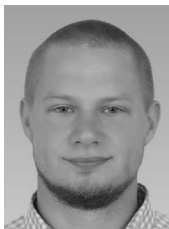


Wpływ zawartości części lotnych na właściwości sorpcyjne węgla kamiennych w kontekście zagrożenia wyrzutami gazów i skał

Marcin Dreger¹



The influence of volatile content on hard coal sorption properties and on the probability of gas and rock outbursts. Prz. Geol., 72: 46–52; doi: 10.7306/2024.3

A b s t r a c t. The classification of gas and rock outburst hazard based on the volatile content of coal is assessed. The complexity of gas and geodynamic hazards, and of the geological and mining conditions of the Upper Silesian Coal Basin, make it difficult to effectively assess the gas and rock outburst. Safe mining operations in coal seams prone to outbursts should be based on specified analyses of gas, geological and mining conditions, and consider the coal characteristics, including the volatile content and sorption properties. An original method for determining the adsorption isotherm is described: it allows for more precise determination of methane pressure, and of the possibility of gas accumulation at higher pressures. A coal classification is developed based on the volatile content

(V^{daf}) in relation to the possibility of a gas-geodynamic phenomenon.

Keywords: volatile content (V^{daf}), gas and rock outburst, sorption capacity, diffusivity, sorption isotherm

Zagrożenie wyrzutami gazów i skał jest jednym z najmłodszych, rozpoznanych naturalnych zagrożeń górniczych nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Zagrożenie to występuje w kopalniach węgla kamiennego, w górnictwie rudnym oraz solnym (Baryakh i in., 2003; Dreger, Celary, 2023). Jedną z przyczyn nagłego wyrzutu gazów i rozkruszonej skały do środowiska drażonego wyrobiska jest występowanie w górotworze mieszaniny gazów pod wysokim ciśnieniem – głównie metanu, azotu i dwutlenku węgla (np. Lama, Bodziony, 1998; Wierzbicki, Młynarczuk, 2006). Duże zaawansowanie tektoniczne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), migracja metanu między pokładami oraz mała zwięzłość węgla w strefach przyuskokowych zwiększają częstotliwość i siłę tego typu zjawisk gazogeodynamicznych. Nagłe przemieszczenie dużych ilości zmielonego, rozkruszonego węgla, skały płonnej oraz przede wszystkim metanu może zmienić atmosferę kopalnianą na wybuchową lub niezdadną do oddychania (Wierzbicki, 2013; Shi i in., 2017; Kędzior, Dreger, 2022; Dreger, Celary, 2023). Duża dynamika zagrożenia wyrzutowego sprawia, że jest ono trudne do przewidzenia oraz niemożliwe do zatrzymania. Współczesna profilaktyka górnicza, polegająca na strzelaniu wstrząsowo-urabiającym, nawadnianiu pokładu oraz częstych pomiarach wskaźników wyrzutowych powoduje, że zagrożenie to jest coraz lepiej rozpoznawane oraz w miarę możliwości kontrolowane.

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym większe zagrożenie wyrzutami gazów i skał jest w części południowej niż północnej, na skutek oddziaływania szerokiej, regionalnej strefy uskokowej Bzie–Czechowice (ryc. 1), którą tworzy kilka równoległych uskoków o przebiegu równoleżnikowym i kilkusetmetrowym zrzucie (Dutka, Wierzbicki, 2008; Kędzior, 2016). Strefy dysjunktywne przyczyniają się m.in. do migracji metanu między pokładami. Węgiel kamienny znajdujący się w strefie przyuskokowej ma mniejszą zwięzłość oraz mogą w nim postępować zmiany

