

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICTWO I ŚRODOWISKO

MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK
ROCZNIK 11

1



G I G

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2012

Rada Programowa ds. Wydawnictw: *prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Andrzej Maranda, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Joanna Pinińska, prof. dr hab. inż. Krystian Probiez, prof. dr hab. inż. Czesława Rosik-Dulewska, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś*

Komitety Kwalifikacyjno-Opiniotwórcze: *prof. dr hab. inż. Jan Wachowicz (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka-Kolarz (zastępca przewodniczącego), dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. GIG, dr inż. Piotr Kalisz, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, prof. dr hab. inż. M. Jacek Łączny, dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG, prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk, mgr Małgorzata Zielińska*

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redaktorzy Tematyczni

*prof. dr hab. inż. M. Jacek Łączny
dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. GIG,
dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG
prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk*

Redaktor Statystyczny

dr inż. Piotr Kalisz

Redakcja wydawnicza

Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Redakcja językowa

Monika Filipiak

Korekta

Barbara Dusik

Skład, łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Wersja papierowa czasopisma jest wersją pierwotną

Nakład 100 egz.

Adres Redakcji:

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych
Głównego Instytutu Górniczego, 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1

<http://www.kwartalnik.gig.eu>

tel. 32 259-24-04

fax 32 259-27-74

e-mail: m.kusmirek@gig.eu

Spis treści

MAREK CHYC

Znaczenie dodatków paliwowych w procesach spalania paliw stałych5
The role of fuel additives in the fuel combustion process

KRYSZYNA CZAPLICKA-KOLARZ, ANNA ŚLIWIŃSKA, JERZY ŚWIĄDROWSKI

Alternatywne obniżenie emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia bloku IGCC
przez usuwanie dwutlenku węgla lub/i zagospodarowanie metanu w kopalni węgla
kamiennego..... 17

Alternative decrease of greenhouse gas emissions in the life cycle of the IGCC through
carbon dioxide removal or/and methane management in hard coal mines

KRZYSZTOF GOGOLA, SEBASTIAN IWASZENKO, ADAM SMOLIŃSKI

Próba zastosowania reaktora ze złożem stałym do oceny punktu inicjacji zapłonu
obiektów formowanych z odpadów powęglowych..... 35

Trial of application of a fixed-bed reactor for the assessment of the ignition initiation
point of objects formed from coal wastes

MICHAŁ GWOŹDZIEWICZ, MIROSŁAWA BUKOWSKA

Zmiany współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów wydobywczych w bryle
składowiska „Bogdanka” w świetle badań modelowych oraz *in situ* 47

Changes of the filtration coefficient of mining exploitation wastes of different ages
in the solid of the "Bogdanka" dump in the light of model and *in situ* investigations

MARZENA MAJER, KATARZYNA NOWAK

Poziom przyzwolenia górników na wydłużenie wieku emerytalnego 63
Level of miners permission for prolonging retirement age

ADAM SMOLIŃSKI, NATALIA HOWANIEC

Badania procesu zgazowania węgla kamiennego w obecności K_2CO_3 81
Investigations into the hard coal gasification process in the presence of K_2CO_3

MAŁGORZATA WYSOCKA, STANISŁAW CHAŁUPNIK, ELŻBIETA MOLEND, JUSTIN BROWN, RAJDEEP SIDHU

Obserwacje zmian ekshalacji radonu w rekultywowanym osadniku kopalnianych
wód dołowych..... 93

Observations of radon exhalation changes in the reclaimed sedimentation basin
of underground mine wastes

Marek Chyc*

ZNACZENIE DODATKÓW PALIWOWYCH W PROCESACH SPALANIA PALIW STAŁYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystykę składu chemicznego dodatków paliwowych. Racjonalne stosowanie modyfikatorów procesu spalania może znacząco przyczyniać się do poprawy parametrów jakościowych emitowanych spalin. W związku z tym dobór składu chemicznego dodatku paliwowego jest niezwykle istotny. Zanieczyszczenie powietrza jest problemem globalnym, szczególnie odczuwalnym w krajach, gdzie węgiel jest głównym nośnikiem energii. Niska emisja zanieczyszczeń atmosferycznych przyczynia się do powstawania smogu, kwaśnych deszczy i opadów cząstek stałych na rozległych obszarach. Powoduje to zakłócenie naturalnej równowagi ekologicznej. Atmosfera uboga w tlen sprzyja powstawaniu sadzy, produktów smolistych i tlenku węgla. Opracowano wiele koncepcji dodatków paliwowych; do najpopularniejszych z nich należą związki miedzi i chlorek sodu. Dodatki paliwowe dają możliwość zmniejszenia uciążliwości spalania węgla, redukując ilość paliwa potrzebną do produkcji jednostkowej ilości energii. Z tego zakresu opatentowano wiele wynalazków dotyczących doboru odpowiedniego składu chemicznego modyfikatorów. Niniejszy artykuł wiąże zagadnienia z zakresu technologii spalania w odniesieniu do dodatków paliwowych oraz podstawowe zagadnienia dotyczące chemizmu reakcji syntezy chloropochodnych ksenobiotyków.

The role of fuel additives in the fuel combustion process

Abstract

The study presents the profile of chemical composition of fuel additives. A rational use of combustion process modifiers can significantly improve quality parameters of fuel emissions, therefore it is crucial to properly match the chemical composition of fuel additive. Air pollution is a global issue, particularly oppressive in countries where coal is the main energy carrier. Low air pollutant emission contributes to smog creation, acid rains and particle falling over extensive areas, disturbing natural ecological balance. Low oxygen air is conducive to soot, tar products and carbon oxide production. Many concepts of fuel additives were developed, but the most popular are copper compounds and sodium chloride. Fuel additives provide for the decrease of coal combustion inconvenience by reducing the amount of fuel needed to produce an energy unit. Many inventions concerning the selection of suitable chemical composition of modifiers were patented. The present study discusses the issues of combustion process in relation to fuel additives and fundamental issues of chemism of synthesis of chlorine derivative xenobiotics.

1. WPROWADZENIE

W sprzedaży dostępnych jest szereg dodatków paliwowych, których działanie opiera się na wspomaganiu procesów chemicznego utleniania paliwa i produktów jego niepełnego spalania. Dodatki paliwowe stosowane są w technologii spalania oleju opałowego i napędowego, benzyny, mazutu, węgla brunatnego i kamiennego, a także drewna. Producenci komercyjnych preparatów wspomagających procesy termiczne,

* Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa

podnoszą szereg racji uzasadniając zaletę ich stosowania. Wskazuje się na ekologiczne skutki chemicznej modyfikacji składu paliwa, do których zaliczono zmniejszenie uciążliwości spalania paliw nieodnawialnych. Z informacji podanych przez producenta najpopularniejszego polskiego dodatku paliwowego wynika, że regularne użytkowanie produktu powoduje zmniejszenie zużycia paliwa nawet o 20%¹. Pełniejsze wykorzystanie paliwa, niesie ze sobą ekologicznie wymierne korzyści. Do istotnych skutków ograniczenia zużycia paliwa należy zmniejszona emisja gazów cieplarnianych oraz prekursorów kwaśnych deszczy (tlenków siarki, tlenków azotu). Utlenianie produktów smolistych oraz sadzy zgromadzonej na powierzchni wymiennika ciepła i przewodów kominowych, powoduje destrukcję szkodliwych substancji, negatywnie wpływających na jakość powietrza atmosferycznego. Wiele związków chemicznych zawartych w produktach niepełnego spalania węgla, wykazuje działanie kancerogenne, mutagenne i toksyczne. Do najważniejszych toksycznych produktów ubocznych, powstających w wyniku niepełnego spalania, należą tlenek węgla i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne.

Korzyścią wynikającą z utrzymywania armatury grzewczej wolnej od zanieczyszczenia sadzą, jest wyeliminowanie ryzyka powstawania jej zapłonu w przewodach kominowych. Zapłon sadzy stanowi potencjalną przyczynę pożarów zabudowań oraz uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynków. Zły stan techniczny przewodów dymnych, spowodowany gromadzeniem się sadzy na ściankach instalacji, uniemożliwia optymalny przebieg procesu grzewczego, a jej obecność skutkuje spadkiem ciągu kominowego. Utrudnione odprowadzanie spalin z komory spalania, wpływa na deficyt tlenowy, czego efektem jest wzrost koncentracji toksycznego tlenku węgla (II) w spalinach. Najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) dla CO wynosi 0,030 g/m³ (Sawicki 2004). Zawartość CO w spalinach pochodzących z palenisk domowych mieści się w przedziale 0,001–0,040 g/m³ spalin. Powyższe dane wskazują, że spaliny wydostające się z nieszczelnego paleniska, nawet właściwie pracującego, są niebezpieczne dla życia i zdrowia człowieka. Instalacje grzewcze niewłaściwie eksploatowane, bądź utrzymywane w nieodpowiednim stanie technicznym, powodują podwyższoną emisję CO, która może wynosić nawet 90 g/m³ spalin. Komercyjne dodatki paliwowe wspomagają procesy spalania, ułatwiając przebieg procesu utleniania CO z utworzeniem CO₂. Inną ważną zaletą stosowania takich dodatków jest ograniczenie emisji CO w wyniku zapewnienia drożności kanałów spalinowych. Ich użycie w instalacjach przemysłowych, wytwarzających ciepło i energię elektryczną, zmniejsza utrudnienia technologiczne powstałe w rezultacie szlakowania instalacji. Szlakowanie kotła skutkuje spadkiem sprawności cieplnej instalacji, a w konsekwencji prowadzi do konieczności przestojów technologicznych na czas mechanicznego jej czyszczenia. Mechaniczne usuwanie szlaku z powierzchni kotłów jest czynnością technicznie kłopotliwą i czasochłonną. Jednocześnie istnieje szeroka gama preparatów, wspomagających proces spalania paliw, które niwelują problem szlakowania kotłów. Stosowanie dodatków paliwowych o niewłaściwie dobranym składzie chemicznym przyczynia się do powstania korozji wysokotemperaturowej elementów stalowych, żeliwnych i ceramicznych w instalacjach grzewczych. Należy zaznaczyć, że stosowanie dodatków

¹ <http://www.skwat.com.pl/sadpal,2.php>

paliwowych nie zawsze jest technologicznie uzasadnione. Istnieje szereg instalacji w energetyce zawodowej, które mimo spalania paliw bez domieszek, osiągają wysoką wydajność technologiczną procesu, a skład gazów spalinowych nie wzbudza zastrzeżeń jakościowych. Kompozycja stosowanego dodatku oraz jego udział w stosunku do paliwa powinny być dobrane indywidualnie oraz okresowo weryfikowane. Dobór związków chemicznych wchodzących w skład dodatków paliwowych był przedmiotem wielu badań, co owocowało licznymi zgłoszeniami patentowymi i wdrożeniami. Niestety prace badawcze dotyczące możliwości powstawania zanieczyszczeń środowiska w efekcie stosowania dodatków paliwowych nie były dotychczas publikowane. Podkreślić należy, że niektóre z powszechnie stosowanych kompozycji zawierają związki chemiczne, które szeroko są wskazywane, jako źródło podwyższonej emisji trwałych zanieczyszczeń organicznych (Halonen i in. 1995; Olie, Addink, Schoonenboom 1998).

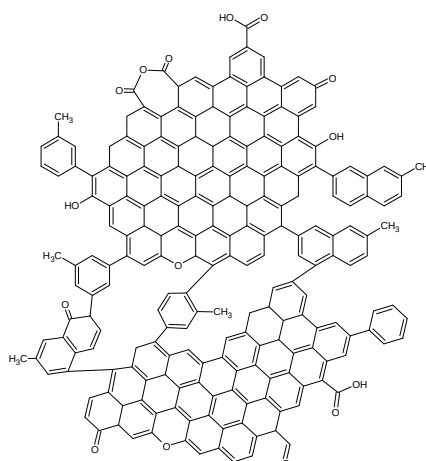
2. CHARAKTERYSTYKA CHEMICZNA I TOKSYKOLOGICZNA SADZY KOMINOWEJ

Sadza kominowa jest substancją złożoną o zmiennym składzie chemicznym i morfologii. Jej skład jest uzależniony od rodzaju spalanego paliwa oraz warunków panujących w komorze spalania. Kluczowe znaczenie odgrywa temperatura spalania oraz warunki dyfuzji spalin i powietrza zasilającego palenisko. Sadza zawiera pewne ilości materii nieorganicznej, w postaci lotnego popiołu, który w odpowiednich warunkach może wykazywać tendencję do tworzenia spieków lub trudnych do usunięcia złogów. Typowa temperatura formowania się sadzy to około 1400°C. W sprzyjających warunkach, gorąca strefa płomienia utlenia pierwotne struktury sferyczne węgla, zapobiegając procesowi katenacji. Proces ten prowadzi do wytworzenia złożonych struktur węglowych, w tym fulerenów. Reakcja utleniania organicznych składników sadzy przebiega z wytworzeniem ditlenku węgla i wody. Spalanie węgla koksujących powoduje, że depozyt węglowy, osadzający się na chłodniejszych elementach instalacji kotłowej i przewodach dymnych, zawiera znaczne ilości substancji smolistych. Stałe produkty niepełnego spalania wywierają niekorzystny wpływ na pracę instalacji kotłowej. Do najważniejszych zaburzeń pracy takiej instalacji, związanych z gromadzeniem się sadzy, należą:

- zapłon sadzy w przewodach dymnych,
- zmniejszenie sprawności wymiennika ciepła i związane z tym straty kominowe,
- zwiększenie zapotrzebowania na opał,
- zmniejszenie ciągu kominowego,
- niedrożność kanałów.

Sadza zgromadzona w przewodach dymnych jest porywana ze spalinami, a jej drobiny, zanieczyszczając powietrze, stanowią zagrożenie na obszarach, gdzie spalanie węgla kamiennego jest podstawowym sposobem ogrzewania budynków (Jędrychowski i in. 2006). Zanieczyszczenia powietrza migrują do wód i gleby, powodując skażenie całego ekosystemu. W konsekwencji toksyczne związki, często w przekształconej formie chemicznej, trafiają do łańcucha pokarmowego. Związki zawarte w sadzy

mają negatywny wpływ na układ oddechowy, krwionośny i mogą być odpowiedzialne za choroby nowotworowe (Dockery, Stone 2007).



Rys. 1. Przykład struktury chemicznej sadzy (Lin 2002)

Fig. 1. An example of the chemical structure of carbon black (Lin 2002)

Skład chemiczny sadzy jest silnie uwarunkowany rodzajem spalanego paliwa. Profil lotnych związków organicznych, dla ziaren sadzy o różnej morfologii, wykazuje duże zróżnicowanie jakościowe. Jedną z głównych takich różnic jest rozwinięcie powierzchni oraz stechiometria poszczególnych frakcji. Sadza jako produkt reakcji niepełnego utlenienia zawiera pewne ilości połączeń eterowych, fenolowych i karbonylowych (rys. 1). Właściwe prowadzenie procesu spalania paliw kopalnych z zastosowaniem dodatków, powinno przynosić nie tylko korzyści technologiczne, ale również środowiskowe, dlatego jego odpowiedni dobór jest kwestią szczególnie istotną.

3. SKŁAD CHEMICZNY DODATKÓW DO PALIW

Związki chemiczne zawarte w dostępnych dodatkach paliwowych działają według różnych mechanizmów chemicznych, jednak właściwa, czynna postać powstaje *in situ* w komorze spalania w wysokiej temperaturze. Składniki obecne w dodatkach do paliw, ze względu na ich właściwości, dzieli się na:

- utleniające,
- katalizatory reakcji utleniania,
- mające możliwość wiązania gazowych tlenków kwasowych,
- antykorozyjne,
- antyzbrylające,
- zapalne,
- mające zdolność sublimacji,
- wypełniacze.

Problemy związane z niecałkowitym spalaniem paliw próbowano rozwiązać na przestrzeni dziesięcioleci. Wynikiem badań było opracowanie szeregu rozwiązań patentowych w obrębie składu chemicznego oraz technik dawkowania chemikaliów (Borisovna 1994; Bodo, Fayle 2007; Majcher 2010). Od wielu lat panował pogląd, iż wprowadzenie NaCl, pozytywnie wpływa na przebieg procesu spalania węgla. W 1994 r. Borisovna opatentowała wynalazek polegający na okresowym dawkowaniu chlorku sodu w procesie spalania węgla kamiennego (Borisovna 1994). Określono optymalną dawkę na poziomie 7–8 g NaCl/m² powierzchni paleniska. Wprowadzenie dodatku zwiększyło wydajność grzewczą instalacji. Stwierdzono redukcję ilości emitowanych zanieczyszczeń CO i NO_x do atmosfery oraz możliwość zmniejszenia współczynnika nadmiaru powietrza w spalinach i zmniejszenie spalinowych strat ciepła o około 12%. Doświadczalnie (z zastosowaniem istniejącej instalacji grzewczej) wykazano, iż sól kamienna determinuje kinetykę strefy spalania. Chlorek sodu to substancja powszechnie występująca w składzie dodatków do paliw, jednak najczęściej stosowana w połączeniu z innymi substancjami chemicznymi. Naukowe uzasadnienie wpływu NaCl na otrzymane wyniki nie zostało dotychczas w przekonujący sposób wyjaśnione (Szkarowski, Naskręt 2011).

Skutecznym sposobem usuwania sadzy jest wprowadzenie do paleniska mieszaniny utleniaczy. W wysokiej temperaturze następuje termiczny rozkład soli nieorganicznych, takich jak azotany (V) lub manganiany (VII). Powstający *in situ* tlen wykazuje dużą reaktywność, dzięki czemu możliwe jest utlenienie sadzy w stosunkowo niskiej temperaturze. Zaletą metody utleniania w oparciu o związki silnie utleniające jest wytworzenie dużej objętości gazów wskutek rozkładu niewielkiej ilości wprowadzanej substancji. Powstający w ten sposób gaz dobrze penetruje powierzchnię wymiennika ciepła, nawet w miejscach, gdzie mechaniczne czyszczenie jest bardzo uciążliwe. Na polskim rynku dostępne są dodatki paliwowe zawierające azotany potasu i sodu. Do najpopularniejszych zalicza się następujące produkty: Nitrolen, Kalnit, Diavolina.

Nitrolen stosowany jest z powodzeniem w energetyce zawodowej od blisko dwudziestu lat. Jego właściwe stosowanie znacząco obniża temperaturę spalin, dzięki czemu można osiągnąć oszczędność paliwa rzędu 5%². Ciągłe stosowanie tego dodatku powoduje obniżenie emisji pyłów, tlenków azotu oraz tlenków siarki. Według informacji producenta ponad 300 zakładów energetyki ciepłej użytkuje ten produkt w celu optymalizacji pracy instalacji paleniskowych³. Producent zaleca dawkovanie Nitrolenu w ilości około 100 g/Mg paliwa.

Kolejnym, skutecznym dodatkiem paliwowym jest Kalnit. To mieszanina związków chemicznych, takich jak: azotan (V) potasu, tlenek magnezu, siarka, mączka drzewna oraz krzemionka. Stosowany jest od kilkunastu lat przez zakłady energetyki ciepłej oraz użytkowników indywidualnych. Dostępne są gatunki Kalnit z przeznaczeniem do stosowania w instalacjach wyposażonych w kotły węglowe, pyłowe oraz wykazujące szczególną podatność na szlakowanie.

