



Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 98, s. 103–114

Ireneusz BAIC*, Wiesław BLASCHKE**, Tadeusz DZIOK***,
Andrzej STRUGAŁA****, Wojciech SOBKO*****

Badania podatności węgla energetycznych na zmniejszenie zawartości rtęci na etapie pre-combustion

Streszczenie: W Oddziale Zamiejscowym Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Katowicach oraz na Wydziale Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prowadzone są prace nad możliwościami ograniczania zawartości rtęci w produktach handlowych węgla kamiennego poprzez wzbogacanie grawitacyjne surowego urobku węglowego. W krajowych warunkach przemysłowych wzbogacanie grawitacyjne prowadzi się na mokro w cieczach ciężkich zawieszinowych oraz w osadzarkach. Wstępne – pilotowe badania pokazały możliwość usuwania rtęci także metodą suchą przy wykorzystaniu separatorów wibracyjno-powietrznych. Rtęć występuje głównie w pirytycie i markasytycie, wchodzących w skład substancji mineralnej węgla, ale także w substancji organicznej węgla. Pewne jej ilości znajdują się w warstwach stropowych pokładów węglowych, które podczas eksploatacji trafiają do urobku węglowego. W zależności od rozkładu wymienionych składników we frakcjach gęstościowych zależność skuteczności usuwania rtęci podczas procesu wzbogacania grawitacyjnego. W artykule przedstawiono wyniki badań zawartości rtęci i siarki całkowitej w wydzielonych frakcjach gęstościowych węgla pochodzących z czterech kopalń. Zawartości te określano we frakcjach o gęstości: $-1,5 \text{ g/cm}^3$ (umownie koncentrat), $1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$ (umownie produkt pośredni) oraz $+1,8 \text{ g/cm}^3$ (umownie odpady). Wyniki zestawiono w tabelach 3–5 oraz na rysunkach 1–4. Natomiast na rysunkach 5–8 przedstawiono zależności pomiędzy zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej w badanych próbkach węgla. Przeprowadzone badania, które można nazwać wstępną analizą podatności badanych węgla na wzbogacanie grawitacyjne pokazały, że na drodze suchej separacji przy wykorzystaniu separatorów wibracyjno-powietrznych możliwe będzie usuwanie znacznych ilości rtęci gromadzącej się we frakcjach ciężkich i pośrednich.

Słowa kluczowe: rtęć w węglu kamiennym, rtęć we frakcjach gęstościowych, usuwanie rtęci, analiza densymetryczna, suche odkamienianie

* Dr hab. inż., prof. nadzw., **** Mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Oddział Zamiejscowy w Katowicach; e-mail: i.baic@imbigs.pl; w.sobko@imbigs.pl

** Prof. dr hab. inż., *** Dr inż., **** Dr hab. inż., prof. nadzw., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Technologii Paliw, Kraków;
e-mail: wsblaschke@gmail.com; tadeusz.dziok@agh.edu.pl; strugala@agh.edu.pl

Studies on the susceptibility of coals to the reduction of mercury content in the pre-combustion stage

Abstract: Work is being carried out on possibilities of limiting the content of mercury in hard coal products by gravity concentration of run-of-mine coal in the Branch of the Institute of Mechanized Construction and Rock Mining in Katowice and on the Faculty of Energy and Fuels of the AGH University of Science and Technology in Krakow. Under domestic industrial conditions, gravity concentration is carried out with heavy medium liquids and in jigs. Preliminary - pilot studies have shown the possibility of mercury removal also by using the dry deshaling method involving vibratory air separators. Mercury is mainly found in the pyrite and the rubble formed by the mineral carbon, but also in the organic carbon. Some of it is located in layers of coal roof fields, which in the course of their exploitation go to coal. The mercury removal efficiency during the gravity concentration process will depend on the decomposition of the listed components in the density fractions. The paper presents the results of investigations of total mercury and total sulphur content in the separated coal fractions from four mines. These contents were determined in fractions: -1.5 g/cm^3 (conventionally clean coal – concentrate), $1.5\text{--}1.8 \text{ g/cm}^3$ (conventionally middlings) and $+1.8 \text{ g/cm}^3$ (conventionally rock – waste). The results are summarized in Tables 3–5 and in Charts 1–4. Conversely, graphs 5-8 show the relationship between mercury content and total sulphur content in the tested coal samples. The study, which can be called a preliminary analysis of the susceptibility of the coals to gravity concentration, showed that the dry deshaling method on the vibratory air separators would allow significant amounts of mercury accumulated in the middlings and waste fractions to be removed.