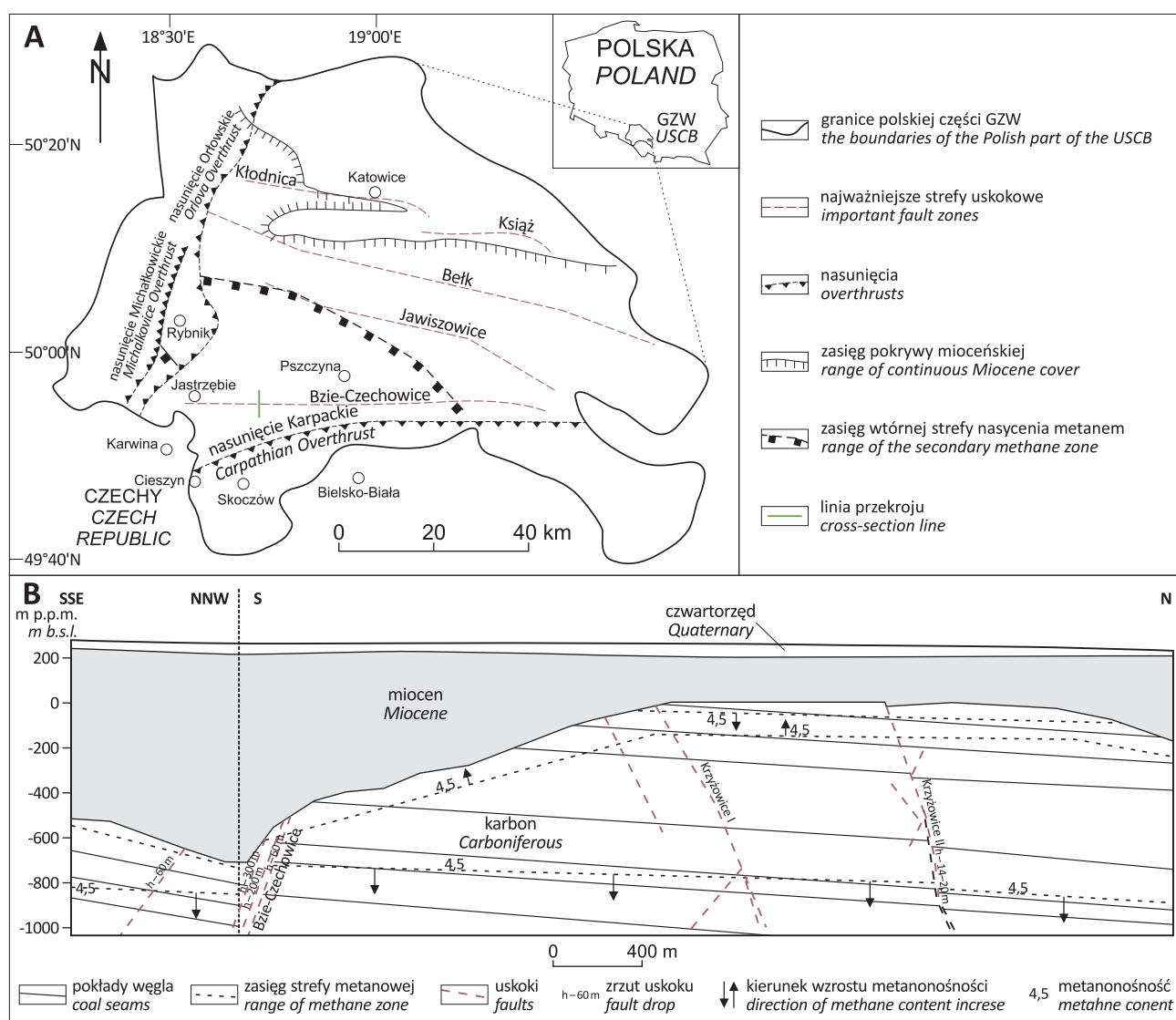
strukturalne, które wpływają na zwiększenie pojemności gazowej oraz dyfuzyjności, przyczyniając się do podwyższenia ryzyka wystąpienia zjawisk gazogeodynamicznych (Wierzbicki, Młynarczuk, 2006; Godyń, 2011; Młynarczuk, Godyń, 2012; Dreger, Celary, 2023). Większość dotychczasowych, nagłych wyrzutów gazów i skał do przestrzeni wyrobiska nastąpiła w obszarze aktywności uskoku Bzie–Czechowice (Wierzbicki, Młynarczuk, 2006; Dutka, Wierzbicki, 2008; Dutka, 2021).

Prognozowanie zagrożenia gazogeodynamicznego w dużej mierze polega na analizie i rozpoznaniu tektoniki, wskaźników wyrzutowych, właściwości sorpcyjnych oraz zawartości części lotnych w węglu. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych kryteria oceny stanu zagrożenia wyrzutami gazu i skał na podstawie właściwości sorpcyjnych i zawartości części lotnych w węglu są określane przez rzeczoznawcę. Ekspertyzy te dotyczą wyrobisk korytarzowych drażonych w częściach złoża nienaruszonych robotami eksploatacyjnymi, w pokładach węgla, które są objęte tym zagrożeniem (Rozporządzenie, 2016).

Według Wierzbickiego (2013) węgle skłonne do wyrzutów gazu i skał są zmienione strukturalnie i charakteryzują się dyfuzyjnością $1,50 \times 10^{-9}$ cm²/s. Zgodnie ze wspomnianym rozporządzeniem w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (2016) kryteria oceny stanu zagrożenia wyrzutowego są określane m.in. na podstawie zawartości części lotnych. Jednak zarówno w światowej literaturze, jak i polskiej brakuje publikacji dotyczących szczegółowych badań wpływu zawartości części lotnych na możliwości wyrzutowe węgla kamiennych oraz wytycznych w sprawie ich klasyfikacji.

Celem szczegółowych badań przeprowadzonych w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym Sp. z o.o.

¹ Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze Sp. z o.o., ul. Rybnicka 6, 44–335 Jastrzębie–Zdrój; mdreger@clpb.pl; ORCID ID: 0000-0002-7250-2523



Ryc. 1. Mapa Górnosląskiego Zagłębia Węglowego wraz z przekrojem przez strefę uskoku Bzie–Czechowice (wg Kędziora, 2012; Dregera, Kędziora, 2021 – zmodyfikowano)

Fig. 1. Map of the Upper Silesia Coal Basin map with a cross-section of the Bzie–Czechowice fault zone (after Kędzior, 2012, Dreger; Kędzior, 2021 – modified)

(CLP-B), które zatrudnia rzeczoznawców ds. ruchu zakładu górniczego, było zbadanie wpływu zawartości części lotnych na możliwości sorpcyjne węgla oraz ich podatność na nagłe rozprężenie skutkujące wyrzutem gazów i skał.

METODYKA

Zawartość części lotnych w węglu (V^{daf} – volatile matter, dry ash free substance) jest to procentowy udział w nim wodoru, tlenu i dwutlenku węgla, metanu oraz wyższych węglowodorów. Stężenie tych gazów w węglu maleje wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia (Speight, 2012). Części lotne stanowią część bezwodnej, bezpopiołowej masy węgla (Gabzdyl, 1987; Jelonek i in., 2018). Ze względu na dużą różnorodność węgla kamiennego wydobywanego w polskich kopalniach, zarówno pod względem chemicznym, jak i cech fizycznych, wyróżnia się kilka jego typów (tab. 1), o różnej zawartości części lotnych (PN-G-97002:2018-11).