² <http://www.nitrolen.pl/ekonomia.html>

³ <http://www.nitrolen.pl/index.html>

Pomimo licznych zalet stosowania preparatów zawierających utleniacze, rynek dodatków paliwowych stałych zdominowany jest przez mieszanki zawierające sole metali przejściowych. Katalizują one procesy utleniania sadzy tlenem atmosferycznym zawartym w powietrzu doprowadzanym do komory spalania. Wśród omawianej grupy preparatów to sole miedzi są podstawą większości kompozycji. Najczęściej stosowane substancje czynne w mieszkach paliwowych to: CuSO_4 , CuCl_2 , $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$ oraz organiczne sole miedzi.

W krajowej energetyce ciepłowniczej, szeroko stosowane są preparaty miedziowe o nazwach: Sadpal i Pentomag. Dla użytkowników indywidualnych, stosujących dodatki do paliw stałych, dostępne są preparaty: Sadpal, Palsad, Flamit, Fidibus, Anti-suie. Skład dodatku charakteryzuje się następującą zawartością (Gwardiak, Gwardiak 2010):

- 38–42% wag. uwodnionego siarczynu miedzi,
- 40–44% wag. chlorku sodu,
- 5% wag. chlorku amonu,
- 8% wag. węglanu wapnia oraz 5% wag. krzemionki.

Wysoką skuteczność dodatku osiągnięto, dzięki właściwemu doborowi składników oraz rozdrobnieniu ziaren preparatu poniżej 100 μm . Producenci Sadpalu wykonali szereg badań w uznanych ośrodkach badawczych, potwierdzając tym samym wysoką skuteczność oferowanego dodatku paliwowego⁴. Wykazano, że katalizator do wypalania sadzy redukuje zapotrzebowanie na paliwo, zwiększa sprawność cieplną kotłów oraz zmniejsza ryzyko zapłonu sadzy w przewodach dymnych. Stosowanie dodatku zmniejsza o około 100°C temperaturę spalin. Tym samym powoduje ograniczenie strat kominowych, gdyż obniżenie temperatury spalin o około 17°C daje oszczędność spalnego paliwa o około 1% (Gwardiak, Gwardiak 2010). Działanie powstających produktów termicznego rozkładu dodatku, ma silnie penetrujące działanie i wysoką skuteczność w usuwaniu nagromadzonych złożeń ze ścianek elementów grzewczych. Substancjami aktywnymi w procesie katalitycznego utleniania depozytów węglowych są związki chemiczne, powstałe w efekcie termicznego rozkładu składników dodatku. W wyniku rozkładu uwodnionego siarczynu (VI) miedzi (II) powstaje tlenek miedzi (II), który pełni funkcję katalityczną w procesie utleniania sadzy. Jego działanie polega na obniżeniu temperatury utleniania sadzy. Proces niekatalizowanego utleniania sadzy przebiega w temperaturze około 900°C, podczas gdy katalityczne utlenienie może przebiegać już w temperaturze około 400°C. Rozkład CuSO_4 następuje w kontakcie z żarzącym się węglem w temperaturze około 540°C, natomiast rozkład CuO w temperaturze około 1000°C (Gwardiak, Gwardiak 2010). W obecności węgla i atmosfery redukującej, ma miejsce przekształcenie związków miedzi do miedzi metalicznej w niższej temperaturze, niż to ma miejsce w procesach niekatalizowanych. Chlorek sodu w warunkach panujących w komorze spalania rozkłada się częściowo do chlorowodoru i tlenku sodu, pozostała część wchodzi zaś w skład popiołu i żużlu. Chlorowodór, reagując z tlenkami stanowiącymi zawartość szlaki, powoduje zmiany chemiczne w jej składzie, a powstałe chlorki metali są łatwiejsze do usunięcia niż spieki tlenkowe. Chlorek amonu sublimuje w temperaturze

⁴ <http://www.skwat.com.pl/sadpal,2.php>

około 340°C, w wyższej zaś temperaturze rozkłada się do chlorowodoru i amoniaku. Obecność amoniaku chroni instalację przed korozją nisko- i wysokotemperaturową. Istnieje pogląd, według którego mieszaniny chlorków wykazują efekt synergetyczny w kierunku usuwania depozytów węglowych. Są one jednak źródłem chloru w reakcji syntezy toksycznych ksenobiotyków według mechanizmu *de novo* (Grabiec i in. 2002). Znanych jest wiele chemikaliów, ułatwiających przebieg reakcji utleniania paliwa w kierunku tworzenia się końcowego produktu reakcji, czyli ditlenku węgla, jednak spośród uznanych za najbardziej skuteczne przyjmuje się związki miedzi.



Fot. 1. Wypalanie sadzy na powierzchni wymiennika ciepła
Photo. 1. Soot combustion on the surface of heat exchanger

Katalityczne utlenianie sadzy odbywa się w kanałach dymnych oraz na powierzchni wymienników ciepła (fot. 1). W przypadku silnie zanieczyszczonych przewodów kominowych zaleca się uprzednio oczyścić je mechanicznie. Prowadzenie procesu chemicznego oczyszczania kotła silnie zanieczyszczonego sadzą, jest przyczyną wydzielania się dużej ilości ciepła, co może powodować podwyższoną korozję lub uszkodzenie kanałów spalinowych.

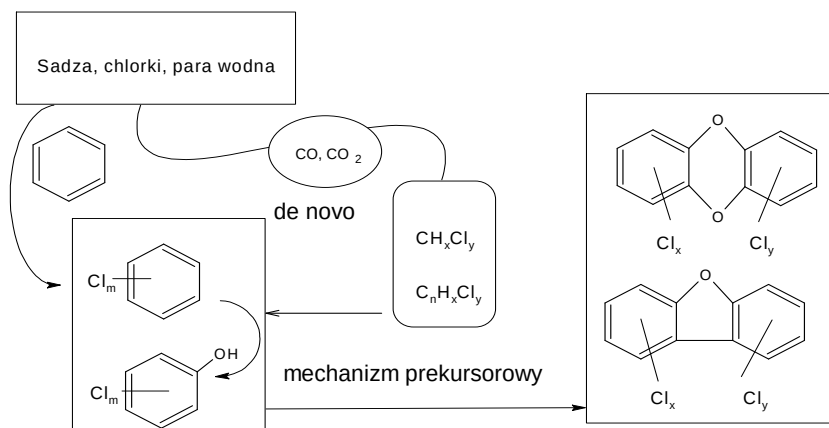
4. DIOKSYNY W PROCESACH SPALANIA

Polichlorowane dibenzo-p-dioksyne i polichlorowane dibenzofurany (ogólnie dioksyne, PCDD/F) to związki chemiczne obejmujące 210 kongenerów, wykazujące zróżnicowaną toksyczność wyrażoną jako TEQ (z ang. *Toxic Equivalent*). PCDD/F występują w środowisku w znikomo małych ilościach. Z uwagi na swoje właściwości toksykologiczne, potwierdzone licznymi badaniami, należą do najniebezpieczniejszych związków pochodzenia antropogennego (Makles, Świątkowski, Grybowska 2001). Podstawowym źródłem obecności dioksyn w środowisku są procesy termiczne. Wszędzie tam, gdzie spalane jest paliwo stałe, dostępne są surowce syntezy dioksyn. PCDD/F powstają w wyniku reakcji odpowiednich prekursorów lub przy udziale syntezy *de novo*. W zależności od mechanizmu syntezy dioksyn mówi się o profilu dioksynowym (PCDD) lub furanowym (PCDF) powstałych kongenerów. Spalanie węgla kamiennego najczęściej charakteryzuje profil furanowy, natomiast spalanie drewna cechuje profil paradioksynowy. Niekontrolowane spalanie odpadów komunalnych w piecach, kotłach na wolnym powietrzu jest źródłem znacznej emisji toksycznych związków. Spalanie odpadów, ze względu na skład chemiczny paliwa, warunki termiczne i fizykochemiczne, stanowi idealne warunki syntezy PCDD/F. Przebieg proce-

su *de novo* prowadzi do powstawania różnorodnych ksenobiotyków, takich jak: PCDD/F, polichlorowanych eterów oraz polichlorowanych bifenyli (PCB).

Synteza dioksyn w reakcji *de novo* przebiega z największą wydajnością, w zakresie temperatur nazywanym oknem dioksynowym 200–400°C (Fujimori i in. 2010). Mechanizm syntezy dioksyn z udziałem reakcji *de novo*, sprzyja powstawaniu kongenerów o wyższych liczbach atomów chloru w cząsteczce.

Źródłem węgla w syntezie *de novo* dioksyn mogą być (rys. 2): węgiel elementarny, węgiel kamienny oraz węgiel drzewny powstający podczas termicznej degradacji drewna. Źródłem chloru i metali katalizujących tworzenie chloropochodnych ksenobiotyków w oparciu o materię nieorganiczną jest lotny popiół.



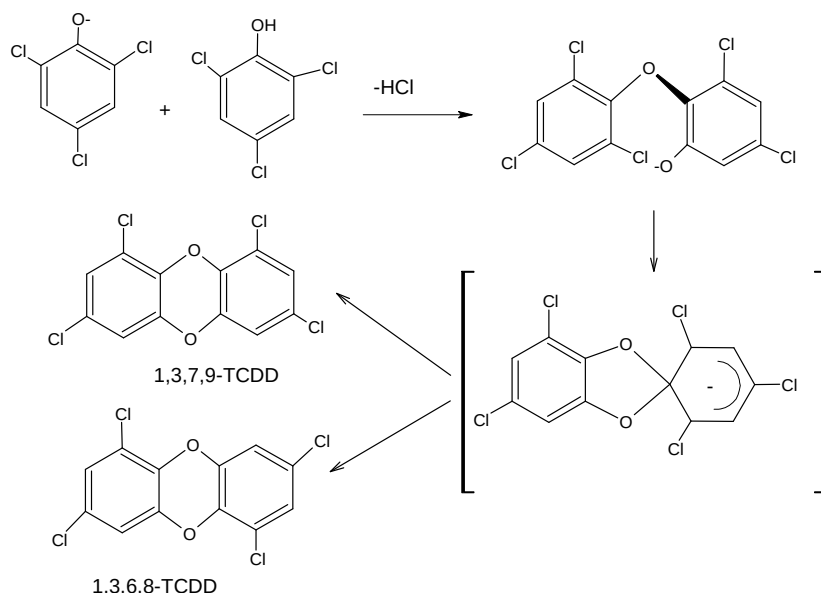
Rys. 2. Synteza PCDD/F według mechanizmu *de novo*

Fig. 2. PCDD/F synthesis according to *de novo* pathway

Paliwa kopalne oraz drewno zawierają pewne ilości związków nieorganicznych, w tym chlorków metali, wykazujących aktywność katalityczną wielu reakcji chemicznych. Zawarte w węglu, drewnie związki miedzi, manganu, chromu, żelaza odgrywają rolę katalizatorów syntezy dioksyn (Olie, Addink, Schoonenboom 1998).

W syntezie *de novo* stężenie chloru w fazie gazowej nie ma wpływu na ilość tworzących się dioksyn. Powstające w tych warunkach dioksyny tworzą charakterystyczny profil (wzajemne proporcje stężenia poszczególnych związków). W syntezie *de novo* z większą wydajnością powstają PCDF, podczas gdy w reakcji prekursorów głównymi produktami są PCDD.

Syntezę dioksyn w procesach rekombinowanych tłumaczy (rys. 3) reakcja prekursorów w fazie gazowej (> 500°C) i stałej w przedziale temperatur 250–400°C, w rezultacie chlorowania związków aromatycznych na powierzchni lotnego popiołu. Popiół jest dobrym adsorbentem dla prekursorów i produktów reakcji, jednocześnie stanowi odpowiednie podłoże reakcyjne. Prekursorami syntezy dioksyn mogą być związki aromatyczne i alifatyczne. Dane doświadczalne wskazują, że popiół lotny może stanowić źródło chloru i jonów metali katalizujących proces syntezy (Long i in. 2011a).



Rys. 3. Synteza TCDD według mechanizmu prekursorowego

Fig. 3. TCDD synthesis according to precursor pathway

W trakcie procesów termicznych przebiegają reakcje chemiczne prowadzące do wytworzenia toksycznych zanieczyszczeń. Synteza PCDD/F zachodzi z udziałem zarówno etapu *de novo*, jak i reakcji syntezy przy udziale prekursorów. Ilość powstałych toksyn stanowi suma poszczególnych składowych.

5. KATALIZATORY I INHIBITORY SYNTEZY DIOKSYN

W zależności od składu chemicznego użytego dodatku paliwowego, wprowadzane są substancje wpływające pozytywnie bądź negatywnie na poziom dioksyn w produktach spalania. Jednocześnie mogą być zastosowane substancje, których wpływ na syntezę PCDD/F jest przeciwny. Na polskim rynku dostępny jest preparat produkcji włoskiej, zawierający głównie siarkę rodzimą i chlorek sodu. Drugi z nich dostarcza chloru niezbędnego do tworzenia związków chloroorganicznych. Siarka i jej związki inhibują proces syntezy dioksyn, w wyniku przekształcania $CuCl_2$ (najbardziej wydajnego katalizatora syntezy dioksyn) w znacznie mniej aktywny katalitycznie $CuSO_4$. Innym działaniem siarki, przyczyniającym się do obniżenia poziomu omawianych zanieczyszczeń, jest tworzenie siarkowych analogów dioksyn, wykazujących mniejszą toksyczność niż ich tlenowe odpowiedniki. Inhibitorami syntezy PCDD/F są również połączenia, które w różny sposób konkurują z reakcjami ich tworzenia. Najważniejszymi inhibitorami syntezy PCDD/F są:

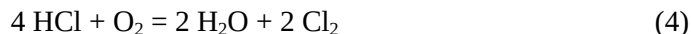
- tlenek wapnia,
- amoniak,
- siarczan amonu,

- siarczan sodu,
- tiosiarczan sodu,
- wodorofosforan (V) amonu sodu,
- siarka,
- dolomit.

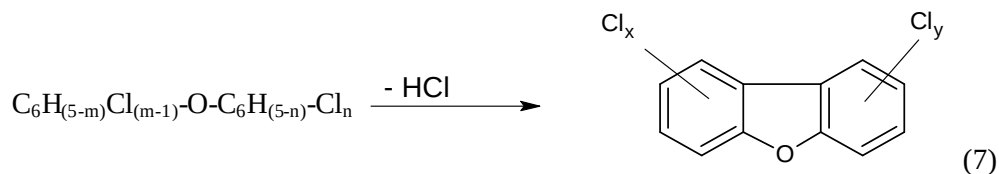
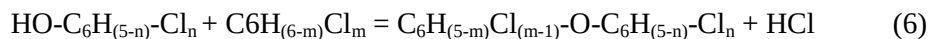
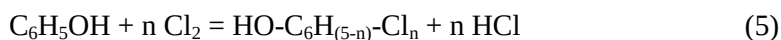
Związki organiczne redukujące ilość dioksyn w produktach spalania to:

- pirydyna,
- chinolina,
- mocznik,
- glikol etylenowy,
- aminy,
- EDTA.

Powyższe chemikalia działają na zasadzie eliminowania cząsteczkowego chloru ze środowiska reakcji (1) oraz wiązania chlorowodoru (2), (3), ograniczając możliwość przebiegu reakcji Deacona (4).



Chlor obecny w fazie gazowej reaguje z cząsteczkami związków organicznych, wytwarzając odpowiednie chloropochodne (5). W kolejnych reakcjach, organiczne pochodne chloru przechodzą procesy chemicznej przemiany, której produktami są m.in. polichlorowane etery (6). Jako prekursory dioksyn są one zdolne do dalszych reakcji (7), prowadząc do powstania cząsteczek furanów



W instalacjach przemysłowych, wprowadzenie odpowiedniego dodatku do paliw jest w stanie obniżyć ilość powstających dioksyn o 90%, jednocześnie, ze względu na aktywność w procesie DeNOx, obniżyć ilość emitowanych tlenków azotu. Do takich dodatków należą mocznik i amoniak. Roztwór mocznika stosowany jest również ze względów ekologicznych w nowoczesnych samochodach ciężarowych. Jednak jego użycie poprawia jakość spalin, zmniejszając tym samym wskaźniki emisji zanieczyszczeń do atmosfery (Long i in. 2011a).

6. PODSUMOWANIE

Stosowanie dodatków paliwowych ma uzasadnienie ekonomiczne, jak również wpływ na środowisko. Użytkownicy indywidualni i energetyka zawodowa mają wybór, gdyż dostępnych jest wiele preparatów, których stosowanie powoduje podobny skutek. Obecny stan wiedzy w zakresie warunków i mechanizmów syntezy związków chloroorganicznych wskazuje jednoznacznie na związek między ilością emitowanych chloropochodnych ksenobiotyków, a składem paliwa. Dodatkowe wprowadzenie np. saszetki katalizatora, zawierającej 40 g soli miedzi i 40 g chlorku sodu, stanowi potencjalne zagrożenie, związane z możliwością zwiększenia emisji trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO). Stosowanie dodatków do paliw, które w swym składzie zawierają związki miedzi i chloru, powinno być zaniechane, gdyż ich wpływ na środowisko jest jednoznacznie udokumentowany. Istnieje duża liczba wiarygodnych badań wskazujących na korelację między zawartością wskazanych pierwiastków obecnych w paliwie, a poziomem związków z grupy trwałych zanieczyszczeń organicznych, takich jak chlorobenzeny, polichlorowanebifenyle (PCB) i dioksyny (PCDD/F) (Hunsinger, Jay, Vehlow 2002; Lee i in. 2005; Wey i in. 2008; Chin i in. 2011). Jednocześnie dostępnych jest wiele specyfików o podobnym działaniu, których skład chemiczny nie wzbudza zastrzeżeń w kontekście ochrony środowiska, a nawet może powodować redukcję wskaźników emisji. Nie oznacza to jednak, że zawsze wprowadzenie dodatku paliwowego, będącego źródłem chloru i miedzi, zwiększy emisję dioksyn. Dla nowoczesnych instalacji przemysłowych spalających węgiel, spalarni odpadów komunalnych, spalarni odpadów szpitalnych, cementowni oraz hut, opracowuje się już na etapie projektowania i doboru warunków technologicznych procesu, rozwiązania konstrukcyjne, które ograniczają występowanie obszarów termodynamicznie i kinetycznie sprzyjających syntezie dioksyn. W przypadku domowych instalacji grzewczych, opalanych węglem, warunki syntezy dioksyn są bardzo sprzyjające, dlatego kluczową kwestią jest skład spalanego paliwa i używanych dodatków paliwowych. Polska jako sygnatariusz Konwencji Sztokholmskiej zobowiązała się do działań, które będą ograniczały możliwości powstawania wybranych związków chemicznych, określanych mianem trwałe zanieczyszczenia organiczne. Jednocześnie w ramach zobowiązań ekologicznych Unia Europejska wyznaczyła na 2020 r. cele ilościowe, tzw. „3 × 20%”. Oznacza to zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do 1990 r., zmniejszenie zużycia energii o 20% w porównaniu z prognozami dla UE na 2020 r., zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych o 20%. Przyjmując za producentami dodatków paliwowych, że ich stosowanie ogranicza zużycie paliwa o 5–20%, technologia lepszego wykorzystania paliw kopalnych, stwarza szansę dla Polski na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Literatura

1. Bodo L., Fayle J. (2007): Produit de ramonage chimique. Patent nr 1254946. Europejski Urząd Patentowy. Opis patentowy z 14.02.2007.
2. Borisovna E.O. (1994): Method of burning solid piece fuel in layers. Patent nr 201116. Urząd Patentowy Federacji Rosyjskiej. Opis patentowy z 15.04.1994.