Keywords: mercury in hard coal, mercury in density fraction, mercury removal, float-and-sink test, dry deshaling method

Wprowadzenie

Celem podjętej przez autorów pracy była analiza możliwości usuwania rtęci z surowego urobku energetycznego węgla kamiennego, na będącym w dyspozycji IMBiGS, wibracyjnym powietrznym separatorze typu FGX. Dotychczas wykonane prace badawcze (Baic i in. 2015a, 2015b, 2015c) nad odkamienianiem i odpopielaniem urobku węglowego metodą suchej separacji, pokazały skuteczność technologiczną i ekonomiczną tego procesu. Otrzymywano rezultaty wzbogacania podobne do uzyskiwanych metodą mokrą w osadzarzarkach pulsacyjnych. Z uwagi na fakt, że rtęć występuje głównie w składnikach mineralnych znajdujących się w warstwach stropowych i spągowych pokładów węgla kamiennego oraz w przerostach węglowych (Michalska i Białecka 2012) istnieje możliwość jej usuwania łącznie z frakcjami ciężkimi podczas procesu wzbogacania grawitacyjnego. Skuteczność usuwania rtęci zależeć będzie od rozkładu jej zawartości w poszczególnych frakcjach gęstościowych węgla kamiennego.

Niniejsza praca przedstawia rezultaty przeprowadzonych badań nad zawartością rtęci w wydzielonych, w laboratoryjnym rozdziale gęstościowym, frakcjach węglowych.

1. Zawartość rtęci w węglu kamiennym i możliwości jej usuwania

Zawartość rtęci w węglu kamiennym jest relatywnie niska i wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset $\mu\text{g/kg}$. Analiza wyników badań wskazuje na różne formy występowania rtęci w węglu (Meij i Winkel 2009; Strezov i in. 2010; Yudovich i Ketris 2005; Zhang i in.

2009). Występuje ona w substancji mineralnej jak również w substancji organicznej. Rtęć w substancji mineralnej węgla występuje głównie w pirycie i markasyście, a w substancji organicznej występuje w połączeniach siarkowych, głównie w powiązaniu z grupami tiolowymi (R-SH).

W Polsce w zależności od położenia i rodzajów pokładów, z których eksploatowany jest węgiel kamienny zawartość rtęci jest zróżnicowana i waha się w granicach od 10 do 800 µg/kg (Baic i Blaschke 2017). W ostatnich latach zrealizowano kilka projektów badawczych, w których badano poziom zawartości rtęci w krajowych węglach (Białecka i Pyka 2016; Gołaś i Strugała 2014).

Ograniczanie zawartości rtęci w węglach może odbywać się zarówno na etapie *pre-combustion* tzn. przed procesem spalania jak i na etapie *post-combustion* poprzez usuwanie rtęci ze spalin lub gazów poprocesowych (Krzyżyńska i in. 2011; Wdowin i in. 2015).

Skuteczność usuwania rtęci z węgla na etapie *pre-combustion* zależy od formy jej występowania w danym złożu. Do podstawowych metod ograniczających zawartość rtęci w węglach zaliczyć należy:

- przeróbkę mechaniczną węgla,
- wstępną preparację termiczną węgla,
- selektywną eksploatację pokładów węglowych,
- ekstrakcję wodną w warunkach podkrytycznych,
- chemiczną obróbkę węgla,
- roztwarzanie pirytu z wykorzystaniem SO₂,
- metody biologiczne.

W niniejszym artykule analizie poddano możliwość usuwania rtęci na etapie przeróbki mechanicznej przyjmując, że proces będzie prowadzony na separatorach wibracyjno-powietrznych. Możliwość obniżenia zawartości rtęci w węglu przy wykorzystaniu tego typu urządzeń została potwierdzona w projektach zrealizowanych przez Departament Energii Stanów Zjednoczonych (Honaker 2007). Podczas suchej separacji węgla uzyskano obniżenie zawartości rtęci na poziomie 67%. Pozytywne rezultaty otrzymano także w badaniach prowadzonych w IMBiGS (Baic i Blaschke 2013; Baic i Blaschke 2017).

Procesy wzbogacania grawitacyjnego węgla, także prowadzone metodami mokrymi, oprócz usuwania z nich niepożądanych z uwagi na parametry energetyczne zanieczyszczeń, przyczyniają się również do obniżenia w węglu zawartości rtęci i siarki (Baic i in. 2015a, 2015b, 2015c). Skuteczność usuwania rtęci w procesie jego wzbogacania jest różna dla różnych typów węgla. Zadowalające rezultaty w zakresie obniżenia zawartości rtęci uzyskuje się w przypadku wzbogacania węgla bogatych w piryt. Proces wzbogacania umożliwia wówczas blisko 90% redukcję zawartości rtęci, a jego skuteczność jest proporcjonalna do skuteczności usunięcia substancji mineralnej. Dla węgla o niskiej zawartości pirytu metody wzbogacania są mało efektywne, a uzyskiwana skuteczność nie przekracza 10%. Należy w tym miejscu podkreślić, że efektywność usunięcia rtęci nie jest jedynie zależna od zawartości pirytu w węglu, ale również od jego formy. Piryt pochodzenia epigenetycznego, tzw. piryt gruboziarnisty, jest łatwy do usunięcia na drodze wzbogacania, w odróżnieniu od pirytu syngenetycznego, tzw. pirytu drobnoziarnistego. Według danych literaturowych najlepsze rezultaty w usunięciu pirytu uzyskać można dla pirytu pochodzenia epigenetycznego

występującego w postaci dużych wtrąceń nierównomiernie rozsianych w strukturze węgla (Aleksa i in. 2007).