Właściwości sorpcyjne węgla kamiennych oznaczono za pomocą mikrogravimetrycznych analizatorów sorpcji gazów

IGA 001 oraz Xemis 001, w temperaturze i pod ciśnieniem odpowiadającym warunkom dołowym. Wysoka temperatura skutecznie ogranicza ilość gazu zaadsorbowanego w strukturze porowej węgla oraz znacząco zwiększa jego dyfuzyjność, dlatego wszystkie wyniki odniesiono do wartości 35°C. Wraz ze wzrostem temperatury o 1°C zdolności sorpcyjne węgla maleją o 0,05 m³/Mg, natomiast dyfuzyjność wzrasta o 0,2 × 10⁻¹⁰ cm²/s (Wierzbicki, 2013; Dreger, Kędzior, 2022).

Pojemność sorpcyjną (a) zdefiniowano jako ilość metanu w strukturze węgla (w cm³/g), zaadsorbowaną w określonych warunkach ciśnienia i temperatury. Drugim parametrem oznaczonym w trakcie badań jest efektywny współczynnik dyfuzji (De), definiujący ruch cząsteczek gazu między ziarnami węgla (wyrażony w cm²/s). Dyfuzyjność węgla określa dynamikę emisji metanu w trakcie urabiania kalizny – im większa dyfuzyjność, tym większa dynamika.

Właściwości sorpcyjne węgla są uzależnione od oddziaływającego na nie ciśnienia – możliwości akumulacji gazu zwiększają się wraz ze wzrostem ciśnienia. W celu obli-

Tab. 1. Klasyfikacja węgla kamiennych z uwzględnieniem zawartości części lotnych (PN-G-97002:2018-11)
Table 1. Classification of hard coal taking into account the volatile content (PN-G-97002:2018-11)

Nazwa węgla <i>Name of coal</i>	Typ węgla <i>Type of coal</i>	Zawartość części lotnych <i>Volatile content</i>	Rodzaj i grupa węgla <i>Content of coal type and group of coal</i>
Płomienny / <i>Flaming</i>	31	> 27%	Energetyczne / <i>Energy</i>
Gazowo-Płomienny / <i>Gas-Flaming</i>	32		
Gazowy / <i>Gas</i>	33		
Gazowo-Koksowy / <i>Gas-Coke</i>	34	> 27%	Koksowe / <i>Coke</i>
Ortokoksowy / <i>Orthoxoke</i>	35	20–30%	
Metakoksowy / <i>Methacoke</i>	36	< 22%	
Semikoksowy / <i>Semicox</i>	37	14–22%	
Chudy / <i>Skinny</i>	38	14–28%	Specjalne / <i>Special</i>
Antracytowy / <i>Anthracite</i>	41	10–14%	
Antracyt / <i>Anthracite</i>	42	≤ 3%	Antracyty / <i>Anthracites</i>
Metaantracyt / <i>Metaanthracite</i>	43		

czenia pojemności sorpcyjnej w warunkach zdefiniowanego ciśnienia korzysta się z równań izotermy. Do badania właściwości sorpcyjnych gazów przez ciała stałe, np. metanu przez węgiel, powszechnie są wykorzystywane równania izotermy adsorpcji Langmuira [1] oraz Freundlicha [2].

$$a = a_m \frac{bp}{1 + bp} \quad [1]$$

$$a = a_m (bp)^m \quad [2]$$

gdzie:

a – pojemność sorpcyjna [cm^3/g , m^3/Mg];
 a_m – maksymalna pojemność sorpcyjna odpowiadająca zapełnieniu monowarstwy [cm^3/g , m^3/Mg];
 b – stała równowagi;
 p – ciśnienie [bar];
 m – parametr określający niejednorodność układu adsorpcyjnego ($m > 0$; dla izoterm $m = 1$).

W średnim zakresie ciśnień (5–10 barów) izoterma sorpcji wykreślona zgodnie z równaniem Langmuira nie zawsze pokrywa się z punktami sorpcyjnymi wyznaczonymi na podstawie badań z zastosowaniem mikrogravimetrycznych analizatorów sorpcji gazów (np. IGA 001 oraz Xemis 001). Jest to o tyle istotne, że nieprecyzyjny przebieg krzywej izotermy sorpcji może się przyczynić do błędów w wyznaczaniu ciśnienia złożowego (błąd ten nie powinien być większy niż 0,5 bara).

Autor artykułu, prowadząc badania w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym Sp. z o.o., opracował nowy wzór izotermy adsorpcji [3], bazujący na równaniu Freundlicha, które zostało jednak mocno zmodyfikowane.

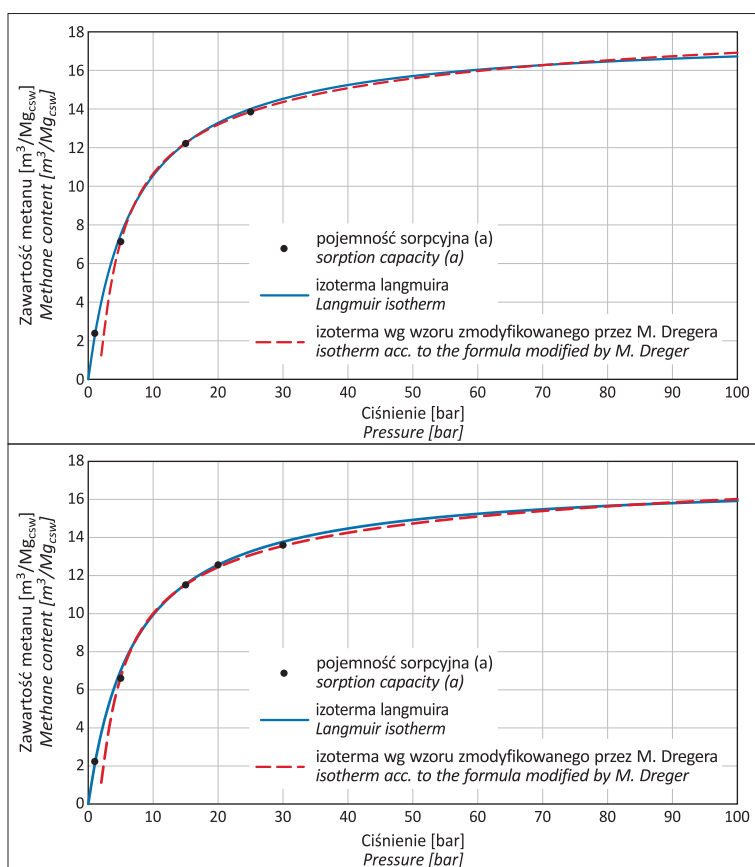
$$a = a_m \left(\frac{(bp)^{\frac{1,1}{\ln(p)}}}{2} \right)^m \quad [3]$$