3. Chin Y.T., Lin C., Chang-Chieng G.P., Wang Y.M. (2011): PCDD/Fs formation catalyzed by the copper chloride in the fly ash. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. Vol. 46(5), s. 465–470.
4. Dockery D.W., Stone P.H. (2007): Cardiovascular risks from fine particulate air pollution. *The New Journal of Medicine* Vol. 356(5), s. 511–513.
5. Fujimori T., Tanino Y., Takaoka M., Morisawa S. (2010): Chlorination mechanism of carbon during dioxin formation using Cl-K near-edge X-ray absorption fine structure. *Analytical Sciences* Vol. 26, s. 1119–1125.
6. Grabic R., Pekárek V., Fišerová E., Ullrich J., Karban J., Crhová S., Tomšej T. (2002): Study of the effect of matrix on formation of PCDD, PCDF, PCB and PCBZ by de novo synthetic reactions under model laboratory conditions. *Organohalogen Compounds* Vol. 56, s. 205–208.
7. Gwardiak St., Gwardiak W. (2010): Katalizator do spalania sadzy. Patent nr 207482. Urząd Patentowy RP. Opis patentowy z 31.12.2010.
8. Halonen I., Terhanen J., Ruokojärvi P., Tuppurainen K., Ruuskanen J. (1995): Effect of catalysts and chlorine source on the formation of organic chlorinated compounds. *Chemosphere* Vol. 30, No. 7, s. 1261–1273.
9. Hunsinger H., Jay K., Vehlow J. (2002): Formation and destruction of PCDD/F inside a grate furnace. *Chemosphere* Vol. 46, No. 9–10, s. 1263–1272.
10. Jędrychowski W.A., Perera F.P., Pac A., Jacek R., Whyatt R.M., Spengler J.D., Dumyah T.S., Sochacka-Tatara E. (2006): Variability of total exposure to PM_{2.5} related to indoor and door pollution sources Kraków study in pregnant women. *Science of the Total Environment* Vol. 366(1), s. 47–54.
11. Lee R.G.M., Coleman P., Jones J., Jones K.C., Lohmann R. (2005): Emission factors and importance of PCDD/Fs, PCBs, PCNs, PAHs, and PM₁₀ from the domestic burning of coal and wood in the U.K. *Environmental Science and Technology* Vol. 39(6), s. 1436–1447.
12. Lin J.H. (2002): Identification of the surface characteristics of carbon blacks by pyrolysis GC-MASS. *Carbon* Vol. 40, s. 183–187.
13. Long H.M., Li J.X., Wang P., Gao G., Tang G.W. (2011a): Emission reduction in iron ore sintering by adding urea as inhibitor. *Ironmaking & Steelmaking* Vol. 38(4), s. 258–262.
14. Long H.M., Li J.X., Wang P., Wei R. (2011b): Synthesis pathway in iron ore sintering process. *Advanced Materials Research*. Vol. 194-196, s. 71–74.
15. Majcher M. (2010): Modifier of combustion of solid, liquid and gaseous. Patent nr 2226377. Europejski Urząd Patentowy. Opis patentowy z 8.09.2010.
16. Makles Z., Świątkowski A., Grybowska S. (2001): Niebezpieczne dioksyne. Warszawa, „Arkady”.
17. Olie K., Addink R., Schoonenboom M. (1998): Metals as catalysts during the formation and decomposition of chlorinated dioxins and furans in incineration processes. *Journal of the Air and Waste Management Association* Vol. 48, s. 101–105.
18. Sawicki T. (2004): Oddziaływanie tlenku węgla na strażaków w warunkach akcji ratowniczo-gaśniczych. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 4, s. 28–29.
19. Szkarowski A., Naskręt L. (2011): Poprawa efektywności i jakości warstwowego spalania paliwa. *Magazyn Instalatora* nr 2 (150), s. 24–25.
20. Wey M.Y., Liu K.Y., Yu W.J., Lin C.L., Chang F.Y. (2008): Influences of chlorine content on emission of HCl and organic compounds in waste incineration using fluidized beds. *Waste Management* Vol. 28(2), s. 406–415.

Krystyna Czaplicka-Kolarz*, Anna Śliwińska*, Jerzy Świądrowski*

ALTERNATYWNE OBNIŻENIE EMISJI GAZÓW CIEPLARNIANYCH W CYKLU ŻYCIA BLOKU IGCC PRZEZ USUWANIE DWUTLENKU WĘGLA LUB/I ZAGOSPODAROWANIE METANU W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę potencjalnych korzyści dla środowiska, jakie płyną z wykorzystania CH_4 w kopalniach węgla kamiennego, w cyklu życia systemu: kopalnia – blok gazowo-parowy zintegrowany ze zgazowaniem węgla (ang. *Integrated Gasification Combined Cycle* – IGCC). Następnie wyniki porównano z możliwymi korzyściami osiągalnymi wskutek wychwytywania CO_2 .

W perspektywie całego cyklu istnienia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla najważniejsze są następujące czynniki: emisja CO_2 , sprawność wytwarzania energii elektrycznej i wielkość zużycia węgla. Zastosowanie układu wychwytywania CO_2 przyczynia się do zmniejszenia potencjału cieplarnianego w cyklu życia, a w konsekwencji do obniżenia jego sprawności. W rezultacie następuje wzrost oddziaływania na środowisko we wszystkich pozostałych kategoriach wpływu, szczególnie związanych z wyczerpywaniem się paliw kopalnych.

Zagospodarowanie CH_4 w kopalni, szczególnie z układów wentylacyjnych, może przyczynić się do poprawy oddziaływania systemów energetycznych na środowisko, chociaż w porównaniu do sekwestracji w znacznie mniejszym stopniu. W przeciwieństwie do sekwestracji, zagospodarowanie CH_4 nie wpływa na zwiększenie oddziaływania w innych kategoriach. Mimo to może wiązać się z dodatkowymi korzyściami w postaci zysków ze sprzedaży produktów ubocznych omawianego procesu – energii elektrycznej i ciepła.

Alternative decrease of greenhouse gas emissions in the life cycle of the IGCC through carbon dioxide removal or/and methane management in hard coal mines

Abstract

The article presents the analysis of potential advantages for the environment related to the use of CH_4 in hard coal mines in the life cycle system: mine – Integrated Gasification Combined Cycle Plant – IGCC. Next the results were compared with the possible benefits accessible due to CO_2 capture.

In the perspective of the whole cycle of existence of the integrated gasification combined cycle block most important are the following factors: CO_2 emissions, efficiency of electric energy generation and coal consumption quantity. The application of the CO_2 capture system contributes to the decrease of the greenhouse potential in the life cycle and in consequence to the reduction of its efficiency. As a result follows the growth of impact on the environment in all remaining impact categories, particularly connected with fossil fuels exhaustion.

CH_4 management in the mine, especially from ventilation systems, can contribute to the improvement of impact of energy systems on the environment, though in comparison with sequestration to a considerably smaller extent. In contradiction to sequestration, CH_4 management does not influence the increase of impact in other categories. In spite of this it can be connected with additional advantages in the form of profits from the sale of by-products of the discussed process – electric energy and heat.

* Główny Instytut Górnictwa

1. WPROWADZENIE

Uwzględniając wymogi bezpieczeństwa energetycznego Polski, a szczególnie założenia „Polityki Energetycznej do 2030 roku” (2009), przewiduje się pozyskiwanie znacznej części energii elektrycznej z węgla. Pojawiające się kolejne wymagania: redukcja emisji, planowane zaostrzenie restrykcji emisyjnych przed 2050 r., zwiększenie opłat z tego tytułu oraz prawdopodobne obniżenie limitów emisji CO₂, wymuszają na producentach energii wdrożenie technologii sekwestracji CO₂. Są to jednak decyzje trudne i bardzo dyskusyjne zarówno w Polsce, jak i na świecie. Do 2015 r. planuje się w naszym kraju uruchomienie instalacji pilotażowej i demonstracyjnej w elektrowni Bełchatów [27–28 TWh energii elektrycznej z roczną emisją 29,5 mln ton CO₂ (1076 kg/MWh)]¹.

Wychwytywanie CO₂ wydaje się najbardziej osiągalnym sposobem spełnienia wymogów dotyczących emisji gazów cieplarnianych w Polsce z sektora energetyki węglowej. Jednak zgodnie z wynikami analiz (Meier 2002), długoterminowe planowanie struktury wytwarzania energii i tworzenie polityki energetycznej państwa powinno odbywać się na podstawie wyników oceny cyklu życia – od wydobywania węgla do zagospodarowania odpadów. Sekwestracja CO₂ jest często przedmiotem analiz cyklu życia (Waku i in. 1995; Reuther 2004; Hondo 2005; Weisser 2007; Odeh, Cockerill 2007, 2008; Hertwich i in. 2008; Modahl i in. 2009; Suebsiri, Manuilova, Wilson 2009; Schreiber, Zapp, Kuckshinrichs 2009; Korre, Nie, Durucan 2009, 2010; Wu i in. 2011). Niedawno został opublikowany przegląd różnych sposobów oceny środowiskowej sekwestracji (Marx i in. 2011). Jednocześnie z punktu widzenia cyklu życia, zagospodarowanie CH₄ uwalnianego w trakcie wydobywania węgla, to dodatkowo, a często pomijany potencjał obniżenia efektu cieplarnianego energetyki węglowej.

Wyniki analiz przeprowadzonych w cyklu życia elektrowni węglowych pokazują, iż bardzo istotna część oddziaływania i emisji gazów cieplarnianych jest związana właśnie z wydobywaniem węgla.

W polskich kopalniach większość wydobywanego węgla pochodzi z pokładów metanowych. Emisja CH₄ zwiększa się w wyniku eksploatacji pokładów węgla położonych coraz głębiej. Obecnie wydobywanie tony węgla powoduje emisję ponad 10 m³ CH₄, podczas gdy dziesięć lat wcześniej wynosiła ona około 6,5 m³. Wzrasta zatem znaczenie zagospodarowania CH₄ z kopalń. Obecnie jedynie 20% CH₄ wydzielającego się w ciągu roku w polskich kopalniach jest wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu. Pozostała część jest emitowana do powietrza. Jedną z przyczyn tego zjawiska jest niska zawartość CH₄ w powietrzu wentylacyjnym, która utrudnia jego wykorzystanie (Somers, Schultz 2008). Ważne jest również ryzyko związane z prognozami pozyskania CH₄ w przyszłości.

Śliwińska i Czaplicka-Kolarz (2012) przeprowadziły analizę korzyści dla środowiska wynikających z wykorzystania CH₄ w kopalniach węgla kamiennego w cyklu życia różnych systemów energetycznych. W niniejszym artykule dokonano takiego porównania dla bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (IGCC). Potencjalne korzyści przyrównano do korzyści osiągalnych w wyniku wy-

¹ <http://www.elbelchatow.pgegiek.pl/>

chwytywania CO₂. Następnie, przedstawiono analizowany system energetyczny – instalację IGCC oraz procesy uwzględnione w cyklu życia, w tym różne sposoby zagospodarowania CH₄ z procesu wydobywania węgla. Założono także różne scenariusze, łączące zagospodarowanie CH₄ z kopalni ze stosowaniem lub nie technologii CCS w instalacjach IGCC.

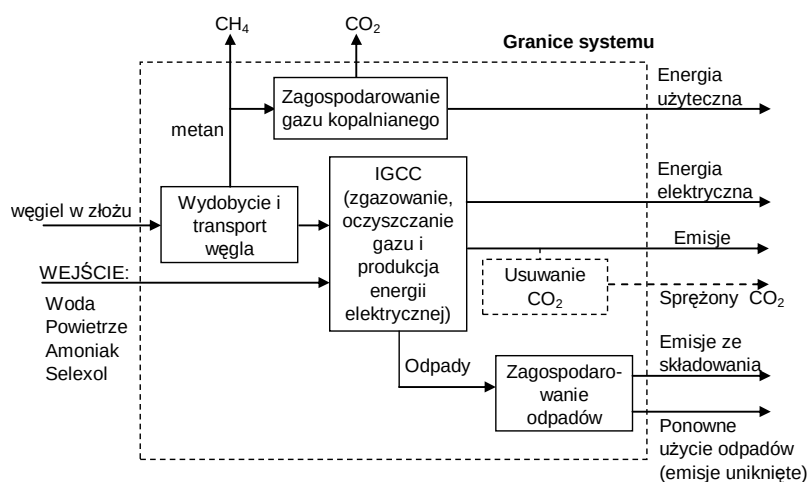
Analiza cyklu życia (LCA) uwzględniająca całe łańcuchy technologiczne od wydobywania węgla, poprzez wytwarzanie energii elektrycznej, łącznie z oceną emisji do środowiska, umożliwia prowadzenie dyskusji zgodnej z tytułem niniejszego artykułu.

2. ZAKRES I METODYKA ANALIZY

W niniejszym artykule poddano analizie oddziaływanie zagospodarowania CH₄ w kopalni na środowisko dwóch wariantów systemów IGCC. W jednym z nich system został doposażony w instalację wychwytywania CO₂. Należy dodać, że określenie: system IGCC będzie obejmować cały cykl życia systemu energetycznego – począwszy od wydobywania węgla, poprzez wytwarzanie elektryczności, kończąc na zagospodarowaniu odpadów. Przeprowadzając analizę (rys. 1) uwzględniono m.in.:

- wydobywanie węgla (w tym emisję i/lub zagospodarowanie CH₄),
- transport węgla do elektrowni,
- funkcjonowanie elektrowni IGCC (w tym zgazowanie, oczyszczanie gazu i wytwarzanie energii elektrycznej),
- zagospodarowanie odpadów.

Badania obejmowały także procesy wytwarzania niezbędnych materiałów i surowców.



Rys. 1. Uproszczony schemat cyklu życia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (oprac. własne)

Fig. 1. Simplified scheme of the life cycle of the integrated gasification combined cycle block (own study)

Blok IGCC zostanie rozpatrzony w dwóch wariantach, tzn. łącznie z CCS oraz bez tego procesu. Analizy wstępne wykazały, że w przypadku sekwestracji najistotniejsze z punktu widzenia LCA są operacje związane z wychwytem CO₂, regeneracją rozpuszczalnika oraz sprężaniem strumienia CO₂. Powyższe elementy łańcucha technologii zostały wzięte pod uwagę w dalszej analizie. Odległości transportu i głębokość zatłaczania CO₂ są obarczone dużą niepewnością, związaną z: wyborem miejsca składowania oraz sposobem przesyłu, zatłaczania i składowania. W niniejszej analizie nie brano ich pod uwagę. Przyjęto jedynie ciśnienie sprężania CO₂ w wysokości 15,3 MPa. Jako jednostkę funkcjonalną analiz przyjęto natomiast ilość energii elektrycznej netto, a rezultaty analiz przeliczono na 1 MWh.

Jednym z głównych celów przeprowadzonych analiz była identyfikacja najważniejszych kwestii środowiskowych związanych ze zwiększeniem wykorzystania CH₄ w kopalniach. Wykorzystano analizę porównawczą różnych teoretycznych scenariuszy zagospodarowania CH₄ w kopalni, a obliczone potencjalne korzyści przyrównano do skutków sekwestracji w elektrowni IGCC. Założenia rozpatrywanych scenariuszy zostaną omówione w osobnym rozdziale, w dalszej części niniejszego artykułu.

W trakcie analiz LCA korzystano z zaleceń, które zostały zawarte w normach 14040 (ISO 14040:2009; ISO 14044:2009). Ich ocena przebiegała w czterech etapach:

- (1) definicja celu i zakresu,
- (2) analiza wejść i wyjść (zbieranie danych),
- (3) ocena wpływu,
- (4) interpretacja.

Analizy przeprowadzono przy użyciu programu SimaPro v.7.3. Zastosowano trzy różne metody oceny wpływu, a wśród nich „IPCC 2007 GWP 100a”, „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008”.

Pierwsza metoda „IPCC 2007 GWP 100a” została opracowana przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmiany Klimatu (IPCC). Wykorzystano w niej współczynniki zmian klimatycznych zdefiniowane przez IPCC, odnoszące się do oddziaływania w ciągu 100 lat. Metoda służy ocenie pojedynczej kategorii wpływu środowiskowego, wywołanego przez badany system – obliczenie emisji gazów cieplarnianych (GHG) w całym cyklu życia.

Dwie pozostałe metody, tj. „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008” służą do kompleksowej oceny szkód w środowisku, ujmując: zdrowie ludzkie, różnorodność gatunkową ekosystemów i zasoby surowców nieodnawialnych. „Ekowskażnik 99” jest metodą powszechnie stosowaną (Czaplicka-Kolarz, red. 2002; DiMaria, Saetta, Leonardi 2003; Czaplicka-Kolarz, Ściążko, red. 2004; DiMaria, Fantozzi 2004; Grammelis, Skodras, Kakaras 2006; Kleiber, red. 2011) i obejmuje ocenę większości aspektów oddziaływania na środowisko. „ReCiPe 2008” został utworzony niedawno w celu ulepszenia metodologii analiz cyklu życia. Czytelnikowi zainteresowanemu metodyką „Ekowskażnika 99” i „ReCiPe 2008” poleca się materiały źródłowe (Goedkoop, Spriensma 2000; Goedkoop, Heijungs i in. 2009).

