp)$, wyznaczanego indywidualnie dla poszczególnych pokładów kopalni (kalibracja metody desorbometrycznej).

W przypadku jednego z badanych pokładów (502/1 w partii C), mimo najliczniejszego zbioru wyników, wartość współczynnika korelacji r_{xy} świadczy o braku związku liniowego pomiędzy badanymi parametrami dp oraz Mn . W pokładzie tym model liniowy zawodzi i trudno określić, jak zmieni się – średnio biorąc – wartość zmiennej zależnej (parametr Mn) w zależności od wartości zmiennej niezależnej (parametr dp).

Praca została wykonana w roku 2016 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Borowski J., 1975: *Badanie gazonośności pokładów węglowych z zastosowaniem nowych metod*. Katowice Prace Głównego Instytutu Górnictwa, komunikat nr 645.
- Charrière D., Pokryszka Z., Behra P., 2010: *Effect of pressure and temperature on diffusion of CO₂ and CH₄ into coal from the Lorraine basin (France)*. International Journal of Coal Geology 81, Pages 373-80.
- Korzec M., 2013: *Opracowanie metody oznaczania metanonośności w pokładach węgla kamiennego*. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- Lama R.D., Bodziony J., 1996: *Outbursts of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines*. Australia R.D. Lama & Associates, Wollongong.
- Makać W., Urbanek-Krzysztofiak D., 2008: *Metody opisu statystycznego*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- PN-G-44200:2013-10: *Górnictwo – Oznaczanie metanonośności w pokładach węgla kamiennego –Metoda zwiercinowa*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Skoczylas N., Topolnicki J., 2016: *The coal-gas system – the effective diffusion coefficient*. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology 12 (4) Pages 412-424.
- Stączek A., 2002: *Nowe przyrządy do określania parametrów gazowych przy prognozowaniu zagrożenia metanowego i wyrzutami metanu i skał*. Modernizacja i automatyzacja górnictwa nr 1 (373), s. 13-27.
- Stączek A., Simka A., 2004: *Graniczny wskaźnik intensywności desorpcji gazu z węgla charakteryzujący stan zagrożenia metanowego oraz wyrzutami metanu i skał*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Górnictwo i Środowisko nr 3, s.123-142.
- Szłazak N., Borowski M., Korzec M., Obracaj D., Swolkień J., 2011: *Sposób określania metanonośności w pokładach węgla kamiennego*. Górnictwo i Geoinżynieria R. 35 z. 4, s. 101-117.
- Tarnowski J., 1992: *Stosowane w kraju metody oznaczeń gazonośności złożowej*. Przegląd Górniczy nr 9, s. 17-26.
- Wierzbicki M., 2011: *Effect of selected simplifications of the unipore model upon the result of the study of the diffusion coefficient*. Archives of Mining Sciences 56 (4), Pages 761-776.
- Wierzbicki M., 2013: *Changes in the sorption/diffusion kinetics of a coal-methane system caused by different temperatures and pressures*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi 29 (4) Pages 155-168.
- Żebrowska-Lucyk S., 2014: *Metody statystyczne w praktyce laboratoryjnej*. Wydawnictwo Klub Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB, Warszawa.

Relationship between the desorption intensity index and the methane content for coal seams of the Borynia-Zofiówka-Jastrzębie mine, Zofiówka Section – approximate methane content of coal

Abstract

Statistical studies for 24 coal seams of the Borynia-Zofiówka-Jastrzębie mine, Zofiówka Section have been carried out. Studies consisted of statistical analysis of the relationship between *in situ* measured values of the desorption intensity index dp and the methane content Mn . Data sets included the results of measurements of these parameters in the years 2007-2014 in the Zofiówka mining area. According to the desorbometric method, the relationship between values of desorption intensity index and approximate methane content of coal averages the linear function, which applies to all Polish hard coal mines. The Pearson correlation coefficients, the correlation strength and its significance were determined within particular coal seams of Zofiówka mining area. Using the linear regression method, individual equations describing the $Mn(dp)$ dependence for different coal seams were determined. According to the analysis, it is noted that the relationship between the desorption intensity index and the methane content is not constant, but varies for different coal seams. The obtained results suggest that the variability of the $Mn(dp)$ relationship may be due to changes in the sorption properties of coal seams with different geological ages. This issue will be the subject of further work.

Keywords: methane content, approximate methane content, desorption intensity index, correlation, regression, statistical model