W badaniach wykorzystano 630 wyników oznaczenia pojemności sorpcyjnej (a_i) i dyfuzyjności węgla (De) w warunkach ciśnienia złożowego (~1 bar) oraz 175 oznaczeń maksymalnej pojemności gazowej odpowiadającej zapełnieniu monowarstwy (a_m – monowarstwa jest to nierozpuszczalna, jednocząsteczkowa czyli monomolekularna warstwa substancji filimotwórczej, o grubości odpowiadającej średnicy jednej cząsteczki lub atomu). Zgodnie z PN-G-04560:1998 wyznaczono procentową zawartość części lotnych w każdej próbce.

WYNIKI BADAŃ ORAZ DYSKUSJA

Przebieg krzywej sorpcji uzyskanej po podstawieniu danych do zmodyfikowanego wzoru [3] w zakresie średnich i wysokich ciśnień dobrze pokrywa się z wartościami pojemności sorpcyjnej węgla pomierzonymi za pomocą mikrogravimetrycznych analizatorów sorpcji gazów (ryc. 2), co świadczy o dokładnym odzwierciedleniu warunków gazowych w węglu, na który oddziałuje określone ciśnienie i pozwala precyzyjnie określić m.in. ciśnienie złożowe metanu, możliwości akumulacji gazu pod wpływem wyższego ciśnienia oraz zapełnienie sorpcyjne badanych węgla. Dokładniejsze dopasowanie krzywej sorpcji gazów zostało osiągnięte m.in. dzięki potęgowaniu wartości ciśnienia i stałej równowagi wraz z zastosowaniem wartości odpowiadającej niejednorodności układu adsorpcyjnego. Jednak wzór zaproponowany przez autora [3], ze względu na zastosowany logarytm naturalny w mianowniku ułamka wykładnika potęgi jest niedoskonały, ponieważ nie odzwierciedla rzeczywistości, gdy ciśnienie jest niskie (≤ 4 barów).

Wyniki badań wykazały, iż maksymalna możliwa akumulacja metanu w strukturze węgla (a_m) jest niezależna od pierwotnej temperatury górotworu, co jest związane z działaniem wysokiego ciśnienia, które odgrywa kluczową rolę w rozpoznaniu całkowitego zapełnienia sorpcyjnego. Zawartość części lotnych w badanych węglach



Ryc. 2. Przykładowe wyliczenia maksymalnej pojemności sorpcyjnej z zastosowaniem równania Langmuira oraz wzoru zmodyfikowanego przez autora artykułu

Fig. 2. Examples of calculations of the maximum sorption capacity using the Langmuir equation and a formula as modified by me

mieściła się w przedziale 18–36% – umożliwiło to ocenę stanu zagrożenia wyrzutami gazów i skał.

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym nie zaobserwowano dotychczas ścisłej zależności pomiędzy stopniem uwęglenia, zawartością części lotnych w węglu (V^{daf}), a ilością metanu zakumulowanego współcześnie w jego pokładach (Kędzior, 2016). Jednak z badań przeprowadzonych w CLP-B Sp. z o.o. wynika, iż najwięcej gazu sorbuje węgle, które zawierają 20–25% części lotnych (ryc. 3A). Pojemność sorpcyjna (a_1) w przeliczeniu na 35°C mieściła się w większości w przedziale 2,0–3,5 m³/Mg. Możliwości sorpcyjne węgli o większej zawartości części lotnych (>25% V^{daf}), a więc mniej przeobrażonych (mniej uwęglonych), są mniejsze. Podobnym zmianom podlegają wartości efektywnego współczynnika dyfuzji – największą mobilnością cząsteczek gazu charakteryzują się węgle zawierające 20–25% V^{daf} (ryc. 3B). Wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych w węglu możliwości akumulacji w nim metanu oraz jego dyfuzyjność maleją.

Zmiany zdolności sorpcyjnych mogą być związane z drugim skokiem uwęglenia, podczas którego wzrasta procentowa zawartość węgla pierwiastkowego (C^{daf}), a zmniejszają się jego gęstość (ryc. 4), porowatość oraz wilgotność. Ponadto węgiel traci w wyniku tej przemiany ponad 10% części lotnych i nabiera właściwości termoplastycznych (Kruszewska, Dybova-Jahowicz, 1997; Kędzior, 2016; Zhou i in., 2018, 2023). Drugi skok uwęglenia jest związany z przejściem węgla energetycznych w węgle koksujące, zawierające 20–33% części lotnych (Kruszewska, Dybova-Jahowicz, 1997). Gdy zawartość części lotnych jest mniejsza niż 14%, przekształca się on w węgiel antracytowy i antracyty, co objawia się zwiększeniem jego

mikroporowatości oraz wilgotności (Zhou i in., 2018, 2023).