Tabela 1. Kategorie szkód i kategorie wpływu stosowane w metodach oceny „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008” (Śliwińska, Czaplicka-Kolarz 2012)

Kategoria szkód	Kategoria wpływu	
	„Ekowskażnik 99”	ReCiPe 2008
Zdrowie ludzkie	Rakotwórczość (<i>Carcinogens</i>)	Zmiany klimatu – Zdrowie ludzkie (<i>Climate change human health</i>)
	Układ oddechowy – substancje organiczne (<i>Respiratory organics</i>)	Zubożenie warstwy ozonowej (<i>Ozone depletion</i>)
	Układ oddechowy – substancje nieorganiczne (<i>Respiratory inorganics</i>)	Toksyczność dla ludzi (<i>Humane toxicity</i>)
	Zmiany klimatu (<i>Climate change</i>)	Tworzenie ozonu fotochemicznego (<i>Photochemical oxidant formation</i>)
	Promieniotwórczość (<i>Radiation</i>)	Tworzenie pyłów (<i>Particulate matter formation</i>)
	Warstwa ozonowa (<i>Ozone layer</i>)	Promieniotwórczość (<i>Ionising radiation</i>)
Ekosystem		Zmiany klimatu – Ekosystemy (<i>Climate change ecosystems</i>)
		Zakwaszenie lądowe (<i>Terrestrial acidification</i>)
		Eutrofizacja wód (<i>Freshwater eutrophication</i>)
	Ekotoksyczność (<i>Ecotoxicity</i>)	Ekotoksyczność lądowa (<i>Terrestrial ecotoxicity</i>)
	Zakwaszenie/Eutrofizacja (<i>Acidification/Eutrophication</i>)	Ekotoksyczność dla wód pitnych (<i>Freshwater exotoxicity</i>)
	Wykorzystanie terenu (<i>Land use</i>)	Ekotoksyczność morska (<i>Marine ecotoxicity</i>)
		Zajęcie terenu przez rolnictwo (<i>Agricultural land occupation</i>)
		Zajęcie terenu przez przemysł (<i>Urban land occupation</i>)
Zasoby naturalne		Transformacja terenu (<i>Natural land transformation</i>)
	Minerały (<i>Minerals</i>)	Wykorzystanie metali (<i>Metal depletion</i>)
	Paliwa kopalne (<i>Fossil fuels</i>)	Wykorzystanie paliw kopalnych (<i>Fossil depletion</i>)

Potencjalna szkoda obliczona, jako wynik analizy za pomocą metod „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008”, jest wyrażona w „punktach” (Pt). Jeden punkt reprezentuje tysięczną część rocznych szkód w środowisku, które powoduje jeden mieszkaniec Europy.

3. ZBIERANIE DANYCH

3.1. Elektrownia IGCC

Zbieranie danych należy do najtrudniejszych elementów analizy. W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze rezultaty.

Emisja oraz zużycie surowców i materiałów związanych ze zgazowaniem węgla, produkcją energii elektrycznej i wychwytywaniem CO₂, w analizowanej elektrowni IGCC, zostały zaczerpnięte z raportu U.S. DOE (2007). Raport ten zawiera spójne i zbilansowane dane projektowe dla różnych czystych technologii węglowych oraz obszerny opis projektowanych instalacji. W tabeli 2 przedstawiono wybrane najistotniejsze dane.

Tabela 2. Opis analizowanych przypadków bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (oprac. własne na podstawie www.netl.doe.gov)

Przypadek	Sprawność, %	Moc netto, MW _{el}	Zużycie węgla, kg/MWh	Technologia usuwania CO ₂
IGCC	38,2	640	480	nie dotyczy
IGCC CCS	32,5	556	565	absorpcja fizyczna w Selexolu

Analizowany blok wyposażony jest w następujące sposoby redukcji emisji: HCl, NH₃, PM są usuwane w skruberze, COS ulega konwersji do H₂S w reaktorze hydrolizy COS, a gazy kwaśne są usuwane w rozpuszczalniku Selexol. Rozpuszczalnik ten, stosowany jako absorbent, jest mieszaniną eteru dimetylowego i glikolu polietylenowego. Ekotoksyczność rozpuszczalnika jest niewielka w skali oddziaływania całej instalacji, a rozpuszczalnik jest biodegradowalny (Kohl, Nielsen 1997). Na potrzeby analizy założono, że produkcja Selexolu jest reprezentowana przez średnie oddziaływanie środowiskowe, wynikające z produkcji rozpuszczalników organicznych.

W projekcie instalacji uwzględniono usuwanie rtęci na złożu węgla aktywnego. Przed spalaniem w turbinie gazowej, oczyszczony ze zgazowania gaz jest rozcieńczany azotem w celu obniżenia emisji tlenków azotu. Gazy kwaśne zaabsorbowane w rozpuszczalniku Selexol są kierowane do instalacji Clausa, gdzie prowadzony jest odzysk siarki. Powstająca w formie produktu ubocznego siarka, była modelowana jako emisja uniknięta. W analizach wykorzystano dodatkowe dane z bazy danych *ecoinvent* (v.2), odnoszące się do transportu oraz zagospodarowania odpadów (żużlu i odpadu węgla aktywnego zanieczyszczonego rtęcią).

W instalacji IGCC CCS CO₂ usuwany jest w drugiej kolumnie absorpcyjnej zraszanej również rozpuszczalnikiem Selexol. Desorpcja gazu następuje dzięki ogrzaniu rozpuszczalnika. Wychwycony gaz jest sprężany i kierowany do składowania, a zregenerowany rozpuszczalnik po uzupełnieniu strat kierowany do kolumn absorpcyjnych. Wychwytywanie CO₂ ze strumienia gazu powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej, potrzebnej do regeneracji rozpuszczalnika i sprężania CO₂, w rezultacie spadek sprawności elektrowni. W elektrowni o niższej sprawności, wyprodukowanie takiej samej ilości energii elektrycznej wymaga większego zużycia węgla.

Emisja tlenków siarki, azotu i pyłów, zgodnie z cytowanym już wcześniej raportem U.S. DOE (2007), jest podobna dla obydwu rozważanych przypadków, a skuteczność usuwania CO₂ wynosi 90%.

3.2. Wykorzystanie metanu w kopalni węgla kamiennego

Cykl życia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (IGCC), poza etapami opisanymi w poprzednim rozdziale, obejmuje m.in. emisję i inne oddziaływania związane z wydobywaniem węgla kamiennego, w tym emisję i zagospodarowanie CH₄. Poniżej omówiono szczegółowo rodzaj danych i założenia przyjęte w przeprowadzanej analizie wariantowej.

3.2.1. Wydobycie i transport węgla w bazie *ecoinvent*

W celu utworzenia procesu jednostkowego „Wydobycie i transport węgla” przystosowano do polskich warunków proces znajdujący się w bazie danych *ecoinvent* (ang. *hard coal, at mine/EEU*). Baza *ecoinvent* jest częścią stosowanego do obliczeń LCA programu SimaPro. W bazie danych *ecoinvent* procesy wydobywania węgla obejmują następujące etapy: budowy kopalni i infrastruktury, funkcjonowania kopalni, transportu węgla do miejsc składowania oraz z miejsc składowania do miejsc użytkowania (elektrowni).

Proces związany z budową kopalni i infrastruktury w bazie *ecoinvent* został stworzony na podstawie danych dla jednej kopalni. W procesie wzięto pod uwagę: ilość i transport materiałów konstrukcyjnych, materiałów do budowy maszyn, materiałów wybuchowych, zużytej energii elektrycznej oraz wykorzystanie terenu pod infrastrukturę. Ze względu na żywotność maszyn założono 30 lat pracy kopalni wydobywającej 1 mln ton węgla rocznie. Nie przewidziano emisji, poza emisją ciepła odpadowego do powietrza. Jest to proces, który ma istotny wpływ na całkowite oddziaływanie wydobywania (ok. 10% całkowitego oddziaływania funkcjonującej kopalni).

Proces funkcjonowania kopalni i wydobywania węgla w bazie danych *ecoinvent* zawiera dane uśrednione dla Europy Środkowej i Wschodniej (EEU). W tabeli 3 przedstawiono podsumowanie oddziaływań związanych z funkcjonowaniem kopalni.

Tabela 3. Konsumpcja i emisja związana z wydobyciem 1 kg węgla (oprac. własne na podstawie *ecoinvent* v. 2.0)

Węgiel w złożu	kg	1,36
Zużycie materiałów wybuchowych	(kg Tovex)	7,6E-5
Olej napędowy	MJ	0,0223
Energia elektryczna	kWh	0,0458
Ciepło	MJ	0,11
Woda sieciowa	kg	0,514
Pompowana woda gruntowa	m ³	0,00169
Emisja ciepła do powietrza	MJ	0,165
Emisja CH ₄	g	8,2
Emisja pyłów (większa niż 10 µm)	g	0,1
Emisja radonu	Bq	12
Rodzaje emisji do rzek	Al, NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , F ⁻ , Fe ⁽⁺⁾ , Mn, Ni, zawiesina, Sr, SO ₄ ²⁻ , Zn ⁽⁺⁾	

Proces eksploatacji kopalni obejmuje również transport wydobytego węgla do miejsc składowania, pylenie z ładunku i rozładunku oraz emisję ze składowania węgla do wody. W bazie danych nie uwzględniono natomiast zagospodarowania CH₄ z kopalń, w całości jest on emitowany do powietrza. W obliczeniach przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy skorygowano najważniejsze elementy związane z emisją i wykorzystaniem CH₄, transportem węgla i zużyciem energii elektrycznej. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z CH₄ i wpływem jego wykorzystania w kopalni na ocenę cyklu życia systemów wytwarzania energii elektrycznej. Szczegóły dotyczące zakładanych sposobów wykorzystania CH₄ w kopalni zostały omówione w następnym rozdziale.

3.2.2. Scenariusze emisji i zagospodarowania metanu w kopalni

W ramach niniejszego artykułu przeanalizowano drogi, jakimi CH_4 jest uwalniany w kopalni oraz sposoby zapobiegania jego emisji. CH_4 z węgla kamiennego rozdziela się zazwyczaj na cztery strumienie:

- S_1 – CH_4 wydzielający się z pokładu do wyrobiska i odprowadzany z powietrzem wentylacyjnym (źródło szkodliwej emisji),
- S_2 – CH_4 odprowadzany systemami odmetanowania (możliwy do energetycznego wykorzystania),
- S_3 – CH_4 adsorbowany w porach węgla wydobywanego na powierzchnię (wydzielający się w dalszych fazach obróbki i będący źródłem szkodliwej emisji),
- S_4 – CH_4 pozostający w złożu.

W prezentowanej analizie uwzględniono jedynie dwa pierwsze strumienie S_1 oraz S_2 .

Energetyczne wykorzystanie metanu zawartego w powietrzu wentylacyjnym – S_1

Na przykładzie komercyjnych reaktorów VOCSIDIZER obliczono, że energia elektryczna może być uzyskiwana z powietrza wentylacyjnego ze sprawnością przekraczającą 20%. Reaktory VOCSIDIZER opracowane przez MEGTEC Systems (Australian... 2009; www.megtec.com) o mocy 6 MW_{el} , były wykorzystywane w elektrowni WestVAMP w BHP Billiton Illawarra (Australia, 2007 r.), która spalała 250 000 m^3/h powietrza wentylacyjnego o stężeniu CH_4 wynoszącym 0,9%.

Projektowane są również reaktory katalityczne. CSIRO opracował prototypowy reaktor VAMCAT (ang. *ventilation air methane catalytic turbine*) o mocy 25 kW_{el} do spalania powietrza wentylacyjnego o zawartości CH_4 0,94% (www.megtec.com; VAMCAT...).

Objętość czystego CH_4 w powietrzu wentylacyjnym, wyemitowana w 2007 r. w Polsce wynosiła 610 mln m^3 . Wskazana byłaby jednak neutralizacja CH_4 (utlenianie bez wytwarzania energii użytecznej) do CO_2 . Najkorzystniejszym wariantem byłoby wykorzystanie energii chemicznej CH_4 do produkcji energii elektrycznej i ciepłej. Podobnie jak w przypadku reaktora VOCSIDIZER, założono sprawność wytwarzania energii elektrycznej z powietrza wentylacyjnego w wysokości 20%.

Energetyczne wykorzystanie metanu z odmetanowania – S_2

W przeprowadzonych analizach założono uproszczony model wykorzystania gazu z odmetanowania, tj.: spalanie w gazowym silniku kogeneracyjnym (Skorek i in. 2004) o teoretycznej sprawności cieplnej wynoszącej 46,2% i elektrycznej 38,4%. W obliczeniach przyjęto, iż rzeczywista sprawność cieplna jest niższa, gdyż zapotrzebowanie na ciepło z kogeneracji występuje jedynie przez pół roku.

Ujęta w analizach kopalnia węgla kamiennego wytwarza trzy produkty: węgiel, energię elektryczną i ciepło. W związku z tym konieczne było przyjęcie założeń metodycznych dla rozdziału obciążeń środowiskowych, pomiędzy koprodukty, tzw. alo-

kacji. Zastosowano opisaną w literaturze metodę „poszerzania systemu” (Weidema 1993, 2003; Azapagic, Clift 1999; Weidema, Frees, Nielsen 1999; Curran, Mann, Norris 2001, 2005). Polega ona na modelowaniu ciepła i energii elektrycznej jako „unikniętego obciążenia” dla środowiska, występującego w trakcie procesów spalania węgla w elektrociepłowniach węglowych. Podejście „unikniętego obciążenia”, podobnie jak w przypadku „unikniętej emisji”, zdefiniowanej w *Ustawie z dnia 22 grudnia 2004 r. o handlu uprawnieniami do emisji do powietrza gazów cieplarnianych i innych substancji*, polega na pomniejszaniu szkód wyrządzonych w środowisku przez system lub proces, o szkodę, jaka powstałaby z instalacji powszechnie stosowanych do wytwarzania określonego produktu, a która, dzięki zastosowaniu nowej (analizowanej) instalacji lub rozwiązania technicznego, nie powstała.

Założenia wariantów

Podsumowując wyniki przeprowadzonych analiz, stwierdzono, że największe prawdopodobieństwo wykorzystania CH_4 jest z systemów odmetanowania. Wynika to z wysokiego stężenia CH_4 w gazie z odmetanowania (ok. 50%) i wartości opałowej rzędu 25 MJ/m^3 . Pomimo korzyści środowiskowych i ekonomicznych, jedynie 60% CH_4 ze stacji odmetanowania jest w Polsce wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej i ciepła/chłodu. Pozostałe 40% jest emitowane do powietrza atmosferycznego.

Ze względu na duże ilości CH_4 z układów wentylacyjnych, ciekawe i warte rozważenia są korzyści płynące z jego wykorzystania. Powietrze wentylacyjne z uwagi na bezpieczeństwo zawiera niewielkie ilości CH_4 (0–0,75%), dzięki czemu jego wykorzystanie napotyka bariery. Istnieje wiele opracowań dotyczących możliwości wykorzystania CH_4 z powietrza wentylacyjnego (Energy from... 2004; Somers, Schultz 2008; Nawrat, Kuczera 2011). Wymienia się w nich:

- spalanie gazu po zwiększeniu koncentracji CH_4 , uzyskanej przez zateżnienie lub mieszanie z gazem z odmetanowania,
- wykorzystanie w kotłach węglowych, jako powietrze nadmuchowe,
- spalanie w katalitycznym i termicznym przepływowym reaktorze rewersyjnym.

Wielkość i sposób wykorzystania CH_4 są uzależnione od wielu czynników, m.in. składu i ilości gazu, stabilności strumienia, względów ekonomicznych oraz analizy ryzyka. Dla uzyskania odpowiedzi na pytanie w jakim stopniu zagospodarowanie CH_4 w kopalni wpływa na cykl życia systemu energetycznego (na przykładzie instalacji IGCC), założono cztery teoretyczne scenariusze. Rozważano w nich trzy możliwości – x, y, z:

x – emisja CH_4 ,

y – spalanie CH_4 w pochodni (lub neutralizacja CH_4 z powietrza wentylacyjnego),

z – spalanie CH_4 ukierunkowane na produkcję energii użytecznej.

Na podstawie wymienionych wyżej możliwości x, y, z zbudowano warianty scenariuszy: A1, A2, A3, A4 zaprezentowane w tabeli 4.

Tabela 4. Warianty zagospodarowania metanu w kopalni w procesie jednostkowym „Wydobycie i transport węgla” (Śliwińska, Czaplicka-Kolarz 2012)

Symbol	Założenia wariantów
A	Przypadek bazowy: 63% CH ₄ z odmetanowania jest spalane w celach energetycznych. 37% CH ₄ z odmetanowania oraz 100% z powietrza wentylacyjnego jest emitowane do atmosfery.
A1	63% CH ₄ z odmetanowania jest spalane w celach energetycznych. 37% CH ₄ z odmetanowania i 100% z powietrza wentylacyjnego jest utleniane bez wytwarzania energii użytecznej. Emisja CH ₄ nie występuje.
A2	100% CH ₄ z odmetanowania jest spalane w celach energetycznych. 100% CH ₄ z powietrza wentylacyjnego jest emitowane do atmosfery.
A3	100% CH ₄ z odmetanowania jest spalane w celach energetycznych. 100% CH ₄ z powietrza wentylacyjnego jest utleniane bez produkcji energii użytecznej. Emisja CH ₄ nie występuje.
A4	100% CH ₄ z odmetanowania jest spalane w celach energetycznych. 100% CH ₄ z powietrza wentylacyjnego jest wykorzystywane do wytwarzania energii elektrycznej ze sprawnością 20%. Emisja CH ₄ nie występuje.

Ze względu na wysoki potencjał cieplarniany CH₄, emisja każdego jego kilograma, po przeliczeniu na emisję gazów cieplarnianych, wynosi 21 kg ekwiwalentnego dwutlenku węgla (kg CO₂eq).

Dzięki spalaniu CH₄ w pochodni, do atmosfery zamiast CH₄ emitowany jest CO₂ o znacznie niższym potencjale cieplarnianym. Ze stechiometrii reakcji wynika, że spalanie 1 kg CH₄ powoduje emisję 2,75 kg CO₂. W związku z tym w miejsce 21 kg CO₂eq, emitowane jest 2,75 kg CO₂eq. W pochodni osiągana jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o 87%.

Jeśli spalanie CH₄ jest zintegrowane z produkcją energii elektrycznej lub ciepłej, poza korzyściami wynikającymi z mniejszego potencjału cieplarnianego dwutlenku węgla, dodatkowe korzyści dla środowiska wynikają z „unikniętej emisji” w przemyśle energetycznym związanej z zastąpieniem CH₄ innymi paliwami kopalnymi (Stańczyk i in. 2009).

W celu dokonania analizy wpływu zagospodarowania CH₄ na środowisko, przyjęto cztery hipotetyczne warianty jego zagospodarowania, będące kombinacją opisanych procesów (Śliwińska, Czaplicka-Kolarz 2012). Dla wariantu bazowego, oznaczonego symbolem A, przyjęto stan zagospodarowania CH₄ w 2007 r. w Polsce. Założenia czterech pozostałych wariantów przedstawiono w tabeli 4.

W tabeli 5 przedstawiono bilans pomiędzy CH₄ emitowanym, spalonym w pochodni (lub neutralizowanym w inny sposób) a wykorzystywanym do produkcji energii użytecznej. Bilans sporządzono przy założeniu, że całkowita ilość CH₄ wynosi 7,59 g, dla każdego kilograma wydobytego węgla, w tym 2,29 g pochodzi z systemów odmetanowania.

Tabela 5. Bilans zagospodarowania metanu w kopalniach, w poszczególnych wariantach (g CH₄/kg wydobywanego węgla) (Śliwińska, Czaplicka-Kolarz 2012)

Zmienne	A	A1	A2	A3	A4
Emisja CH ₄ (x)	6,14	0	5,30	0	0
CH ₄ utleniany do CO ₂ bez produkcji energii użytecznej (y)	0	6,14	0	5,30	0
CH ₄ spalany w celach energetycznych (z)	1,45	1,45	2,29	2,29	7,59*

* W tym 2,29 g spalane w silniku kogeneracyjnym i 5,30 g wykorzystywane ze sprawnością 20%.