2. Metodyka badań

Analizując efektywność zastosowania różnych maszyn stosowanych w procesach wzbogacania grawitacyjnego należy w pierwszym etapie badań sprawdzić podatność urobku węglowego na rozdział według gęstości jego ziaren. Najczęściej prowadzi się rozdział na frakcje gęstościowe w warunkach laboratoryjnych w cieczach ciężkich z wykorzystaniem dwuchorku cynku. Wydzielone frakcje, po przemyciu i wysuszeniu, kieruje się do analiz chemicznych, określając zawartości interesujących nas parametrów jakościowych.

Mając powyższe na uwadze, w ramach przeprowadzonych przez autorów badań wstępnych, pobrano próby węgla surowego z czterech kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Z uwagi na wymogi formalne stawiane przez producentów węgla nazwano je „A”, „B”, „C” i „D”. Parametry jakościowe (zawartość popiołu, siarki i rtęci) pobranych próbek węgla surowego zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Parametry jakościowe próbek węgla surowego

TABLE 1. Quality parameters of the raw coal samples

Kopalnia	Klasa ziarnowa [mm]	Zawartość		
		A ^a [%]	H _{gr} ^a [μg/kg]	S _t ^a [%]
A	20–0	40,49	127,6	0,49
B	31,5–0	38,46	103,0	0,56
C	31,5–0	21,57	127,4	1,76
D	31,5–0	24,37	113,5	0,95

TABELA 2. Parametry jakościowe próbek węgla surowego klasy ziarnowej 0–2 mm

TABLE 2. Quality parameters of the raw coal samples grain class 0–2 mm

Kopalnia	Klasa ziarnowa [mm]	Zawartość		
		A ^a [%]	H _{gr} ^a [μg/kg]	S _t ^a [%]
A	0–2	39,81	144,43	0,54
B	0–2	29,93	217,50	0,96
C	0–2	29,59	164,90	2,14
D	0–2	28,69	65,2	0,83

Przed rozdziałem w cieczach ciężkich usunięto z urobku klasę ziarnową 0–2 mm, gdyż rozdział takich ziaren w cieczach ciężkich jest niedokładny, a ponadto w trakcie powietrznej separacji ziarna tej wielkości praktycznie nie rozdzielają się według gęstości (Baic i in. 2015b, 2015c). Parametry jakościowe tej klasy ziarnowej dla analizowanych próbek węgla surowego zestawiono w tabeli 2.

W kolejnym etapie prac badawczych próbki węgla surowego z poszczególnych kopalń rozszano na klasy ziarnowe. Próbki węgla surowego z kopalni „A” i „B” podzielono na dwie klasy. Próbki z kopalni „C” podzielono na cztery klasy ziarnowe, a z kopalni „D” podzielono na pięć klas ziarnowych. Następnie każdą z nich rozdzielono w cieczach ciężkich na trzy frakcje: –1,5, 1,5–1,8, +1,8 g/cm³, określając w każdej frakcji parametry jakościowe. Wyniki rozdziału i parametry jakościowe zestawiono w tabelach 3–5.

TABELA 3. Wyniki analiz densymetrycznych wraz z parametrami jakościowymi – kopalnia A i B

TABLE 3. Results of the float-and-sink test including quality parameters – mine A & B

Kopalnia	Klasa ziarnowa [mm]	Frakcje gęstościowe [g/cm ³]	Zawartość		
			A ^a [%]	H _{gr} ^a [μg/kg]	S _t ^a [%]
A	20–6	–1,5	5,91	59,8	0,56
		1,5–1,8	24,92	161,7	0,75
		+1,8	75,20	127,5	0,27
	6–2	–1,5	6,12	74,1	0,62
		1,5–1,8	27,35	193,3	0,80
		+1,8	74,47	184,4	0,40
B	31,5–2	–1,5	2,90	62,7	0,53
		1,5–1,8	32,55	537,4	2,63
		+1,8	88,60	124,4	0,30
	20–2	–1,5	2,65	76,0	0,59
		1,5–1,8	30,28	518,0	2,89
		+1,8	88,77	116,4	0,26

3. Analiza otrzymanych wyników

Pobrano do badań węgiel surowy (próby A, B, C i D) charakteryzuje się typową zawartością rtęci dla węgla polskich (w przedziale 103–127 μg/kg), przy zawartości siarki na poziomie od 0,49–1,76% oraz dużą zawartością popiołu w granicach od 21–40%. Usunięta

TABELA 4. Wyniki analiz densymetrycznych wraz z parametrami jakościowymi – kopalnia C

TABLE 4. Results of the float-and-sink test including quality parameters – mine C