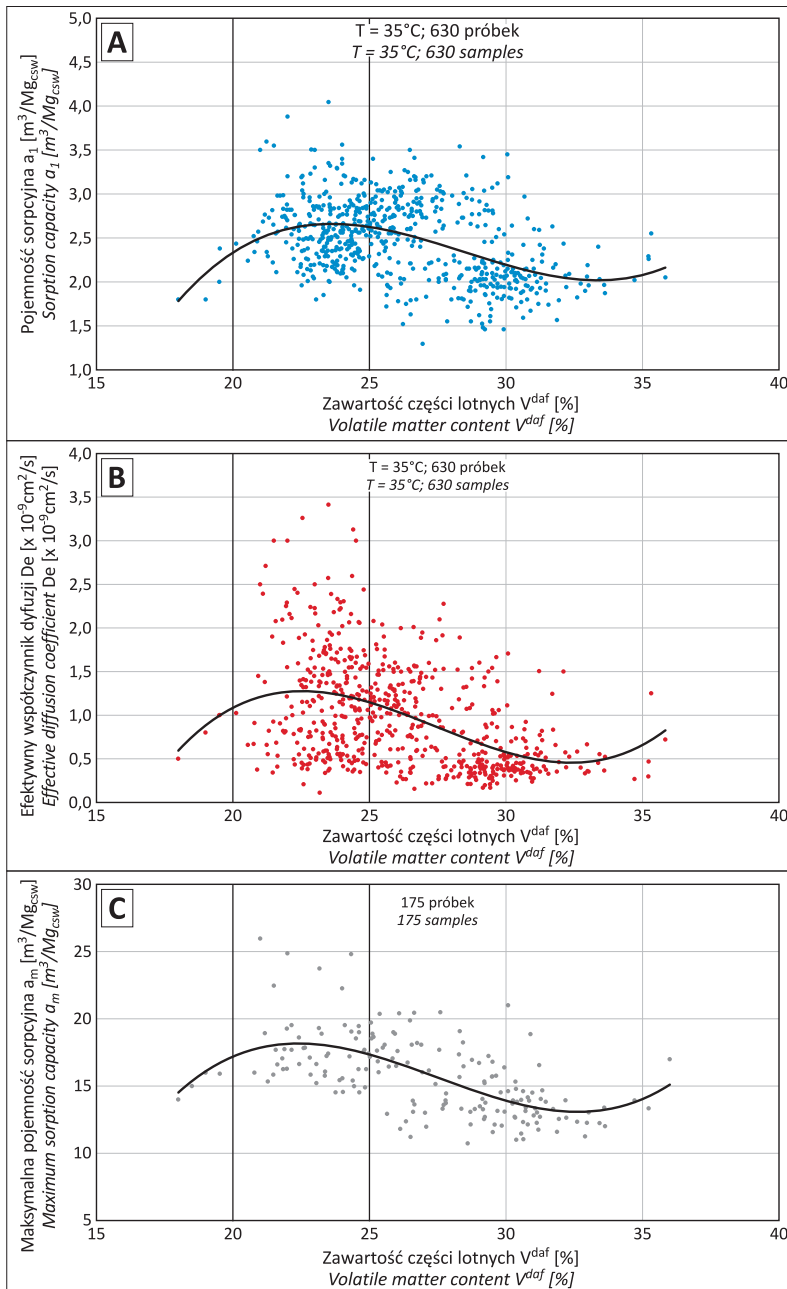
Węgle koksujące o V^{daf} w przedziale 14–20% charakteryzują się mniejszą pojemnością gazową oraz dyfuzyjnością (ryc. 3A, B), co może być związane z panowaniem warunków okna roponego (R_o 0,7–1,3%) i obecnością ropy naftowej w mikroporach węgla, która ogranicza możliwości sorpcyjne węgla (Levine, 1993; Dutka, 2021). Według Dutki (2021) na wyższym stopniu uwęglenia materii organicznej ($R_o > 1,65\%$) ropa naftowa ulega rozkładowi, co objawia się większą powierzchnią właściwą mikroporów w węglu, zdolną do akumulacji większej ilości metanu. Założenie to

nie zostało potwierdzone w trakcie badań prowadzonych przez autora artykułu ze względu na brak odpowiedniego materiału badawczego – czyli próbek węgla o $R_o > 1,65\%$.

Podobnie kształtuje się zależność maksymalnej pojemności sorpcyjnej węgla (a_m) od zawartości części lotnych – najwięcej gazu są w stanie zaadsorbować węgle zawierające 20–25% części lotnych (ryc. 3C). W węglach słabiej uwęglonych ($V^{daf} > 25\%$) wraz ze wzrostem zawartości części lotnych obserwuje się zmniejszenie ilości metanu zaadsorbowanego w strukturze porowej. Natomiast węgle o małej zawartości części lotnych ($V^{daf} < 20\%$) wykazują mniejsze możliwości adsorpcyjne (ryc. 3C), co może być związane z procesami transformacyjnymi węgla koksujących w węgle antracytowe i antracyty ($V^{daf} < 14\%$; Levine, 1993; Laxminarayana, Crosdale, 1999; Wang i in., 2019). Stopień uwęglenia zwiększa się wraz z głębokością zalegania pokładów węgla, o czym świadczy zmniejszająca się w nim średnia zawartość części lotnych (zgodność z regułą Hilta, Kędzior, 2016).