Obliczenia wykorzystane do scenariuszy zostały wykonane w oparciu o założenie, że w ciągu roku wydobyto 83 mln ton węgla kamiennego. Dla obydwu analizowanych systemów, tj. IGCC i IGCC CCS, przeprowadzono wariantową ocenę cyklu życia, zakładając opisane scenariusze wykorzystania CH₄, w etapie wydobywania węgla.

4. REZULTATY OCENY CYKLU ŻYCIA

4.1. Oddziaływanie w cyklu życia układu IGCC i wpływ wychwytywania CO₂ na środowisko naturalne

W tabeli 6 przedstawiono wyniki analizy cyklu życia w różnych kategoriach wpływu.

Tabela 6. Wpływ wychwytywania CO₂ na wyniki LCA – metody „Ekowskażnik 99” oraz „ReCiPe 2008” (Pt/MWh_e) (oprac. własne z wykorzystaniem programu SimaPro)

Metoda oceny/kategoria wpływu		IGCC		IGCC CCS	
„Ekowskażnik 99”		18,1552		13,1931	
Rakotwórczość (<i>Carcinogens</i>)	Zdrowie ludzkie	0,263	12,60	0,3127	6,62
Układ oddechowy – substancje organiczne (<i>Respiratory organics</i>)		0,0042		0,0055	
Układ oddechowy – substancje nieorganiczne (<i>Respiratory inorganics</i>)		3,615		4,101	
Zmiany klimatu (<i>Climate change</i>)		8,7144		2,1874	
Promieniotwórczość (<i>Radiation</i>)		0,0073		0,0087	
Warstwa ozonowa (<i>Ozone layer</i>)		3,37E-05		4,06E-05	
Ekotoksyczność (<i>Ecotoxicity</i>)	Jakość ekosystemu	0,0428	1,01	0,0509	1,22
Zakwaszenie/Eutrofizacja (<i>Acidification/Eutrophication</i>)		0,1893		0,2072	
Wykorzystanie terenu (<i>Land use</i>)		0,774		0,9578	
Minerały (<i>Minerals</i>)	Zasoby naturalne	0,0303	4,54	0,036	5,36
Paliwa kopalne (<i>Fossil fuels</i>)		4,5147		5,3259	
„ReCiPe 2008”		92,017		70,2587	
Zmiany klimatu – Zdrowie ludzkie (<i>Climate change – Human health</i>)	Zdrowie ludzkie	38,2874	39,97	10,1329	12,04
Zubożenie warstwy ozonowej (<i>Ozone depletion</i>)		6,58E-05		7,9E-05	
Toksyczność dla ludzi (<i>Humane toxicity</i>)		0,1644		0,1974	
Tworzenie ozonu fotochemicznego (<i>Photochemical oxidant formation</i>)		0,0006		0,0007	
Tworzenie pyłów (<i>Particulate matter formation</i>)		1,5138		1,7054	
Promieniotwórczość (<i>Ionising radiation</i>)		0,0037		0,0044	
Zmiany klimatu – Ekosystemy (<i>Climate change ecosystems</i>)	Ekosystem	3,4059	3,77	0,901	1,36
Zakwaszenie lądowe (<i>Terrestrial acidification</i>)		0,0015		0,0017	
Eutrofizacja wód (<i>Freshwater eutrophication</i>)		1,1E-05		1,31E-05	
Ekotoksyczność lądowa (<i>Terrestrial ecotoxicity</i>)		0,0002		0,0003	
Ekotoksyczność dla wód (<i>Freshwater exotoxicity</i>)		1,52E-05		1,8E-05	
Ekotoksyczność morska (<i>Marine ecotoxicity</i>)		5,23E-08		6,19E-08	
Rolnicze zajęcie terenu (<i>Agricultural land occupation</i>)		0,2707		0,3475	
Przemysłowe zajęcie terenu (<i>Urban land occupation</i>)		0,0596		0,0707	
Transformacja terenu (<i>Natural land transformation</i>)		0,0349		0,0414	
Wykorzystanie metali (<i>Metal depletion</i>)	Zasoby naturalne	0,0019	48,27	0,0022	56,86
Wykorzystanie paliw kopalnych (<i>Fossil depletion</i>)		48,2723		56,8528	

Analizę porównawczą przeprowadzono dla dwóch układów IGCC w celu określenia, w jaki sposób wychwytywanie CO₂ zmienia oddziaływanie na środowisko. Zastosowano dwie metody oceny wpływu: „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008”, a przyjętą jednostką funkcjonalną był 1 MWh energii elektrycznej przekazywanej do sieci elektroenergetycznej.

Występowanie największych szkód w środowisku stwierdzono w obszarze zmian klimatycznych, emisji nieorganicznych substancji i wyczerpywania paliw kopalnych, jednak zależnie od zastosowanej metody, waga poszczególnych problemów jest zróżnicowana. W „Ekowskażniku 99” największy nacisk kładzie się na zmiany klimatyczne, podczas gdy wyniki „ReCiPe 2008” wskazują raczej na wyczerpywanie paliw kopalnych, jako na największy problem środowiskowy. W przypadku metody „Ekowskażnik 99” prawie 70% obliczonych szkód występuje w kategorii Zdrowie ludzkie. W przypadku „ReCiPe 2008”, szkody dla zdrowia ludzkiego w wyniku zmian klimatu i będące konsekwencją wyczerpywania paliw kopalnych są podobnej wielkości.

W tabeli 6 porównano szkody środowiskowe dla przypadków z wychwytem CO₂ (IGCC CCS) oraz bez (IGCC). Usuwanie CO₂ powoduje zmniejszenie sumarycznego wpływu na środowisko o 20–30%, a rezultaty końcowe otrzymane metodami „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008” są zbliżone. Wynoszą one odpowiednio 27 i 24%. Redukcja ta jest związana wyłącznie ze znacznym zmniejszeniem potencjału zmian klimatycznych, a wychwytywanie CO₂ powoduje wzrost oddziaływania na środowisko we wszystkich pozostałych kategoriach wpływu, co jest powodowane spadkiem sprawności elektrowni. Zmniejszenie całkowitego wpływu na środowisko należy interpretować ostrożnie. Wynika to częściowo z przyjętych w metodach współczynników ważenia dla globalnego ocieplenia i zubożenia paliw kopalnych.

Porównując obydwie metody oceny: „Ekowskażnik 99” i „ReCiPe 2008”, można stwierdzić, iż w drugiej z nich większą wagę przykładą się do wyczerpywania zasobów naturalnych niż do szkód dla zdrowia ludzkiego. Jednocześnie, analizy przeprowadzone przy użyciu obydwu metod, prowadzą do podobnych wniosków i pozwalają zaobserwować podobne tendencje w otrzymywanych rezultatach. Zauważalna różnica trendu występuje dla kategorii Ekosystemy, ponieważ w „ReCiPe 2008” wprowadzono kategorię wpływu Zmiany klimatyczne – Ekosystemy.

Zaobserwowane różnice sprawiają jednak, że omawiane metody nie są porównywalne, gdyż ich twórcy kładą nacisk na inne kwestie. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że zmiany zagregowanego ekowskażnika, a więc wyniki oceny technologii wykonane za pomocą metod „ReCiPe 2008” i „Ekowskażnik 99”, mogą być różne.

W tabeli 7 przedstawiono szczegółowe wyniki analiz emisji gazów cieplarnianych obliczone za pomocą metody IPCC 2007 GWP 100a i wyrażone w kg CO_{2eq}/MWh_{el}.

Tabela 7. Emisja gazów cieplarnianych (GHG) w cyklu życia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (IPCC 2007 GWP 100a) (U.S. DOE 2007)*

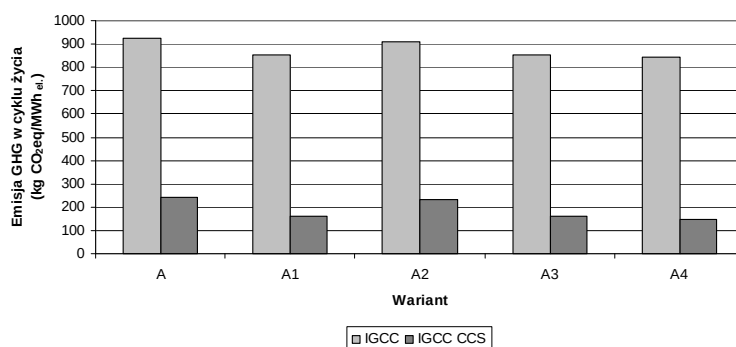
Technologia/wskaźnik	Emisja GHG w cyklu życia kg CO _{2eq} /MWh _{el}	W tym: emisja CO ₂ z bloku IGCC	CO ₂ do zatłaczania kg CO _{2eq} /MWh _{el}
IGCC	923	796	0
IGCC-CCS	244	93,5	841

* Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu SimaPro.

Zaprezentowane wyniki wskazują, że w cyklu życia elektrowni IGCC w rezultacie wychwytywania CO₂, możliwa do osiągnięcia jest znaczna redukcja emisji gazów cieplarnianych. W przypadku instalacji bez oczyszczania gazu z CO₂, większość emisji gazów cieplarnianych występuje w samej elektrowni, jako rezultat emisji spalin. Pozostała część emisji występuje głównie podczas wydobywania węgla w kopalni. Proporcja ta ulega zmianie w cyklu życia elektrowni wyposażonej w instalację wychwytywania dwutlenku węgla, w której mniej niż połowa gazów cieplarnianych jest emitowana bezpośrednio w elektrowni, a pozostała część powstaje na etapie wydobywania węgla. W tym wypadku perspektywa cyklu życia jest szczególnie istotna dla uniknięcia zaniżenia wyniku. Włączenie etapu wydobywania węgla do analiz sprawia, że redukcja emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia jest mniejsza niż zakładana i wynosi około 70%. Należy zatem przyjąć ogólną zasadę, że korzyści wynikające z zastosowania technologii niskoemisyjnych, np. czystych technologii węglowych oraz odnawialnych źródeł energii, powinny być oceniane w całym cyklu życia. Wiąże się to z faktem, iż względnie istotna część oddziaływań występuje zazwyczaj poza fazą eksploatacji tychże technologii.

4.2. Zagospodarowanie metanu w kopalni

Wyniki analizy wariantowej emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia obydwu systemów IGCC wraz z zagospodarowaniem CH₄ (założenia poszczególnych wariantów znajdują się w tab. 4 i 5) przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych GHG w cyklu życia systemu kopalnia – blok gazowo-parowy zintegrowany ze zgazowaniem węgla (IGCC)

Fig. 2. Potential of reduction of greenhouse gas emissions (GHG) in the life cycle of the system mine – integrated gasification combined cycle block (IGCC)

Redukcja emisji osiągalna dzięki wychwytywaniu CO₂ (wariant A) służy, jako punkt odniesienia, do interpretacji potencjału zagospodarowania CH₄ w kopalniach. Wyniki analizy wariantowej zaprezentowane w kolumnach A1–A4 pokazują, że zagospodarowanie CH₄ w kopalni może poprawić oddziaływanie na środowisko w cyklu życia elektrowni IGCC.

Wariant podstawowy (A) zakłada, że część CH_4 jest w kopalniach spalana w silnikach kogeneracyjnych w celu uzyskania energii elektrycznej i ciepła. Pozostała część emitowana jest do atmosfery. Samo spalanie całego emitowanego CH_4 w pochodni, jak założono w wariancie A1, pozwoliłoby na osiągnięcie redukcji oddziaływania na środowisko w cyklu życia elektrowni IGCC o 69–81 $\text{kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$.

Redukcja emisji, osiągalna dzięki spalaniu całego CH_4 z odmetanowania w silnikach kogeneracyjnych, przy równoczesnej emisji CH_4 z układów wentylacyjnych (wariant A2), może osiągnąć wielkość rzędu jedynie kilkunastu $\text{CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$.

Jednoczesne spalanie CH_4 z odmetanowania w silnikach kogeneracyjnych oraz utlenianie CH_4 z układów wentylacyjnych, bez wytwarzania energii (wariant A3), pozwoliłoby osiągnąć redukcję emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia o około 70–83 $\text{kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$.

Energetyczne wykorzystanie całego CH_4 emitowanego obecnie w kopalniach zarówno z układów odmetanowania, jak i z systemów wentylacyjnych, pozwoliłoby zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych w cyklu życia elektrowni IGCC o około 80–95 $\text{kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$ (wariant A4).

Redukcja emisji ekwiwalentnego CO_2eq osiągalna, dzięki zagospodarowaniu CH_4 w kopalni, jest znacznie mniejsza, niż ilość CO_2 , który może być poddany sekwestracji i wynosi 841 $\text{kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$. Redukcja ta reprezentuje około 10% ilości emitowanych z układu IGCC bez wychwytywania dwutlenku węgla. Dla układów IGCC zintegrowanych z wychwytywaniem dwutlenku węgla, rośnie względne znaczenie zagospodarowania CH_4 w kopalni. Osiągalna redukcja emisji ekwiwalentnego dwutlenku węgla stanowi około 33–39% emisji układu IGCC CCS. Największe możliwości obniżenia potencjału cieplarnianego wynikają z neutralizacji powietrza wentylacyjnego.

Mając na uwadze klasyczną analizę środowiskową, nie zachodzą żadne różnice oddziaływania niezależnie od tego, czy CH_4 jest spalany w pochodni czy w silniku kogeneracyjnym. Dzieje się tak, gdyż obniżenie emisji CO_2eq jest w obu przypadkach takie samo. Dopiero dzięki zastosowaniu w analizach podejścia „uniknięte obciążenie” oraz uwzględnieniu korzyści wynikających z wytwarzania koproduktów: energii elektrycznej i ciepła, można oszacować korzyści środowiskowe wykorzystania energetycznego CH_4 .

W ramach prowadzonych prac, zbadano również wpływ zagospodarowania CH_4 w kopalni na inne niż globalne ocieplenie aspekty środowiskowe. Rezultaty pokazują, iż zagospodarowanie CH_4 w kopalni, dzięki wytwarzaniu koproduktów poza potencjałem globalnego ocieplenia, obniża także inne powodowane przez kopalnię szkody środowiskowe, jednak wpływ ten jest niewielki.

Pomijając fakt, że zagospodarowanie CH_4 w kopalniach wymaga nakładów inwestycyjnych, może ono także przynieść korzyści dla środowiska w cyklu życia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (IGCC). Mowa tu o obniżeniu śladu węglowego o około 95 $\text{kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$. Wytwarzanie produktów ubocznych w postaci energii elektrycznej i ciepła może przynieść dodatkowe oszczędności, a także dochody ze sprzedaży. Oszacowany potencjał redukcji gazów cieplarnianych prawdopodobnie wzrośnie w przyszłości, z powodu rosnącej metanonośności wydo-

bywanych złóż węglowych w Polsce. Zagadnienie wykorzystania CH_4 z kopalń jest warte dalszej analizy pod kątem ekoefektywności, która wiąże zagadnienia środowiskowe i ekonomiczne w jeden wskaźnik.

5. WNIOSKI

- Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że dla oceny oddziaływania na środowisko w całym cyklu istnienia bloku gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla (IGCC) najważniejsze są następujące czynniki: emisja CO_2 , sprawność wytwarzania energii elektrycznej i zużycie węgla. Z perspektywy oceny LCA, zagospodarowanie CH_4 w kopalni, szczególnie CH_4 z układów wentylacyjnych, może przyczynić się do poprawy oddziaływania na środowisko systemów energetycznych. Ma to szczególne znaczenie w kategoriach związanych ze zmianami klimatycznymi i emisją substancji organicznych, a także w obniżeniu śladu węglowego elektrowni. Oszacowano, że dzięki zagospodarowaniu CH_4 , możliwa jest redukcja emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia o około $95 \text{ kg CO}_2\text{eq/MWh}_{\text{el}}$.
- W analizach przyjęto cztery hipotetyczne scenariusze zagospodarowania CH_4 . Stanowią one kombinację procesów związanych z emisją CH_4 (wariant x), z jego spalaniem w pochodni (wariant y) i ze spalaniem ukierunkowanym na produkcję energii użytkowej (wariant z):
 - A1 – energetyczne wykorzystanie bez zmian; obecnie emitowany CH_4 jest utleniany do CO_2 (nie ma emisji CH_4),
 - A2 – cały CH_4 z odmetanowania jest wykorzystany energetycznie (powietrze wentylacyjne jest emitowane),
 - A3 – jak w A2, jednak powietrze wentylacyjne jest utleniane do CO_2 w miejsce emisji,
 - A4 – cały CH_4 jest wykorzystywany energetycznie.
 Przedstawiono bilans pomiędzy CH_4 emitowanym, spalonym i wykorzystywanym do produkcji energii użytkowej (warianty x, y, z). Obliczenia wykorzystane do analizy scenariuszy zostały wykonane w oparciu o założenie, że w ciągu roku wydobyto 83 miliony ton węgla kamiennego. Całkowita ilość CH_4 wynosi $7,59 \text{ g}$ dla każdego kilograma wydobytego węgla, w tym $2,29 \text{ g}$ pochodzi z systemów odmetanowania. Wynika z tego, że w scenariuszu A1 $1,45 \text{ g}$ CH_4 jest wykorzystywane do wytwarzania energii użytkowej, a pozostała część, chociaż nie jest emitowana, jest jedynie utleniana do CO_2 bez uzyskiwania produktów. W scenariuszu A2 i A3 następuje wzrost wykorzystania energetycznego do $2,29 \text{ g CH}_4/\text{kg}$ wydobywanego węgla. Pozostałe $5,3 \text{ g CH}_4/\text{kg}$ jest emitowane (A2) lub utleniane (A3). Najbardziej efektywny scenariusz A4 zakłada energetyczne wykorzystanie całości CH_4 , tj. $7,59 \text{ g CH}_4/\text{kg}$, w tym $2,29 \text{ g CH}_4/\text{kg}$ w silniku kogeneracyjnym, a $5,3 \text{ g CH}_4/\text{kg}$ węgla z niższą sprawnością 20%.
- W artykule zaprezentowano efekt oddziaływania układu IGCC i wpływ wychwytywania CO_2 w całym cyklu życia na środowisko naturalne. Zastosowanie układu

wychwytywania CO₂ w elektrowni zintegrowanej ze zgazowaniem węgla przyczynia się do zmniejszenia potencjału cieplarnianego w cyklu życia. Równocześnie w konsekwencji obniżenia sprawności, następuje wzrost oddziaływania na środowisko we wszystkich pozostałych kategoriach wpływu, szczególnie związanych z wyczerpywaniem się paliw kopalnych. Pomimo tego, całkowite oddziaływanie na środowisko analizowanego układu IGCC ulega obniżeniu o 20–30%, co jest częściowo wynikiem zastosowanych modeli oceny i przyjętych współczynników ważenia dla poszczególnych kategorii, głównie globalnego ocieplenia i zubożenia paliw kopalnych.

- Redukcja emisji CO₂ w całym cyklu życia układu IGCC, osiągalna dzięki sekwestracji, wynosi około 670 kg CO₂eq/MWh_{el}. Może to umożliwić Polsce sprostanie limitom emisji w kolejnych latach bez znaczącej zmiany struktury wytwarzania energii elektrycznej.
- Redukcja osiągalna dzięki zagospodarowaniu CH₄ jest w porównaniu do sekwestracji znacznie niższa, nie przyczynia się jednak do zwiększenia oddziaływania w innych kategoriach. Ponadto, może wiązać się z dodatkowymi korzyściami, w postaci zysków ze sprzedaży produktów ubocznych – energii elektrycznej i ciepła.