Kopalnia	Klasa ziarnowa [mm]	Frakcje gęstościowe [g/cm ³]	Zawartość		
			A ^a [%]	H _{gt} ^a [μg/kg]	S _t ^a [%]
C	31,5–20	–1,5	6,02	61,3	1,02
		1,5–1,8	32,25	67,2	0,94
		+1,8	84,25	819,6	10,20
	20–12	–1,5	7,36	50,9	0,99
		1,5–1,8	33,00	272,3	1,71
		+1,8	83,65	273,0	1,19
	12–6	–1,5	6,59	43,9	0,92
		1,5–1,8	30,19	268,0	2,68
		+1,8	80,29	259,6	2,76
	6–2	–1,5	6,36	36,3	0,75
		1,5–1,8	21,69	405,9	4,16
		+1,8	74,95	572,7	8,08

TABELA 5. Wyniki analiz densymetrycznych wraz z parametrami jakościowymi – kopalnia D

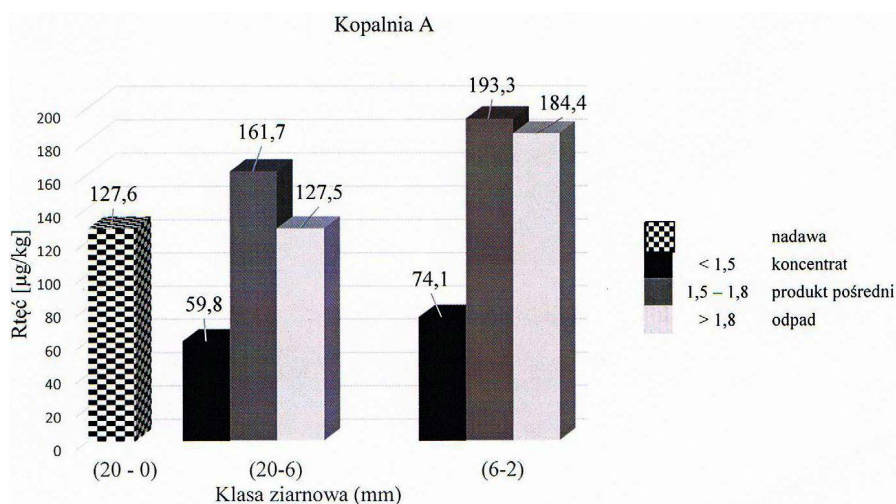
TABLE 5. Results of the float-and-sink test including quality parameters – mine D

Kopalnia	Klasa ziarnowa [mm]	Frakcje gęstościowe [g/cm ³]	Zawartość		
			A ^a [%]	H _{gt} ^a [μg/kg]	S _t ^a [%]
D	31,5–25	–1,5	6,17	34,9	0,73
		1,5–1,8	39,46	238,7	0,54
		+1,8	92,56	35,5	0,04
	25–20	–1,5	8,96	36,6	0,82
		1,5–1,8	39,65	111,9	0,64
		+1,8	80,12	49,0	0,13
	20–12,5	–1,5	7,96	53,5	0,84
		1,5–1,8	23,76	170,9	0,94
		+1,8	85,19	67,3	0,32
	12,5–6	–1,5	8,41	59,4	0,86
		1,5–1,8	33,19	221,1	1,59
		+1,8	79,76	204,2	1,13
	6–2	–1,5	6,64	36,7	0,76
		1,5–1,8	34,63	188,5	1,58
		+1,8	79,04	319,7	2,60

klasa ziarnowa 0–2 mm ma wyraźnie gorsze, szczególnie w zakresie zawartości rtęci i siarki, parametry jakościowe. Autorzy mieli do dyspozycji reprezentatywne próbki urobku węglowego pochodzące z badanych kopalń. Z tego też względu wydzielano różne klasy ziarnowe, które następnie kierowano do analizy densymetrycznej. W celu ograniczenia ilości analiz chemicznych podczas rozdziału w cieczach ciężkich wydzielano tylko trzy produkty. W produktach tych określano zawartość popiołu, aby uzyskać informację o jakości koncentratu (frakcja najlżejsza $-1,5 \text{ g/cm}^3$), jakości odpadów (frakcja najcięższa $+1,8 \text{ g/cm}^3$) oraz produktu pośredniego ($1,5\text{--}1,8 \text{ g/cm}^3$). Łatwo zauważyć, że frakcje powyżej $1,8 \text{ g/cm}^3$ są w zasadzie czystymi ziarnami kamienia.