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że węgle zawierające 20–25% części lotnych charakteryzują się zdolnością do akumulacji największej ilości metanu. Takie węgle odznaczają się też największą dyfuzyjnością, co może skutkować bardziej intensywną desorpcją gazu z słabo związanych węgli w trakcie ich urabiania. Zwiększa to ryzyko wystąpienia zdarzenia gazogeochemicznego. Duże możliwości sorpcyjne węgla mogą też spowodować wysokie ciśnienie złożowe.

Właściwości sorpcyjne węgla kamiennych zależą od warunków ciśnienia – wraz ze wzrostem ciśnienia zwiększa się możliwość akumulacji gazu w węglu (Wierzbicki, 2013; Zhou i in., 2018; Kędzior, Dreger, 2022).



Ryc. 3. Właściwości sorpcyjne węgla kamiennego oraz kinetyka adsorpcji metanu w zależności od zawartości w nim części lotnych: **A** – pojemność sorpcyjna (a_i) pod ciśnieniem 1 bara; **B** – efektywny współczynnik dyfuzji (De); **C** – maksymalna pojemność sorpcyjna (a_m)

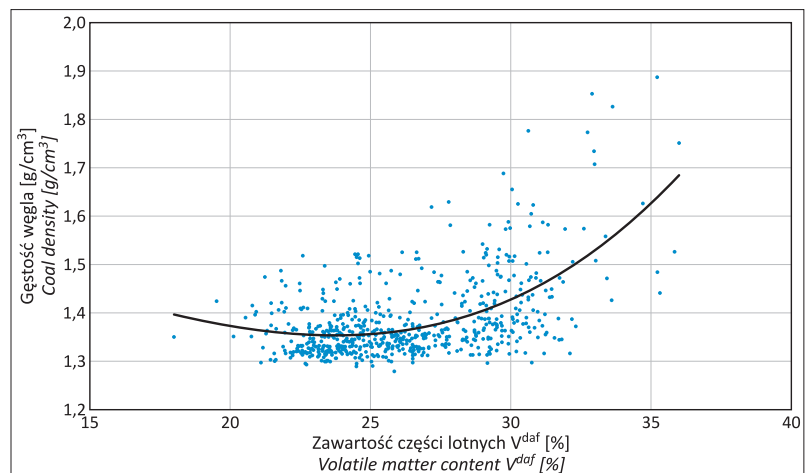
Fig. 3. Sorption properties and kinetics of methane adsorption depending on the volatile content of coal: **A** – sorption properties (a_i) for 1 bar; **B** – effective diffusion coefficient (De); **C** – maximum sorption capacity (a_m)

niekorzystne z punktu widzenia zagrożenia wyrzutami gazów i skał.

W trakcie badań zaobserwowano brak zależności między ciśnieniem złożowym, a zawartością części lotnych w węglu (ryc. 5). Wraz ze zmniejszeniem stopnia uwęglenia zaznaczyła się tendencja do niewielkiego podwyższenia ciśnienia złożowego, jednak, w ocenie autora, jest ono mało znaczące i pomijalne. Najistotniejszy wpływ na wielkość ciśnienia złożowego mają możliwości sorpcyjne węgla, metanonośność oraz tektonika i litologia, w tym obecność nieprzepuszczalnych utworów ilastych (np. Tarnowski, 1971; Dreger, Kędzior, 2021).

Biorąc pod uwagę wyniki zależności pojemności gazowej (a_i), maksymalnej pojemności sorpcyjnej (a_m) oraz dyfuzyjności węgla (De) od zawartości części lotnych, proponuje się wprowadzenie klasyfikacji możliwości wyrzutowych węgla kamiennych w zależności od zawartości części lotnych (tab. 2). Warto jednak podkreślić, że

W rozpoznaniu zagrożenia wyrzutami gazów i skał niezwykle istotna jest ocena ciśnienia złożowego oraz metanonośności pokładu węgla, którą wyznacza się na podstawie adsorpcji gazu przez węgiel (ryc. 2). W trakcie urabiania kalizny węglowej kombajnem lub materiałami wybuchowymi ciśnienie złożowe ulega zmianie pod wpływem odgazowania i odprężenia górotworu. Na skutek redukcji ciśnienia w górotworze w trakcie postępu drążenia pojemność gazowa węgla maleje, co powoduje uwalnianie zaadsorbowanego gazu (desorpcję) i jego migrację do środowiska drażnionego wyrobiska. Duża metanonośność pokładu w połączeniu ze stosunkowo małymi możliwościami sorpcyjnymi węgla skutkuje wysokim ciśnieniem złożowym (7–10 bar), co jest wysoce



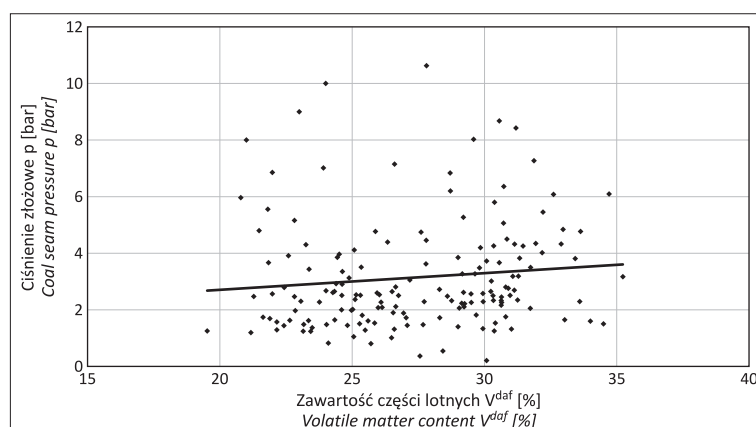
Ryc. 4. Zależność gęstości węgla kamiennego od zawartości części lotnych