Literatura

1. Australian CMM Activities, Ad Hoc Group of Experts on Coal Mine Methane, Australian Government, 12–13 October 2009, Geneva, Switzerland.
2. Azapagic A., Clift R. (1999): Allocation of Environmental Burdens in Co-product Systems: Product-related Burdens (Part 1). *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 4(6), s. 357–369, DOI: 10.1007/BF02978528.
3. Curran M.A., Mann M., Norris G. (2001): Report on the International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories. Cincinnati, Ohio. NREL and EPA 2002, EPA/600/R-02/041.
4. Curran M.A., Mann M., Norris G. (2005): The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production* Vol. 13(8), s. 853–862, DOI: 10.1016/j.jclepro.2002.03.001.
5. Czaplicka-Kolarz K. red. (2002): Zastosowanie oceny cyklu życia (LCA) w ekobilansie kopalni. Praca zbiorowa. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
6. Czaplicka-Kolarz K., Ściążko M. red. (2004): Model ekologicznego i ekonomicznego prognozowania wydobywania i użytkowania czystego węgla, tom 2: Ekoefektywność technologii czystego spalania węgla. Praca zbiorowa. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
7. DiMaria F., Fantozzi F. (2004): Life cycle assessment of waste to energy micro-pyrolysis system: Case study for an Italian town. *International Journal of Energy Research* Vol. 28, s. 449–461, DOI:10.1002/er.977.
8. DiMaria F., Saetta S., Leonardi D. (2003): Life cycle assessment of a PPV plant applied to an existing SUW management system. *International Journal of Energy Research* Vol. 27, s. 481–494, DOI:10.1002/er.890.
9. Energy From Ventilation Air Methane (VAM) Using Oxidation Technologies, EPA Coalbed Methane Outreach Program Technical Options Series, US EPA, 2004, http://www.epa.gov/cmop/docs/thermal_oxidizer.pdf – dostęp: październik 2011.
10. Goedkoop M., Spriensma R. (2000): The eco-indicator 99 a damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report. Pre Consultants.

11. Goedkoop M., Heijungs R. i inni (2009): ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. *Ruimte en Milieu*.
12. Grammelis P., Skodras G., Kakaras E. (2006): An economic and environmental assessment of biomass utilization in lignite-fired power plants of Greece. *International Journal of Energy Research* Vol. 30, s. 763–775, DOI:10.1002/er.1182.
13. Hertwich E.G., Aaberg M., Singh B., Stromman A.H. (2008): Life-cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture for Enhanced Oil Recovery. *Chinese Journal of Chemical Engineering* Vol. 16(3), s. 343–353, DOI: 10.1016/S1004-9541(08)60085-3.
14. Hondo H. (2005): Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* Vol. 30, s. 2042–2056, DOI: 10.1016/j.energy.2004.07.020.
15. ISO 14040:2009 Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.
16. ISO 14044:2009 Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.
17. Kleiber M., red. (2011): *Ekoefektywność technologii*. Praca zbiorowa. Radom, Wydaw. Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB.
18. Kohl A., Nielsen R. (1997): *Gas Purification* (Fifth edition ed.). Houston, Texas, Gulf Publishing Company.
19. Korre A., Nie Z., Durucan S. (2009): Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post combustion CO₂ capture. *Energy Procedia* Vol. 1, s. 3771–3778, DOI:10.1016/j.egypro.2009.02.177.
20. Korre A., Nie Z., Durucan S. (2010): Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* Vol. 4, s. 289–300, DOI:10.1016/j.ijgg.2009.08.005
21. Marx J., Schreiber A., Zapp P., Haines M., Hake J.Fr., Gale J. (2011): Environmental evaluation of CCS using Life Cycle Assessment – a synthesis report. *Energy Procedia* Vol. 4, s. 2448–2456, DOI:10.1016/j.egypro.2011.02.139.
22. Meier P.J. (2002): *Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis Fusion*. Madison, Wisconsin, Technology Institute University of Wisconsin.
23. Modahl I.S., Nyland C.A., Raadal H.L., Karstad O., Torp T.A., Hagemann R. (2009): LCA as an ecodesign tool for production of electricity, including carbon capture and storage – a study of a gas power plant case with post-combustion CO₂ capture at Tjeldbergodden, Norway. Joint Action on Climate Change, Aalborg, Denmark.
24. Nawrat S., Kuczera Z. (2011): *Stan i perspektywy gospodarczego wykorzystania metanu z pokładów węgla polskich kopalń węgla kamiennego*. Kraków, AGH, Małopolsko-Podkarpacki Klaster Czystej Energii, klaster.agh.edu.pl/ – dostęp: maj 2011.
25. Odeh N.A., Cockerill T.T. (2007): Life cycle analysis of UK coal-fired power plants. *Energy Conversion and Management* Vol. 49, s. 212–220, DOI: 10.1016/j.enconman.2007.06.014.
26. Odeh N.A., Cockerill T.T. (2008): Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. *Energy Policy* Vol. 36, s. 367–380, DOI: 10.1016/j.enpol.2007.09.026.
27. *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*. Warszawa, Ministerstwo Gospodarki 2009.
28. Ruether J.A. (2004): Greenhouse gas emissions from coal gasification power generation systems. *Journal of Infrastructure Systems* Vol. 10(3), s. 111–119, DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2004)10:3(111).

29. Schreiber A., Zapp P., Kuckshinrichs W. (2009): Environmental assessment of German electricity generation from coal-fired power plants with amine-based carbon capture. *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 14, s. 547–559, DOI: 10.1007/s11367-009-0102-8.
30. SimaPro Analyst version 7.3 LCA software and database, PRé Consultants, The Netherlands, www.pre.nl.
31. Skorek J., Kalina J., Backhaus C., Mroz A. (2004): Możliwość wykorzystania metanu z pokładów węgla w niemieckich i polskich kopalniach. W: *Energia Odnawialna w Niemczech i Polsce w świetle przystąpienia do Unii Europejskiej. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Seria Ciepłota Maszyny Przepływowe*, z. 125. INCREASE (International Cooperation on Research in Environmental Protection, Process Safety and Energy Technology).
32. Somers J.M., Schultz H.L. (2008): Thermal oxidation of coal mine ventilation air methane. 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, epa.gov/cmop/docs/2008_mine_vent_symp.pdf – dostęp: październik 2011.
33. Stańczyk K., Bieniecki M., Cwiężek M., Świądrowski J. (2009): Zagospodarowanie metanu z kopalń węgla kamiennego. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów T.* 43(1), s. 23–32.
34. Suebsiri J., Manuilova A., Wilson M. (2009): Carbon Footprint of an 882 MW Coal-fired Power Plant with CCS: CO₂-EOR and Storage Option. *Life Cycle Assessment IX*, Boston.
35. Śliwińska A., Czaplicka-Kolarz K. (2012): Reducing life-cycle environmental impacts of coal-power by using coal-mine methane. *International Journal of Energy Research* (w druku).
36. U.S. DOE (2007): Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity. Final Report, DOE/NETL 2007, www.netl.doe.gov – dostęp: listopad 2009.
37. Ustawa z dnia 22 grudnia 2004 r. o handlu uprawnieniami do emisji do powietrza gazów cieplarnianych i innych substancji, art. 3 ust. 3.
38. VAMCAT (Ventilation Air Methane Catalytic Turbine) csiro.au/news/ps1k0.html – dostęp: październik 2011.
39. Waku H., Tamura I., Inoue M., Akai M. (1995): Life cycle analysis of fossil power plants with CO₂ recovery and sequestration systems. *Energy Conversion and Management* Vol. 36(6-9), s. 877-880, DOI: 10.1016/0196-8904(95)00143-2
40. Weidema B.P. (1993): Market aspects in product life cycle inventory methodology. *Journal of Cleaner Production* Vol. 1(3-4), s. 161–166, DOI: 10.1016/0959-6526(93)90007-X.
41. Weidema B.P. (2003): Market information in life cycle assessment. Copenhagen, Danish Environmental Protection Agency (Environmental Project no. 863).
42. Weidema B.P., Frees N., Nielsen A.M. (1999): Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 4(1), s. 48–56, DOI: 10.1007/BF02979395.
43. Weisser D. (2007): A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* Vol. 32, s.1543–1559, DOI: 10.1016/j.energy.2007.01.008.
44. Wu J., Wang J., Cheng Q., DeVallance D. (2011): Assessment of coal and biomass to liquid fuels in central Appalachia, USA. *International Journal of Energy Research*, published online DOI:10.1002/er.1838.
45. elbelchatow.pgegiek.pl/ – dostęp: maj 2011.
46. megtec.com

Krzysztof Gogola*, Sebastian Iwaszenko*, Adam Smoliński*

PRÓBA ZASTOSOWANIA REAKTORA ZE ZŁOŻEM STAŁYM DO OCENY PUNKTU INICJACJI ZAPŁONU OBIEKTÓW FORMOWANYCH Z ODPADÓW POWĘGLOWYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań podatności na samozapłon dla materiału zgromadzonego z wybranych obiektów uformowanych z odpadów powęglowych. Badania przeprowadzone z próbek pobranych w obiektach: „Waleska” kopalnia „Bolesław Śmiały”, „Wrzosey” kopalnia „Rydułtowy-Anna”, „Szyby Zachodnie” kopalnia „Jas-Mos”, hałda przy ul. Bielszowickiej w Zabrze i hałda „Ruda” w Zabrze-Biskupicach, polegały na podgrzaniu próbek do wybranej, na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych, temperatury początkowej, a następnie obserwowaniu samoistnego jej wzrostu. Do reaktora wprowadzono mieszaninę O_2 i N_2 , której skład odpowiadał składowi powietrza. W gazach wylotowych mierzono zawartość CO , CO_2 , H_2 i O_2 . Przedstawiono interpretację uzyskanych wyników pomiarów oraz zaproponowano koncepcję trzyetapowego opisu rozwoju pożaru na obiekcie z odpadów powęglowych. Badania przeprowadzono w ramach projektu POIG 1.3 pt. „System zarządzania likwidacją emisji CO_2 ze zwałowisk odpadów powęglowych”.

Trial of application of a fixed-bed reactor for the assessment of the ignition initiation point of objects formed from coal wastes

Abstract

In the work the results of investigations into the susceptibility to spontaneous ignition for the material collected from selected objects formed from coal wastes were presented. The investigations carried out from samples taken at the objects: “Waleska” – “Bolesław Śmiały” colliery, “Wrzosey” – “Rydułtowy-Anna” colliery, “Szyby Zachodnie” – “Jas-Mos” colliery, dump in the Bielszowicka street in Zabrze and “Ruda” dump in Zabrze-Biskupice, consisted in preheating of samples to the initial temperature, selected on the basis of performed preliminary tests, and next in the observation of its autonomous growth. Into the reactor the mixture of O_2 and N_2 has been introduced, the composition of which corresponded with the composition of air. In the outlet gases the content of CO , CO_2 , H_2 and O_2 was measured. The interpretation of obtained measurement results was presented and the conception of three-stage description of fire development at the object from coal wastes has been proposed. The investigations were carried out in the framework of the POIG 1.3 project entitled “Management system of liquidation of CO_2 emissions from coal waste dumps”.

1. WPROWADZENIE

Zjawisko samozapłonu oraz pożaru na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych ma istotny wpływ na środowisko naturalne (Drenda i in. 2007). Płonące hałdy są uciążliwe dla środowiska i zdrowia i obniżają standard życia w rejonach je otaczających. Problematyka zwalczania zagrożenia pożarowego, będąca tematem wielu prac naukowych, jest niezwykle złożona, chociażby z powodu deponowania na

* Główny Instytut Górnictwa

zwałowiskach materiałów odpadowych o różnym składzie (Korski, Henslok, Bodynek 2004). Zróżnicowanie to dodatkowo komplikuje badanie właściwości obiektów uformowanych z odpadów powęglowych i wymaga wnikliwego rozpatrywania każdego z nich. Przeprowadzone badania modelowe i eksperymentalne wskazują, że czas rozwoju zapożarowania po inicjującym podgrzaniu materiału, trwa około kilku dni (Arisoy, Beamish, Cetegen 2006). Głównym materiałem palnym, obecnym w ubocznych produktach procesu wydobywczego, jest węgiel. Uzasadnione wydaje się zatem wykorzystanie dorobku naukowego, związanego z badaniami samozapalania węgla, jako podstawy do opisu rozwoju zapożarowań na obiektach lokowania odpadów powęglowych (Gumińska, Różański 2005). Jako czynniki wpływające na podatność węgla kamiennego na samozapłon wymienia się: skład materiałowy, klasę węgla oraz warunki otoczenia (Falcon 1986).

Badania eksperymentalne prowadzone dla węgla kamiennego wykorzystują szereg metod określających skłonność węgla do samozapłonu na podstawie wyznaczenia: ilości ciepła i pary wodnej wydzielonej z próbki węgla (kalorymetria adiabatyczna) oraz pomiaru zdolności do sorpcji tlenu w zadanych warunkach zewnętrznych (Cygankiewicz 2000). Inny sposób pomiaru samozapłonu węgla polega na ogrzewaniu próbki w łaźni, stosując stały przyrost temperatury. Temperatura próbki początkowo równa temperaturze ogrzewającej ją łaźni, na skutek zachodzących procesów zaczyna ją przewyższać. Jako miarę podatności węgla do samozapłonu przyjmuje się czas, po którym temperatura próbki osiąga wartości wyższe niż temperatura ogrzewającej ją łaźni. W przeprowadzonych badaniach podatności materiału zgromadzonego na obiektach opisywanych w niniejszej pracy wykorzystano elementy metod bazujących na pomiarze ilości ciepła wydzielającego się z próbek w warunkach adiabatycznych po wcześniejszym podgrzaniu ich do przyjętej temperatury początkowej. Jako miarę ilości wydzielanego w wyniku procesów spalania ciepła, przyjęto zdolność próbki do spontanicznego wzrostu temperatury. Obserwacja tego zjawiska traktowana była jako znacznik skłonności materiału do samozapłonu.

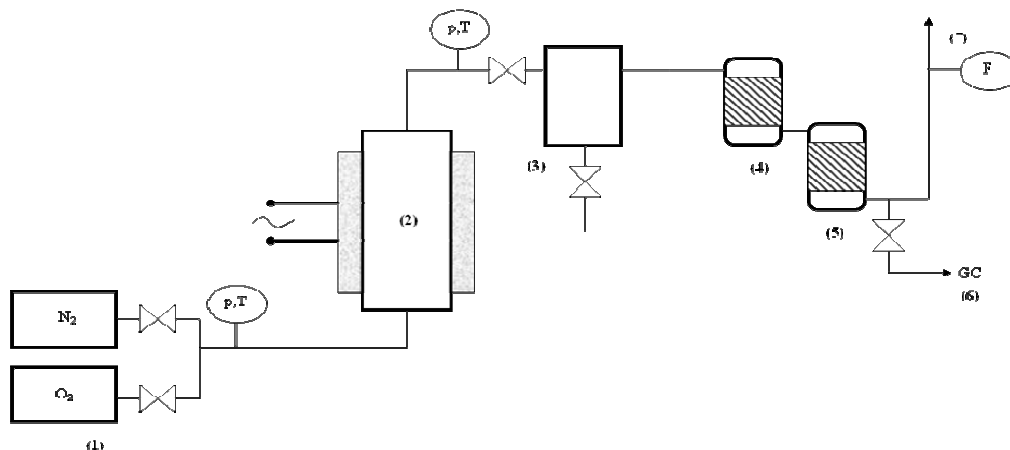
Proces samozapalania węgla często jest postrzegany jako proces wieloetapowy (Falcon 1986; Cygankiewicz 2000; Sawicki 2004). W pracy postuluje się zatem zastosowanie tego samego podejścia do opisu rozwoju pożaru na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych.

2. METODYKA BADANIA SAMOZAPŁONU OBIEKTÓW UFORMOWANYCH Z ODPADÓW POWĘGLOWYCH WRAZ Z CHARAKTERYSTYKĄ WYTYPOWANYCH DO BADAŃ PRÓBEK HAŁD POWĘGLOWYCH

Do badań pobrano pięć próbek odpadów powęglowych z wytypowanych zwałowisk: „Waleska” – kopalnia „Bolesław Śmiały”, „Wrzosa” – kopalnia „Rydułtowy-Anna”, „Szyby Zachodnie” – kopalnia „Jas-Mos”, hałda przy ul. Bielszowickiej w Zabrze po dawnej kopalni „Zabrze” i hałda „Ruda” w Zabrze-Biskupicach. Próbki zostały pobrane zgodnie z normą PN-90/G-04502.