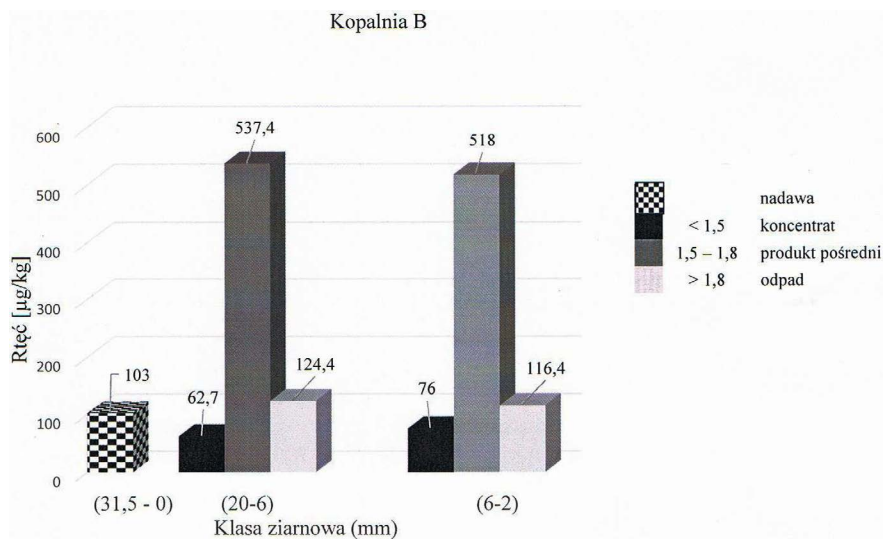
Wyniki przeprowadzonej analizy densymetrycznej wskazują, że rtęć przechodzi głównie do produktów pośrednich i odpadów (frakcji najcięższych). Nie występuje to we wszystkich przypadkach, co należy tłumaczyć różnymi sposobami występowania rtęci w badanych węglach, w tym różnym jej powiązaniu z siarką. W koncentratkach ($-1,5 \text{ g/cm}^3$) zawartość rtęci jest najniższa i to niezależnie od zawartości w nim siarki. Ilustrują to wykresy słupkowe zawartości rtęci w nadawie i wydzielonych z niej klasach ziarnowych z podziałem na trzy frakcje gęstościowe (rys. 1–4). Badania te potwierdzają tym samym możliwość otrzymywania koncentratów węgla kamiennego o niskiej zawartości rtęci na drodze wzbogacania grawitacyjnego.

Ponieważ w literaturze spotyka się stwierdzenia o współzależności zawartości rtęci od zawartości siarki określono w każdej wydzielonej frakcji zawartość siarki. Na rysunkach 5–8 pokazano zależności pomiędzy zawartością rtęci i zawartością siarki w badanych próbkach węgla surowych z uwzględnieniem klasy ziarnowej i frakcji gęstościowej. Generalnie wysokim zawartościom siarki towarzyszyła również wysoka zawartość rtęci.



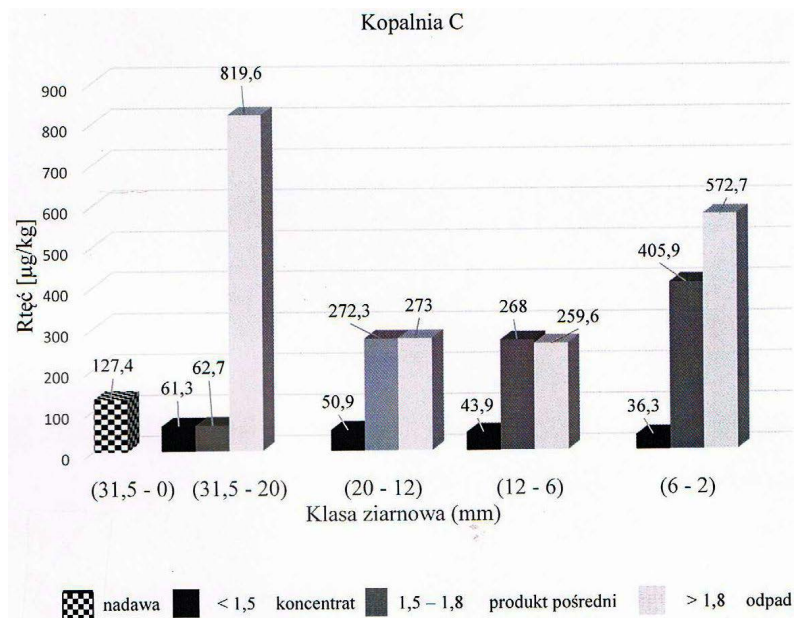
Rys. 1. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach w zależności od frakcji gęstościowej – kopalnia A

Fig. 1. Changes in the mercury content in the analyzed samples depending on the density fraction – mine A



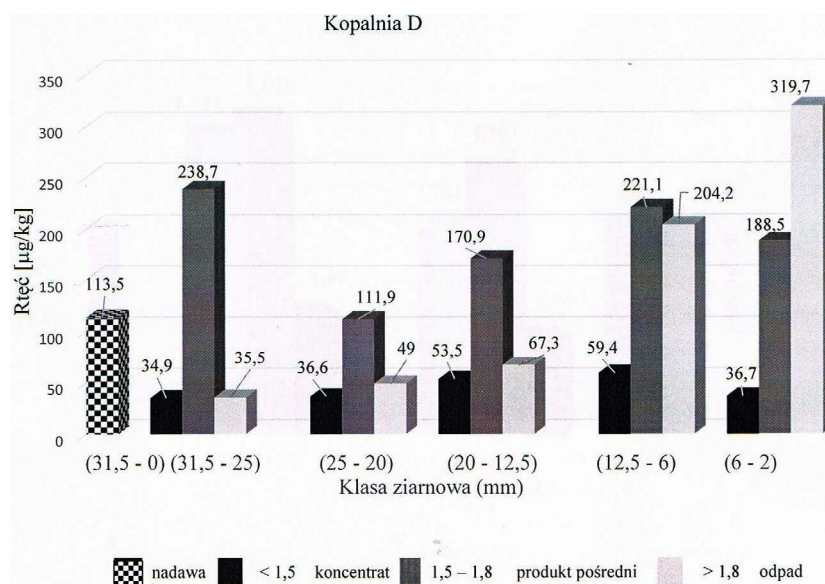
Rys. 2. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach w zależności od frakcji gęstościowej – kopalnia B