Fig. 4. Dependence of coal density on volatile content

Tab. 2. Zależność podatności węgla kamiennych na wyrzuty gazów i skał od zawartości części lotnych
Table 2. Dependence of the susceptibility of hard coal to gas and rock outbursts on the content of volatile matter

Zawartość części lotnych V^{daf} Volatile matter content V^{daf}	Ocena możliwości sorpcyjnych węgla kamiennych w kontekście zagrożenia wyrzutami gazów i skał * The sorption possibilities in relation to the outburst phenomenon occurrence probability*
14–20%	Węgle mocno uwęglone, charakteryzujące się ograniczonymi możliwościami sorpcyjnymi oraz małą dyfuzywnością, co powinno ograniczać prawdopodobieństwo wyrzutu gazów i skał. Heavily carbonized coals, characterized by limited sorption capacity and low diffusivity, which should limit the probability of gas and rock outbursts.
20–25%	Węgle sorbujące największe ilości metanu oraz charakteryzujące się dużą dyfuzywnością, co może skutkować wysokim ciśnieniem złożowym oraz intensywną desorpcją gazu podczas urabiania węgla – podwyższona skłonność do zaistnienia wyrzutu gazów i skał. Coals absorbing the largest amounts of methane and characterized by high diffusivity, which may result in high reservoir pressure and intensive gas desorption during coal mining – increased tendency to gas and rock outbursts.
> 25%	Węgle najslabiej uwęglone, charakteryzujące się mniejszymi możliwościami akumulacji metanu oraz mniejszą dyfuzywnością, co powinno ograniczać prawdopodobieństwo wyrzutu gazów i skał. The least carbonized coals, characterized by lower possibilities of methane accumulation and lower diffusivity, which should reduce the probability of gas and rock outbursts.

*Pełną ocenę skłonności wyrzutowych węgla kamiennych należy uzupełnić o metanonośność, desorpcję, zwięzłość, tektonikę, warunki geologiczno-górnice oraz właściwości sorpcyjne. / A full assessment of the rock and outburst occurrence probability should be supplemented with methane content capacity, gas desorption, coal firmness, tectonics, geological and mining conditions, and sorption properties.



Ryc. 5. Zależność zawartości części lotnych w węglu od ciśnienia złożowego
Fig. 5. Dependence of coal seam pressure on the volatile matter content

prognozując zjawiska wyrzutowe należy uwzględnić wartości wskaźników wyrzutowych oraz analizę warunków geologiczno-górnicych (np. Dreger, Celary, 2023).

Większą skłonność do wyrzutów gazów i skał mają węgle zawierające 20–25% części lotnych. Węgle te sorbują największe ilości gazu oraz charakteryzują się wysoką dyfuzywnością, co może skutkować wysokim ciśnieniem złożowym oraz intensywną desorpcją gazu podczas robót górniczych w złożu.

Zgodnie z przebiegiem izotermy sorpcji najwięcej metanu akumuluje się w węglu poddanym ciśnieniu 0–30 barów (do 75–80%). Na skutek oddziaływania większego ciśnienia możliwości sorpcyjne węgla kamiennego maleją do ok. 0,1–0,4 m³/Mg/1 bar, osiągając pełne zapełnienie monowarstwy (a_m), gdy ciśnienie przekracza 100 barów (ryc. 4). Im większe są możliwości sorpcyjne węgla, tym więcej gazu może akumulować jego pokład, co jest korzystne z punktu widzenia surowcowego (zasoby metanu pokładów węgla: MPW – CBM), ale mniej korzystne ze względu na desorpcję znacznych ilości metanu do środowiska drążonego chodnika bądź eksploatowanej ściany na skutek odprężenia i odgazowania górotworu.

PODSUMOWANIE

Wyrzuty gazów i skał są jednym z największych zagrożeń naturalnych w górnictwie, toteż należy nieustannie doskonalić metody rozpoznawania, prognozowania oraz zwalczania tego zagrożenia. Szczególnie nasila się ono w południowej części GZW, na skutek oddziaływania regionalnej strefy uskoku Bzie–Czechowice oraz nasunięcia Karpat od południa.

W wyniku badań przeprowadzonych w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym Sp. z o.o. stwierdzono, że do oceny stanu zagrożenia wyrzutami gazów i skał można wykorzystywać m.in. informacje o zawartości części lotnych w węglu i zaproponowano nowy wzór do wyznaczania izotermy adsorpcji, za pomocą którego można precyzyjniej określić ciśnienie

złożowe metanu, możliwości akumulacji gazu w węglach oraz ich zapełnienie sorpcyjne.

Po rozpoznaniu zależności pojemności gazowej węgla (a_T), ich maksymalnej pojemności sorpcyjnej (a_m) oraz dyfuzywności (De) od zawartości części lotnych (V^{daf}), zaproponowano przyjęcie następujących kryteriów oceny możliwości wyrzutowych węgla kamiennych w zależności od zawartości części lotnych (V^{daf}):

- 14–20% – małe prawdopodobieństwo wyrzutu gazów i skał;
- 20–25 % – podwyższona skłonność do zaistnienia wyrzutu gazów i skał;
- >25% – małe prawdopodobieństwo wyrzutu gazów i skał.

Jednak w końcowej ocenie bądź prognozie zagrożenia wyrzutami gazów i skał oprócz zawartości części lotnych należy uwzględnić wyniki analizy warunków geologiczno-górnicych, wartości wskaźników wyrzutowych oraz właściwości sorpcyjne węgla.

Autor pragnie podziękować Pracownikom CLP-B Sp. z o.o. oraz Recenzentom za konstruktywne uwagi merytoryczne.