Badania samozapłonu przeprowadzono w laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym, której schemat zaprezentowano na rysunku 1. Przedstawiony tam sys-

tem składa się z: układu doprowadzającego reagenty gazowe – wloty, zawory i regulatory przepływu gazów reakcyjnych (1), reaktora o pojemności 800 cm³ ogrzewanego przy użyciu pieca oporowego (2), układu schładzania gazu powstającego w procesie (3), separatora z płaszczem chłodzącym, systemu oczyszczania i osuszacza gazu (4), filtra cząstek stałych (5), systemu analizy składu gazu z mikrochromatografem gazowym (6) oraz układu do pomiaru natężenia przepływu gazu powstającego w procesie.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym służącej do badania procesu samozapłonu odpadów powęglowych

Fig. 1. Scheme of laboratory installation with fixed-bed reactor designed for investigations into the process of coal waste spontaneous combustion

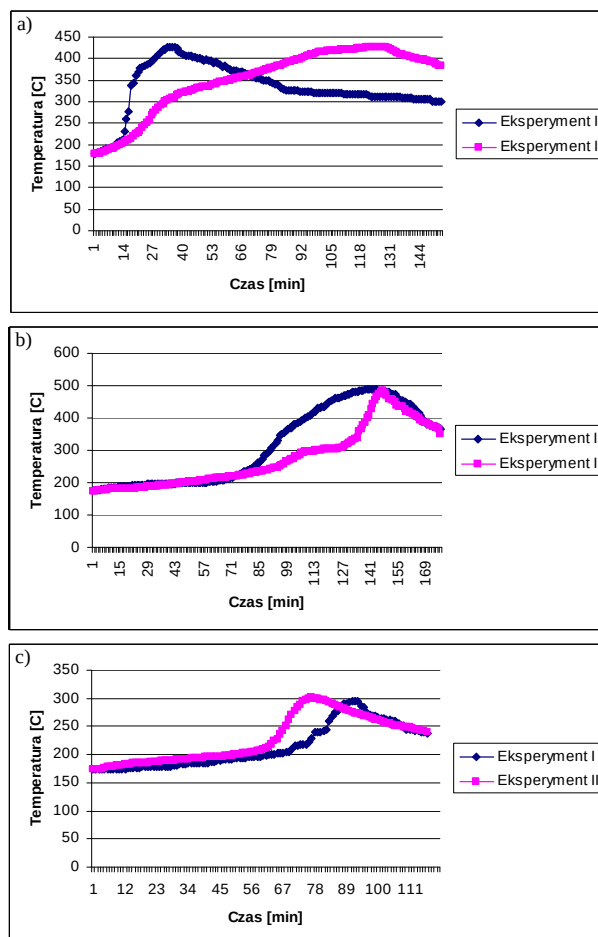
Próbka hałdy powęglowej w stanie analitycznym o masie 150 g i uziarnieniu $d < 0,2$ mm jest umieszczana w dolnej części reaktora, między dwoma warstwami waty kwarcowej. Wata ta jest stosowana w celu zapewnienia lepszego rozkładu temperatury oraz zapobiega porywaniu ziaren próbki przez media gazowe doprowadzane do reaktora i zatykaniu króćca przez cząstki stałe. Następnie próbka jest ogrzewana do temperatury 180°C z prędkością 1,33°C·s⁻¹. Temperatura we wnętrzu reaktora jest mierzona za pomocą termoogniwa. Po ustabilizowaniu się temperatury, do reaktora zostaje wprowadzana mieszanina gazowa o składzie: 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu z natężeniem przepływu 10,5 cm³·s⁻¹. Kolejno produkty reakcji kierowane są do układu separatorów, w których następuje zatrzymanie pary wodnej. Objętość schłodzonego i osuszonego produktu gazowego procesu jest mierzona za pomocą przepływomierza masowego, natomiast skład gazów analizowany przy użyciu mikrochromatografu gazowego.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Dla każdej omawianej tu próbki badanie samozapłonu przeprowadzono dwukrotnie. W rezultacie stwierdzono, że spośród przebadanych próbek do samozapłonu doszło jedynie w przypadku materiału pochodzącego z obiektów: „Waleska” oraz hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany temperatury

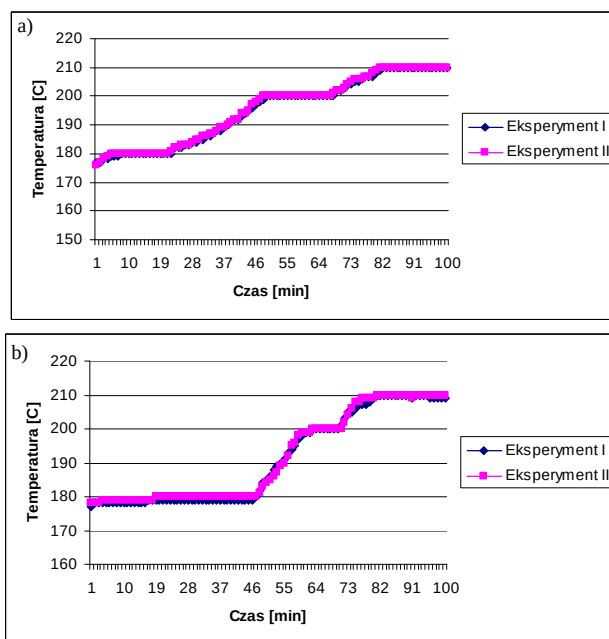
próbek z obiektów: „Waleska”, hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” zachodzące po wprowadzeniu do reaktora mieszaniny gazowej o wyżej podanym składzie. Krzywe zmian temperatury dla obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” miały zbliżony przebieg w obu testach. W przypadku eksperymentów prowadzonych na materiałach z obiektu „Waleska” krzywe te wyraźnie różniły się.

Po wprowadzeniu mieszaniny gazowej do próbek z obiektów „Wrzosey” i „Szyby Zachodnie” nie zaobserwowano efektu samozapłonu. W związku z tym zwiększono wyjściową temperaturę hałdy ze 180°C do 200°C i 210°C. Także ten zabieg nie wywołał samozapłonu pobranego materiału (rys. 3).



Rys. 2. Zmiany temperatury próbek ze zwałowiska: a – „Waleska”, b – przy ulicy Bielszowickiej, c – „Ruda” po wprowadzeniu do reaktora, rozgrzanego do temperatury 180°C, mieszaniny gazowej o składzie 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu

Fig. 2. Temperature changes of samples from the dump: a – “Waleska”, b – in the Bielszowicka street, c – “Ruda” after the introduction into the reactor, heated up to the temperature of 180°C, of the gas mixture composed of 21.3% by volume of oxygen and 78.7% by volume of nitrogen



Rys. 3. Zmiany temperatury próbek ze zwalowiska: a – „Wrzosa”, b – „Szyby Zachodnie” po wprowadzeniu do reaktora, rozgrzanego do temperatury 180, 200 i 210°C, mieszaniny gazowej o składzie 21,3% obj. tlenu i 78,7% obj. azotu

Fig. 3. Temperature changes of samples from the dump: a – „Wrzosa”, b – „Szyby Zachodnie” after the introduction into the reactor, heated up to the temperature of 180, 200, and 210°C, of the gas mixture composed of 21.3% by volume of oxygen and 78.7% by volume of nitrogen

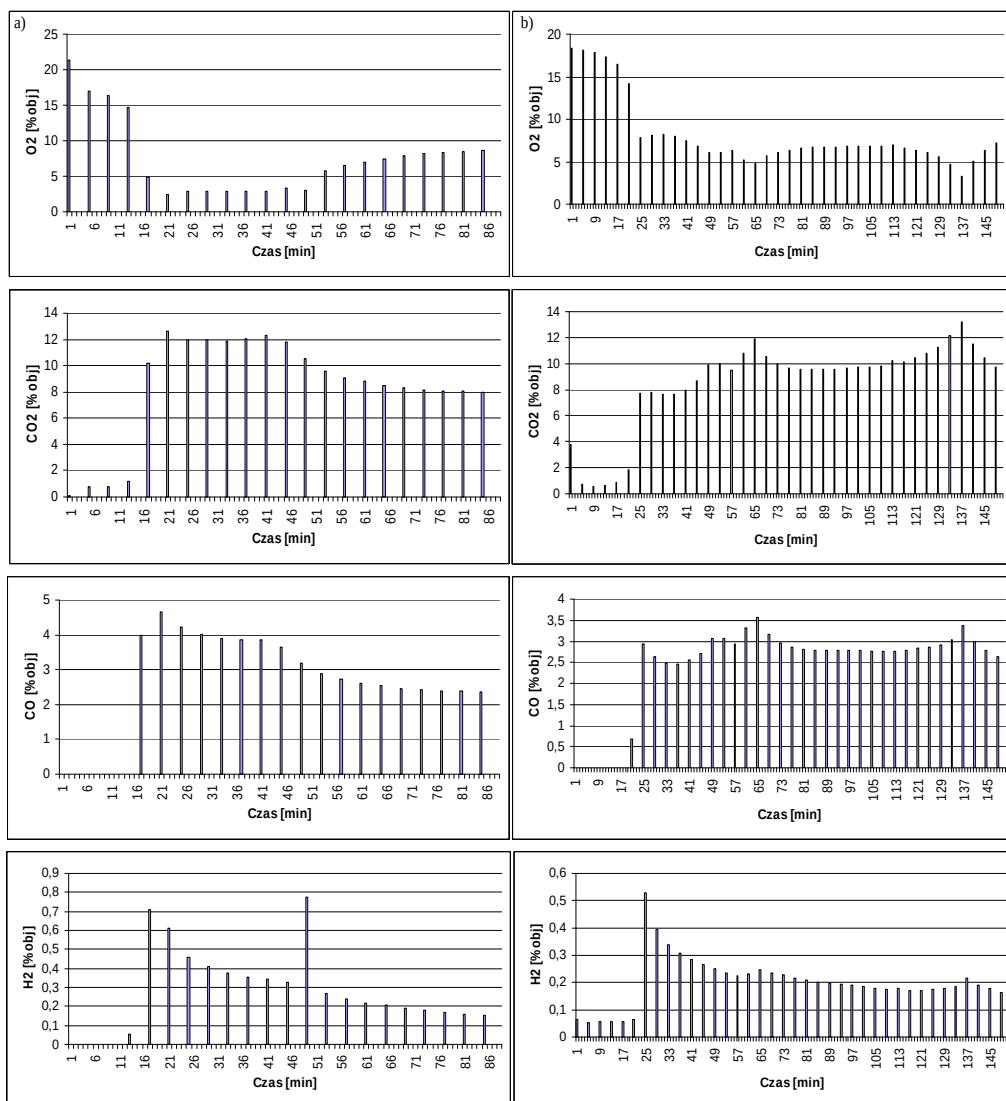
W przypadku krzywej temperatury dla próbek z obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” różnice można zaobserwować wyłącznie w początkowej fazie pożaru, co tłumaczy się wolniejszym jego rozprzestrzenianiem się w usypanym w reaktorze złożu. Z kolei wyraźne różnice w przebiegu krzywej zmian temperatury, w badaniach prowadzonych nad określaniem temperatury samozapłonu próbek z obiektu „Waleska”, świadczą o niejednorodności badanego materiału. Mimo niewielkich różnic w prędkościach rozprzestrzeniania się zapłonu dla próbek z obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”, jak i różnych przebiegów krzywej temperatury dla próbek z obiektu „Waleska”, można wyciągnąć kilka wniosków. Na wszystkich zaprezentowanych wykresach rysuje się zatem wyraźny podział na dwa etapy. Pierwszy z nich to etap związany z rozgrzewaniem się materiału. Obserwuje się tu powolny wzrost temperatury wskutek zachodzących egzotermicznych procesów utleniania. Po skumulowaniu się odpowiedniej ilości ciepła następuje gwałtowny wzrost temperatury, wywołany samozapłonem odpadów. Jest to drugi etap, czyli tzw. rozprzestrzenianie się pożaru. Temperaturę, podczas której następuje samozapłon odpadów, na potrzeby niniejszej pracy, przyjęto nazywać temperaturą krytyczną T_k . W przypadku obiektu uformowanego z odpadów powęglowych w wyniku pożaru obserwuje się wzrost tej temperatury do pewnej wartości granicznej, a następnie temperatura ta utrzymuje się

na stałym poziomie. Wówczas można mówić o trzecim etapie (pełny proces zapożarowania hałdy), który jednak nie jest możliwy do zaobserwowania w reaktorze o ograniczonej objętości. Zamiast tego etapu, w przypadku eksperymentów prowadzonych w reaktorze ze złożem stałym na przedstawionych wykresach (rys. 2), obserwuje się obniżenie temperatury, które jest spowodowane wypaleniem się resztek węgla, zawartych w badanej próbce odpadu.

Istotne, z punktu widzenia przeprowadzonych badań, jest określenie temperatury inicjacji zapłonu odpadów powęglowych, co jednak nie jest możliwe wyłącznie na podstawie analizy zmiany temperatury obiektu w czasie wprowadzania do reaktora mieszaniny gazowej o składzie zbliżonym do składu powietrza. W przypadku analizy zmian temperatury w czasie badań można mówić jedynie o pewnym jej zakresie, w którym następuje samozapłon próbki. W celu określenia początku drugiego etapu związanego z samozapłonem, konieczne jest posłużenie się wynikami analizy gazów wylotowych z reaktora. Pozwoli to na znalezienie wskaźnika, określającego etap rozgrzewania nasypów obiektu czy już zapożarowania. Do analizy składu gazu wylotowego z reaktora wykorzystano mikrochromatograf gazowy AGILENT 3000A. Analiza chromatograficzna pozwoliła określić objętościowy udział w gazie następujących składników: tlen, azot, dwutlenek węgla, tlenek węgla, wodór i metan. Z punktu widzenia badania procesu samozapłonu próbek odpadów powęglowych z hałd istotne było przede wszystkim śledzenie zmian zawartości w otrzymanywanym gazie: tlenu, dwutlenku węgla, tlenku węgla i wodoru. Wyniki analiz poszczególnych składników w otrzymanywanym gazie dla przeprowadzonych prób badań samozapłonu odpadów z obiektów „Waleska”, hałd przy ul. Bielszowickiej i „Ruda” przedstawiono na rysunkach 4–6.

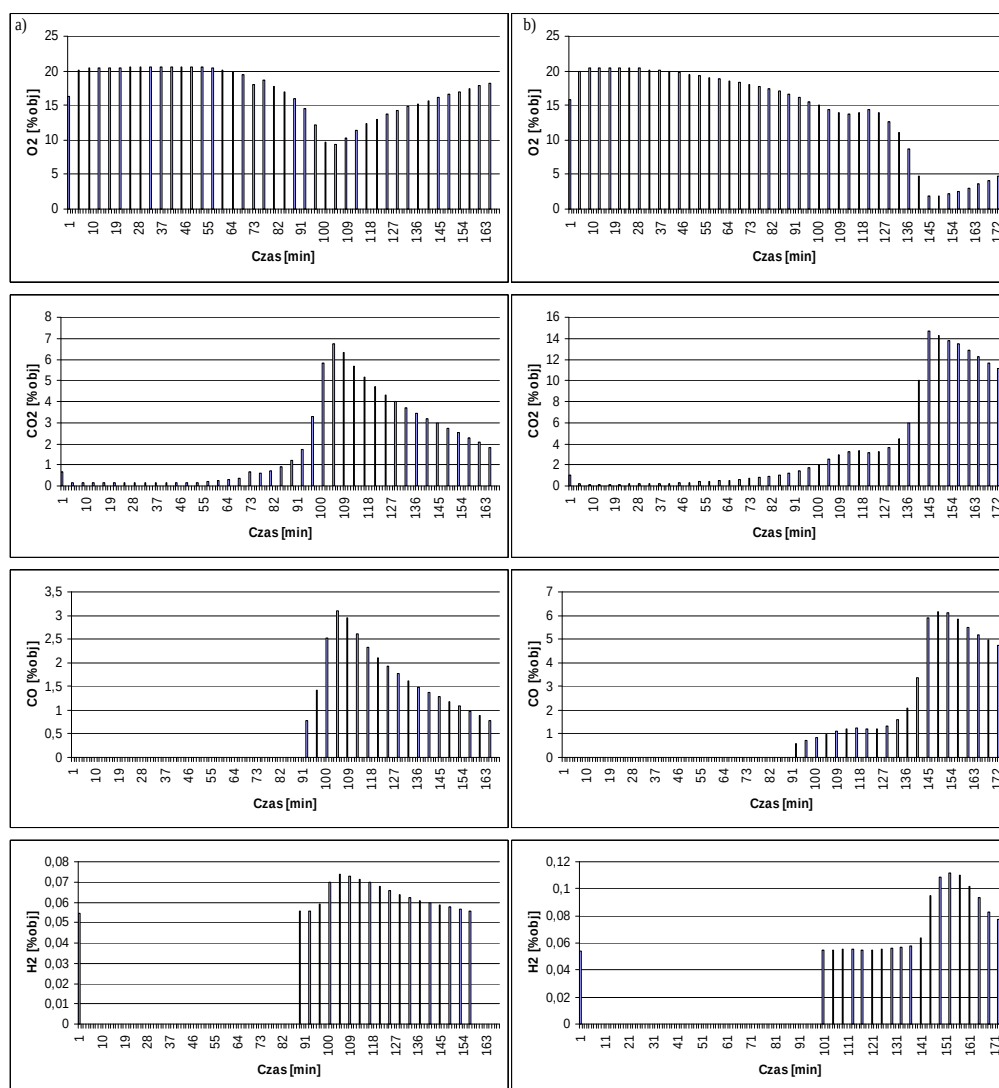
Jednoczesna interpretacja krzywej przedstawiającej zmiany temperatury w czasie badań z analizą składu gazów wylotowych z reaktora pozwala na bardziej dogłębne poznanie zjawiska samozapłonu obiektów uformowanych z odpadów powęglowych. W przypadku obiektów przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”, dla których krzywe zmian temperatury w procesie zapożarowania były powtarzalne w obu eksperymentach, można zauważyć, że pierwszy etap związany z rozgrzewaniem się materiału trwał odpowiednio do 89 i 69 minuty eksperymentu. Stopniowy, intensywny wzrost temperatury, następujący w miarę upływu czasu, wynika z coraz szybszego przebiegu procesu utleniania, a to potwierdza wzrost udziału CO_2 w gazach wylotowych i wzrost zużycia O_2 . Zdecydowane przyspieszenie procesu można zaobserwować od 55 i 44 minuty (odpowiednio dla obiektu przy ul. Bielszowickiej i „Ruda”), gdy widoczny jest znaczący spadek zawartości tlenu w gazach wylotowych z reaktora oraz zdecydowany wzrost zawartości CO_2 . Jako moment samozapłonu przyjmuje się chwilę, w której w gazach wylotowych oprócz CO_2 pojawia się również CO , co świadczy o chwilowym niedoborze O_2 do całkowitego utlenienia. Temperatura, przy której pojawia się CO , traktowana jest jako temperatura krytyczna T_k . W przypadku próbki z obiektu przy ul. Bielszowickiej T_k wynosi średnio 285°C , natomiast w przypadku obiektu „Ruda” T_k wynosi średnio 233°C . Pojawienie się H_2 można również traktować jako pośredni marker samozapłonu. Pochodzi on bowiem najprawdopodobniej z odgazo-

wania resztek węgla występujących w odpadach, a więc świadczy o osiągnięciu odpowiednio wysokiej temperatury złoża w reaktorze.