Fig. 2. Changes in the mercury content in the analyzed samples depending on the density fraction – mine B



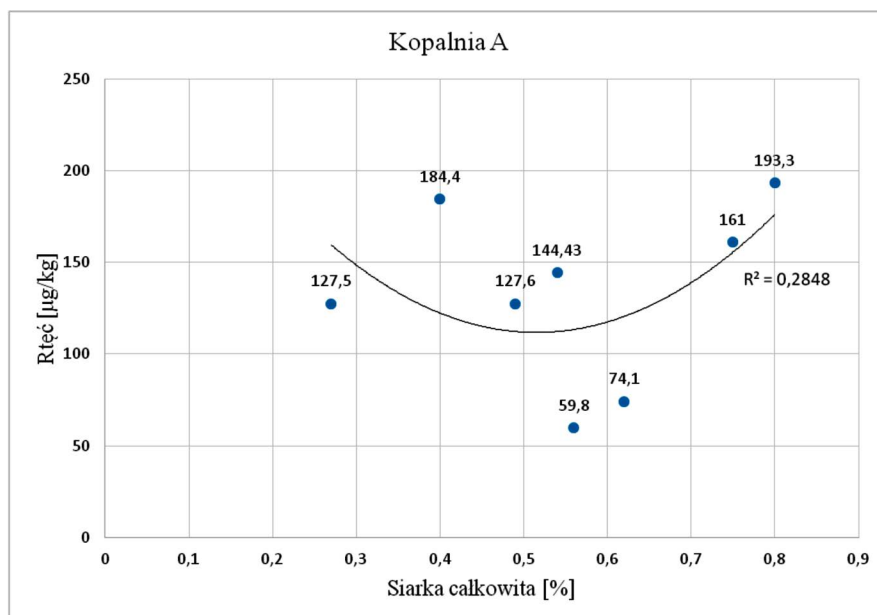
Rys. 3. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach w zależności od frakcji gęstościowej – kopalnia C

Fig. 3. Changes in the mercury content in the analyzed samples depending on the density fraction – mine C



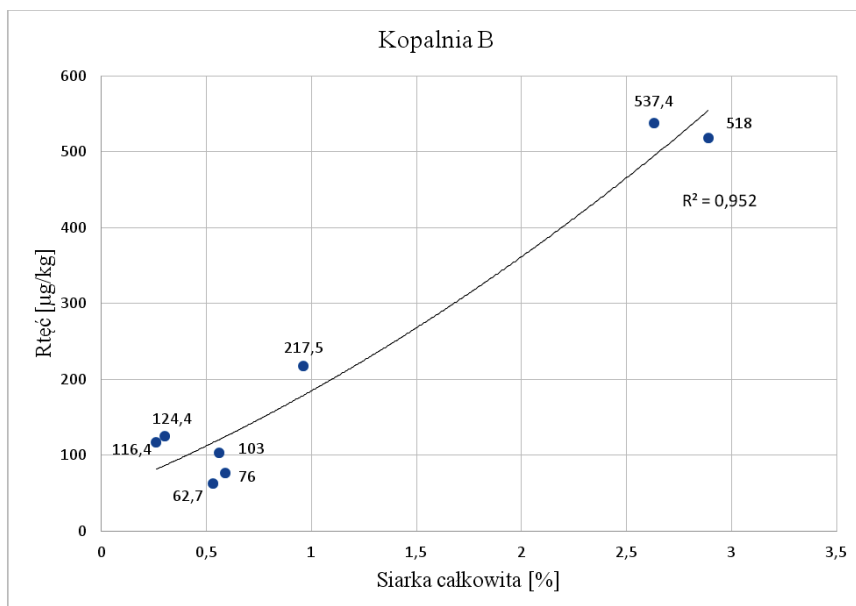
Rys. 4. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach w zależności od frakcji gęstościowej – kopalnia D

Fig. 4. Changes in the mercury content in the analyzed samples depending on the density fraction – mine D