LITERATURA

- BARYAKH A.A., ANDREIKO S.S., FEDOSEEV A.K. 2003 – Gas-dynamic roof fall during the potash deposits development. *J. Mining Institute*, 246: 601–609.
- DREGER M., CELARY P. 2023 – The outburst probability index (Ww) as a new tool in the coal seam outburst hazard forecasting. *J. Sustainable Mining*, 23 (1): 55–60.
- DREGER M., KĘDZIOR S. 2021 – Methane emissions against the background of natural and mining conditions in the Budryk and Pniówek mines in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Environ. Earth Sci.*, 80: 746.
- DUTKA B. 2021 – Effect of depth on the sorption capacity of coals affected by outburst hazard. *Fuel*, 306, 2021: 121611.
- DUTKA B., WIERZBICKI M. 2008 – Wybrane własności węgla w rejonach zagrożonych wyrzutami metanu i skał. *Gór. Geoinż.*, 32 (1): 55–64.
- GABZDYŁ W. 1987 – The State of Petrographic Studies on Coals in Poland. *Polit. Śl.*, 35 (5): 265–267.
- GODYŃ K. 2011 – Struktury odmienione węgla kamiennego w strefach zaburzeń tektonicznych – propozycja klasyfikacji. *Pr. Inst. Mechaniki Górniczej PAN*, 13 (1–4): 11–29.
- JELONEK I., JELONEK Z., NOCOŃ Z. 2018 – Ocena jakości paliw na przykładzie węgla kamiennych i pelletów drzewnych. *Fuel Quality Assessment on the Example of Bituminous Coal and Wooden Pellets. Gór. Odkr.*, 3: 69–77.
- KĘDZIOR S. 2012 – A near-roof gas-bearing zone in Carboniferous rocks of the southern part of the Upper Silesian Coal Basin – occurrence, coal reservoir parameters and prospects for methane extraction. *Wyd. Uniw. Śl., Katowice*.
- KĘDZIOR S. 2016 – Próba obliczenia ilości metanu wytworzonego i zakumulowanego w kontekście zmienności stopnia przeobrażenia pokładów węgla w rejonie Bzie–Dębina (Górnośląskie Zagłębie Węglowe). *Gór. Odkr.*, 4: 46–53.
- KĘDZIOR S., DREGER M. 2022 – Geological and Mining Factors Controlling the Current Methane Conditions in the Rydułtowy Coal Mine (Upper Silesian Coal Basin, Poland). *Energies*, 15: 6364. <https://doi.org/10.3390/en15176364>
- KRUSZEWSKA K., DYBOVA-JACHOWICZ S. 1997 – Zarys petrologii węgla. *Wyd. Uniw. Śl., Katowice*.
- LAMA R.D., BODZIONY J. 1998 – Management of outburst in underground coal mines. *Int. J. Coal Geol.*, 35: 83–115.
- LAXMINARAYANA C., CROSDALE P.J. 1999 – Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals. *Int. J. Coal Geol.*, 40: 309–325.
- LEVINE J.R. 1993 – Coalification: The evolution of coal as source rock and reservoir. [W:] Law B.E., Rice D.D. (red.), *Hydrocarbons from Coal*. American Association of Petroleum Geologists. *Studies in Geology*; AAPG: Washington, DC, USA, 38: 39–77.
- MŁYNARCZUK M., GODYŃ K. 2012 – Wykorzystanie metod rozpoznawania obrazów do wspierania procesu decyzyjnego dotyczącego klasyfikacji węgla ze względu na wybrane cechy petrograficzne. *Pr. Inst. Mech. Górniczej PAN*, 14 (1–4): 3–14.
- PN-G-97002:2018-11 Węgiel kamienny – Klasyfikacja – Typy. Wersja polska 28-11-2018.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. *Dz.U.* 2017 poz. 1118.
- SHI X., DAZHAO S., QIAN Z. 2017 – Classification of coal seam outburst hazards and evaluation of the importance of influencing factors. *Open Geosci.*, 9: 295–301.
- SPEIGHT J.G. 2012 – *The Chemistry and Technology of Coal*. 3rd Edition. Boca Raton; <https://doi.org/10.1201/b12497>
- TARNOWSKI J. 1971 – Występowanie metanu w złożu południowej części Rybnickiego Okręgu Węglowego. *GIG, Katowice*.
- WANG K., ZHANG J., CAI B., YU S. 2019 – Emission factors of fugitive methane from underground coal mines in China: Estimation and uncertainty. *Appl. Energy*, 250: 272–282.
- WIERZBICKI M. 2013 – Changes in the sorption/diffusion kinetics of a coal-methane system caused by different temperatures and pressures. *Miner. Res. Manag.*, 29: 155–168.
- WIERZBICKI M., MŁYNARCZUK M. 2006 – Węgiel odmieniony strukturalnie w rejonie wyrzutu w chodniku transportowym D-6 w pokładzie 409/4 KWK „Zofiówka” – pomiary stereologiczne. *Pr. Inst. Mech. Górniczej PAN*, 8 (1–4): 171–176.
- WIERZBIŃSKI K. 2013 – Zagrożenie wyrzutami gazów i skał. [W:] Konoopko W. (red.), *Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego*, t. 2. *GIG, Katowice*.
- ZHOU S., LIU D.M., ZULEIMA T., KARPYN Z.T., CAI Y.D., YAO Y.B. 2018 – Effect of coalification jumps on petrophysical properties of various metamorphic coals from different coalfields in China. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 60: 63–76.
- ZHOU X., HOU H., LI H. 2023 – Influence of coalification on pore structure evolution in middle-ranked coals. *Front. Earth Sci.*, 11:1139852.

Praca wpłynęła do redakcji 15.09.2023 r.

Akceptowano do druku 27.12.2023 r.