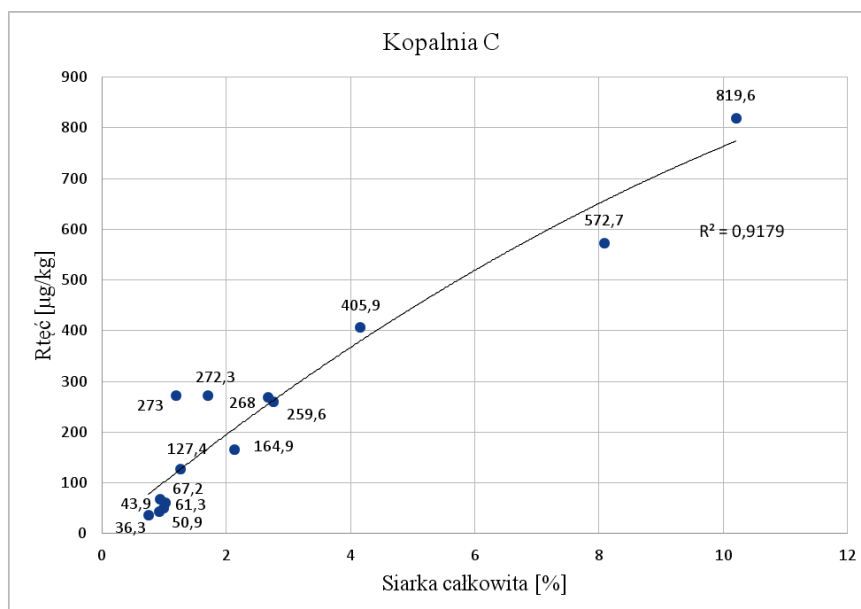
Rys. 5. Zależność między zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej w próbkach węgla – kopalnia A

Fig. 5. Relationship in the raw coal samples between the content of mercury and the total sulfur content – mine A



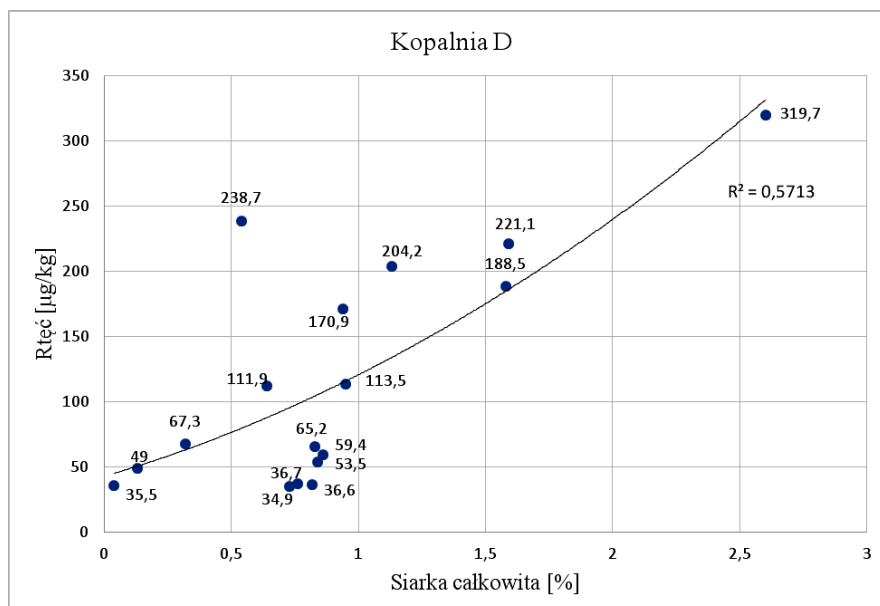
Rys. 6. Zależność między zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej w próbkach węgla – kopalnia B

Fig. 6. Relationship in the raw coal samples between the content of mercury and the total sulfur content – mine B



Rys. 7. Zależność między zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej w próbkach węgla – kopalnia C

Fig. 7. Relationship in the raw coal samples between the content of mercury and the total sulfur content – mine C



Rys. 8. Zależność między zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej w próbkach węgla – kopalnia D

Fig. 8. Relationship in the raw coal samples between the content of mercury and the total sulfur content – mine D

Podsumowanie

W celu określenia możliwości wykorzystania separatorów wibracyjno-powietrznych do usuwania rtęci z węgla surowego, konieczne jest wykonanie analizy rozkładu jej zawartości w możliwych do wytworzenia w zakładach wzbogacania klasach ziarnowych. Badania takie przeprowadzono dla węgla surowych pochodzących z czterech kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Otrzymane wyniki pokazały, że rtęć w wyniku rozdziału gęstościowego kumuluje się w produktach pośrednich ($1,5\text{--}1,8\text{ g/cm}^3$) i we frakcjach najcięższych – odpadowych ($+1,8\text{ g/cm}^3$). Stwierdzono także odstępstwa od tej reguły, gdzie w kilku przypadkach zawartość rtęci skumulowała się tylko we frakcjach pośrednich (tab. 5 i rys. 4). W badanych węglach surowych nie stwierdzono jednoznacznej korelacji pomiędzy zawartością rtęci a zawartością siarki całkowitej (rys. 5–8). Konieczne, zdaniem autorów, jest przeprowadzenie szczegółowych badań mineralogicznych dla pobranych próbek węgla surowego w celu stwierdzenia form występowania w nich rtęci i siarki. Badania te są niezwykle istotne w przypadku rozważania decyzji inwestycyjnej ukierunkowanej na usuwanie rtęci z węgla surowych na drodze wzbogacania grawitacyjnego.

Przeprowadzone badania, które można nazwać wstępną analizą podatności badanych węgla na wzbogacanie grawitacyjne pokazały, że na drodze suchej separacji na powietrznych

wibracyjnych separatorach możliwe będzie usuwanie znacznych ilości rtęci gromadzącej się we frakcjach ciężkich i pośrednich. Prezentowane wyniki badań upoważniają do kontynuacji badań i przeprowadzenia prób półprzemysłowych na posiadanym w IMBiGS Oddział zamiejscowy w Katowicach separatorze wibracyjno-powietrznym typu FGX.

Literatura

- Aleksa i in. 2007 – Aleksa, H., Dyduch, F. i Wiechowski, K. 2007. Chlor i rtęć w węglu i możliwości ich obniżenia metodami przeróbki mechanicznej, *Górnictwo i Geoinżynieria* t. 31, z. 3/1, s. 35–48.
- Baic, I. i Blaschke, W. 2013. Analiza możliwości wykorzystania powietrznych stołów koncentracyjnych do otrzymywania węglowych paliw kwalifikowanych i substytutów kruszyw. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 247–260.
- Baic i in. 2015a – Baic, I., Blaschke, W., Sobko, W. i Fraś, A. 2015a. Application of air concentrating table for improvement in the quality parameters of the commercial product “Jaret”. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society – Inżynieria Mineralna* t. 16(1), s. 221–226.
- Baic i in. 2015b – Baic, I., Blaschke, W., Góralczyk, S., Szafarczyk, J. i Buchalik, G. 2015b. Nowa ekologiczna metoda usuwania zanieczyszczeń skałą płonną z urobku węgla kamiennego. *Rocznik Ochrony Środowiska – Annual Set The Environment Protection* t. 17. Koszalin: Wyd. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, s. 1274–1285.
- Baic i in. 2015c – Baic, I., Blaschke, W. i Sobko, W. 2015c. Badania nad odkamienianiem energetycznego węgla kamiennego na powietrznych stołach koncentracyjnych. *Rocznik Ochrony Środowiska – Annual Set The Environment Protection* t. 17. Koszalin: Wyd. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, s. 958–972.
- Baic, I. i Blaschke, W. 2017. Preliminary Study on the Reduction of Mercury Content in Steam Coal by Using a Pneumatic Vibrating Concentrating Table. *Proceedings 20th Conference on Environment and Mineral Processing VSB-TU. Ostrava, Czech Republic*, s. 7–16.
- Białecka, B. i Pyka, I. 2016. *Rtęć w polskim węglu kamiennym do celów energetycznych i w produktach jego przeróbki*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa, s. 167.
- Golaś, J. i Strugała, A. 2014. *Mercury As a Coal Combustion Pollutant. Monograph AGH University of Science and Technology*. Kraków. Ed. Oficyna Drukarska J. Chmielewski. Warsaw, s.152.
- Honaker, R.Q. 2007. Development of an advanced deshaling technology to improve the energy efficiency of coal handling, processing, and utilization operations. U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program, Mining of the Future, ID Number: DE-FC26-05NT42501.
- Krzyżyńska i in. 2011 – Krzyżyńska, R., Zhao, Yongxin i Hutson, N.D. 2011. Bench- and Pilot-scale Investigation of Integrated Removal of Sulfur Dioxide, Nitrogen Oxides and Mercury in a Wet Limestone Scrubber. *Rocznik Ochrony Środowiska – Annual Set The Environment Protection* t. 13, s. 29–50.
- Meij, R. i Winkel, B.H. 2009. Trace elements in world steam coal and their behavior in Dutch coal-fired power stations- A review. *International Journal of Coal Geology* t. 77, s. 289–293.
- Michalska, A. i Białecka, B. 2012. Zawartość rtęci w węglu i odpadach górniczych. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko* 2012, nr 3, s. 73–87
- Strezov V. Evans T.J., Ziółkowski A., Nelson P.F.(2010. Mode of Occurrence and Thermal Stability of Mercury in Coal. *Energy Fuels* t. 24, s. 53–57.
- Wdowin i in. 2015 – Wdowin, M., Baran, P., Panek, R., Zarębska, K. i Franus, W. 2015. Analiza możliwości oczyszczania gazów wylotowych z Hg i CO² na zeolitach otrzymanych z popiołów lotnych. *Rocznik Ochrony Środowiska – Annual Set The Environment Protection* t. 17, s. 1306–1319.
- Yudovich, Y.E. i Ketris, M.P. 2005. Mercury in coal: a review – Part 1. Geochemistry. *International Journal of Coal Geology* t. 62, s. 107–134.
- Zhang i in. 2009 – Zhang, C., Chen, G., Gupta, R. i Xu, Z. 2009. Emission control of mercury and sulfur by mild thermal upgrading of coal. *Energy Fuels* t. 23, s. 766–733.