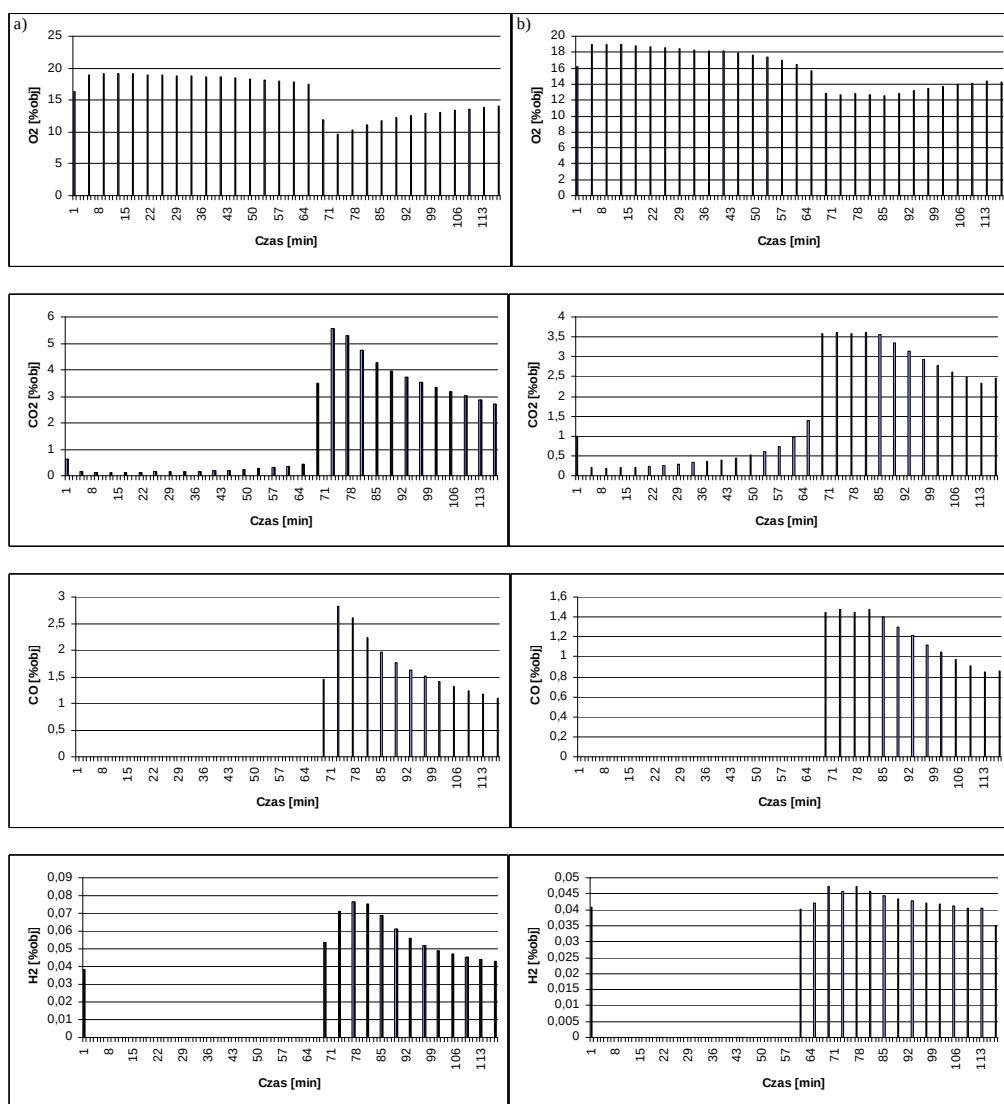
Rys. 4. Zawartość O₂, CO₂, CO i H₂ w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu „Waleska”: a – eksperyment I, b – eksperyment II

Fig. 4. Content of O₂, CO₂, CO and H₂ in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object “Waleska”: a – experiment I, b – experiment II



Rys. 5. Zawartość O₂, CO₂, CO i H₂ w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu przy ul. Bielszowickiej: a – eksperyment I, b – eksperyment II

Fig. 5. Content of O₂, CO₂, CO and H₂ in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object in the Bielszowicka street: a – experiment I, b – experiment II



Rys. 6. Zawartość O₂, CO₂, CO i H₂ w gazach wylotowych z reaktora podczas przeprowadzania prób badania samozapłonu obiektu „Ruda”: a – eksperyment I, b – eksperyment II

Fig. 6. Content of O₂, CO₂, CO and H₂ in outlet gases from the reactor during the performance of trials of spontaneous ignition testing of the object „Ruda”: a – experiment I, b – experiment II

W przypadku badań próbek z obiektu „Waleska” zaobserwowano wyraźne różnice w przebiegu krzywych zmian temperatury w czasie. Z analizy składu gazów można wnioskować, że etap rozgrzewania się próbki do temperatury krytycznej jest znacznie krótszy niż w przypadku próbek z obiektu przy ul. Bielszowickiej. Tlenek węgla wskazujący jednoznacznie na fakt zapożarowania pojawia się w gazach wylotowych z reaktora w obu przeprowadzonych eksperymentach już po 18 minutach od momentu

podania mieszaniny gazowej zawierającej tlen. Jednocześnie należy zwrócić uwagę na brak możliwości dokładnego określenia temperatury samozapłonu, ze względu na istotne różnice w przebiegu krzywych zmian temperatury w czasie. W przypadku pierwszego testu proces zapożarowania przebiegał gwałtownie, a temperatura, przy której pojawił się CO wyniosła 344°C. Szybkość przyrostu temperatury świadczy o tym, że samozapłon nastąpił w zdecydowanie niższej temperaturze (w przedziale temperatur 195–230°C), co przemawiałoby za przyjęciem jako temperatury krytycznej wartości z tego przedziału. W przypadku drugiego eksperymentu CO pojawił się w gazie wylotowym z reaktora w temperaturze 218°C i tę temperaturę można uznać za temperaturę krytyczną.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń oraz przeprowadzonych obserwacji obiektów uformowanych z odpadów powęglowych (Falcon 1986) można zaproponować przedstawienie samozapłonu zwałowiska jako procesu składającego się z trzech faz: powolnego utleniania, rozwoju pożaru (samozapłon) oraz pożaru (płonący obiekt). Każdy z etapów posiada swoje cechy charakterystyczne. Poniżej przedstawiono opis każdej z faz. Należy zaznaczyć, że prezentowana koncepcja stanowi hipotezę i próbę ujęcia procesu rozwoju pożaru na obiekcie w proces złożony z szeregu etapów, nie stanowi jednak gotowego rozwiązania; nie ma charakteru kompletnej teorii tego zjawiska. Podczas rozważania procesów zachodzących na obiekcie przyjęto założenie, że materiał na nim ulokowany, składa się z drobin węgla otoczonych drobinami materiału skalnego. Ułożenie drobin jest na tyle luźne, że zachodzi transport powietrza atmosferycznego z zewnętrznych obszarów obiektu w otoczenie rozważanej drobinę węgla oraz odprowadzanie produktów gazowych zachodzących reakcji chemicznych na zewnątrz. Proponuje się założenie, że szybkość zjawisk transportu może być porównywalna z szybkością zachodzących reakcji chemicznych lub ją przewyższać. O podatności obiektu na samozapłon będzie decydowała: zawartość węgla, dostępność powietrza (a dokładniej zawartego w nim tlenu) oraz skuteczność odprowadzania ciepła z obszaru bryły obiektu. Charakterystyka faz samozapłonu obiektu obejmuje fazy powolnego utleniania, rozwoju pożaru oraz samego pożaru.

Podczas rozpatrywania procesów zachodzących w zdeponowanej na obiekcie materii wyróżniono fazę powolnego utleniania, w której panująca temperatura jest zbliżona do temperatury otoczenia i nie są obserwowane żadne zjawiska świadczące o zachodzeniu gwałtownych przemian fizykochemicznych w jego bryle. Postulowane jest zachodzenie w tej fazie powolnego utleniania węgla do CO₂, czemu towarzyszy powolne wydzielanie ciepła. Szybkość tej reakcji w warunkach temperatury rzędu kilkudziesięciu stopni Celsjusza jest niewielka. Badając drobinę węgla, otoczoną materiałem skalnym, można stwierdzić, że zachodzące zjawiska transportu (dostarczanie tlenu i odprowadzanie produktów spalania) zachodzą dostatecznie szybko, aby zapewnić wystarczającą ilość tlenu w pobliżu drobinę węgla (czynnikiem limitującym szybkość procesu jest kinetyka zachodzącej reakcji). Również skuteczność odprowadzania ciepła jest wystarczająca do rozproszenia energii wydzielanej w wyniku zachodzenia reakcji chemicznej. Nie jest obserwowany istotny wzrost temperatury, wynikający z zachodzących procesów, a jej zmiany zachodzą powoli i są silnie związane ze zmianami temperatury otoczenia drobin węgla. Drobinę węgla wraz z otoczeniem,

traktowana jako układ dynamiczny, znajduje się w punkcie stabilnym. Możliwe jest jednak wytrącenie układu z tego stanu, co może doprowadzić do samozapłonu. Zmiana taka możliwa jest np. przez doprowadzenie dodatkowej porcji energii cieplnej spoza układu lub zmianę efektywności odprowadzania ciepła (zmniejszenie).

Jeżeli szybkość wydzielania się ciepła podczas reakcji tlenu z węglem przewyższa ilość możliwą do rozproszenia przez otoczenie drobiny węgla, powodując tym samym wzrost temperatury w jej otoczeniu, proces wchodzi w kolejną fazę – rozwoju pożaru. Wzrost temperatury przekłada się na zwiększenie szybkości reakcji (zgodnie z prawem Arrheniusa), co z kolei prowadzi do wydzielania większej ilości ciepła oraz wzrostu temperatury. Proces w tej fazie jest procesem dynamicznym, jego stan zmienia się wraz z upływem czasu. Oprócz charakterystycznego dla tej fazy wzrostu temperatury, obserwuje się pojawienie się substancji chemicznych, takich jak wodór czy tlenek węgla. Ich obecność świadczy o zachodzeniu, oprócz utleniania węgla do CO_2 , również innych reakcji chemicznych. Moment pojawienia się tych substancji może być traktowany jako znacznik rozpoczęcia zapłonu materiału, a odpowiadająca pojawieniu się tych substancji temperatura, temperaturą krytyczną, której osiągnięcie oznacza faktyczne rozpoczęcie reakcji spalania. Obecność gazów, takich jak CO , może świadczyć o niewystarczającej ilości O_2 dostarczonej do rozważanej drobiny węgla, co sugeruje, że istotnymi czynnikami wpływającymi na szybkość procesu, oprócz kinetyki chemicznej, są zachodzące zjawiska transportu masy. Faza druga kończy się w chwili, gdy ponownie zostanie osiągnięty stan równowagi pomiędzy szybkością wydzielania się energii cieplnej w wyniku zachodzenia reakcji egzotermicznych, a jej pobieraniem przez zachodzące reakcje endotermiczne oraz rozproszeniem do otoczenia. Po osiągnięciu stanu równowagi materiał płonie i rozpoczyna się trzecia faza procesu – pożar. Charakteryzuje się ona dużą stabilnością. Wszystkie zachodzące reakcje chemiczne przebiegają ze stałą (średnią) prędkością, a zjawiska transportu masy i energii są wystarczająco efektywne do podtrzymania procesu na tym poziomie, ale za mało efektywne, aby możliwy był dalszy wzrost temperatury. Materiał zwałowiska znajduje się w tej fazie aż do chwili wyczerpania węgla niezbędnego do zachodzenia reakcji spalania. Alternatywnie, faza trzecia może się zakończyć przez ograniczenie dostępu tlenu lub gwałtowne obniżenie temperatury. Należy jednak zaznaczyć, że obniżenie temperatury doprowadzi do spowolnienia zachodzących reakcji egzotermicznych do tego stopnia, aby rozpraszanie uwalnianej w wyniku ich zachodzenia energii cieplnej było wystarczające do przeciwdziałania wzrostowi temperatury zwałowiska.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaproponowany opis rozwoju zjawisk pożarowych na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych jako proces trzyetapowy pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zapobieganie powstawaniu pożarów na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych, powinno obejmować działania pozwalające na utrzymywanie procesu w fazie pierwszej. Technologiczny sposób takich działań powinien być dostosowany do konkretnego rodzaju odpadu powęglowego i charakterystyki obiektu.

2. Na ryzyko zapożarowania mają wpływ warunki lokalnie występujące w danym miejscu zwałowiska. Podgrzanie materiału pochodzącego z różnych miejsc zwałowiska do tej samej temperatury nie musi prowadzić do tych samych zjawisk. Dla niektórych obszarów może nastąpić po takim podgrzaniu przejście do fazy drugiej, inne mogą nadal pozostać w fazie pierwszej.
3. Pojawienie się gazów, takich jak CO czy H₂ jest wskaźnikiem osiągnięcia przez zwałowisko stanu inicjacji zapożarowania.

Literatura

1. Arisoy A., Beamish B., Cetegen E. (2006): Modeling Spontaneous Combustion of Coal. Turkish Journal of Engineering and Environmental Science Vol. 30, s. 193–201.
2. Cygankiewicz J. (2000): About determination of susceptibility of coals to spontaneous combustion using an adiabatic test method. Archives of Mining Sciences Vol. 45, issue 2, s. 247–273.
3. Drenda J., Róžański Z., Słota K., Wrona P. (2007): Zagrożenie pożarowe na zwałowiskach odpadów powęglowych. Górnictwo i Geoinżynieria t. 31, z. 3/1.
4. Falcon R.M. (1986): Spontaneous combustion of the organic matter in discards from the Witbank coalfield. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy Vol. 86, no. 7, s. 243–250.
5. Gumińska J., Róžański Z. (2005): Analiza aktywności termicznej śląskich składowisk odpadów powęglowych. Karbo nr 1.
6. Korsi J., Henslok P., Bodynek P. (2004): Doświadczenia z likwidacji zapożarowania składowiska odpadów powęglowych „Skalny” w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo nr 1650, s. 463–473.
7. Sawicki T. (2004): Samozapalenie węgla w zawale jako przyczyna pożarów. Karbo nr 1.

Michał Gwoździwicz*, Mirosława Bukowska*

ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW WYDOBYWCZYCH W BRYLE SKŁADOWISKA „BOGDANKA” W ŚWIEŹLE BADAŃ MODELOWYCH ORAZ *IN SITU*

Streszczenie

Składowanie odpadów wydobywczych z górnictwa węgla kamiennego powoduje duże zmiany struktury skał, szczególnie składu ziarnowego i wartości ich parametrów filtracyjnych. Wietrzenie odpadów zwiększa kompaktację zwałowanych skał, zwłaszcza przy dużych wysokościach (miąższości) składowiska odpadów wydobywczych. Taka sytuacja ma miejsce na składowisku „Bogdanka” w Lubelskim Zagłębiu Węglowym. W artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów wydobywczych *in situ* na składowisku. Zaprezentowano także wyniki badań laboratoryjnych, z uwzględnieniem modelu pionowego zagęszczenia odpadów na skutek wietrzenia fizycznego i nacisku pionowego nadkładu. Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie rzeczywistych zmian współczynnika filtracji w bryle składowiska nadpoziomowego wraz z wiekiem jego składowania na powierzchni oraz sukcesywnego podnoszenia wysokości składowiska do około 60 m. Ocena wybranych parametrów fizykomechanicznych i filtracyjnych oraz ich zmian dostarcza danych, które mogą być wykorzystane w praktyce, np. przy projektowaniu obiektów inżynierskich i hydrotechnicznych.

Changes of the filtration coefficient of mining exploitation wastes of different ages in the solid of the “Bogdanka” dump in the light of model and *in situ* investigations

Abstract

The storage of exploitation wastes from hard coal mining causes great changes of the rock structure, particularly of the size analysis and values of rock filtration parameters. The weathering of wastes increases the compaction of dumped rocks, especially in the case of great height of the exploitation wastes dump. Such a situation takes place at the “Bogdanka” dump in the Lublin Coal Basin. The article presents the results of investigations of the filtration coefficient of mining exploitation wastes of different ages *in situ* at the dump. Moreover, the results of laboratory tests have been presented taking into account the model of vertical waste compaction as a result of physical weathering and vertical pressure of the overburden. The performed investigations aimed at the determination of real changes of the filtration coefficient in the solid of the dump along with the age of its storage on the surface and successive increase of the height of the dump up to about 60 m. The assessment of selected physico-mechanical and filtration parameters and their changes provides data, which can be used in practice, for example when designing engineering and hydrotechnical objects.

1. WPROWADZENIE

Kopalnia Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA jest jednym z największych wytwórców odpadów wydobywczych wschodniej Polski. Obecnie ilość wytwarzanych tam odpadów sięga prawie 2 mln ton rocznie. Ze względu na rozbudowę kopalni zaplano-

* Główny Instytut Górnictwa

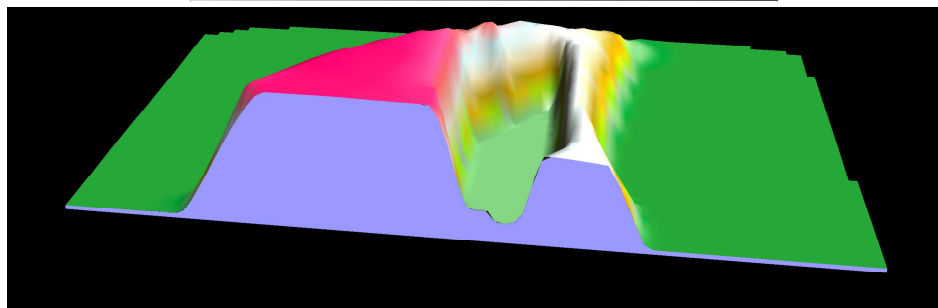
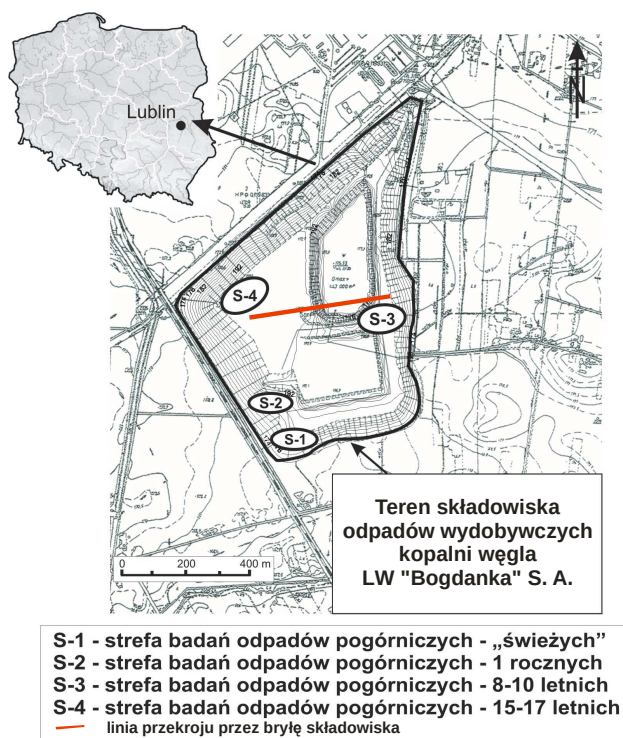
wano powiększenie obszaru składowiska, a także wzrost rocznego składowania odpadów do około 6 mln ton. W związku z planowanym rozwojem, składowisko odpadów w kolejnych latach zostanie rozbudowane z obecnych 60 do 144 ha, docelowo zaś do 230 ha. Pozwoli to na zwiększenie ilości zwałowanych odpadów do około 120 mln ton. Obecna wysokość składowiska wynosi około 30 m, a w przyszłości rozważa się możliwość jego podniesienia do wysokości 60 m n.p.t. Określenie wartości współczynnika filtracji zwałowanych odpadów wydobywczych w Lubelskim Zagłębiu Węglowym i określenie zmian zachodzących w czasie zwałowania odpadów oraz zwiększanie wysokości składowiska są istotnymi czynnikami, które warunkują ilość i szybkość uwalnianych odcieków z bryły składowiska. Szybki rozpad ziarnowy w wyniku wietrzenia fizycznego odpadów wydobywczych oraz bardzo mała i mała wytrzymałość na ściskanie zwałowanych skał (Bukowska 2012) to ważne czynniki zmieniające wartości współczynnika filtracji w obrębie bryły składowiska na przestrzeni lat. Zmiany te intensyfikują się zwłaszcza w wyniku wzrostu ciśnienia pionowego, wynikającego z wysokości składowiska.

Proces zmian fizykomechanicznych skał jest interesujący ze względu na szybkie zniszczenie naturalnej struktury wydobytych skał karbońskich na skutek ich fizycznego wietrzenia i wzajemnego przypadkowego pokruszenia, rozdrobnienia, wymieszania i nawodnienia. W rezultacie nakładania się tych procesów powstaje nowy rodzaj gruntu o właściwościach odmiennych od pierwotnego. Ocena zmian parametrów filtracyjnych zdeponowanych skał oraz ich stopniowego przekształcenia dostarcza informacji, które mogą być wykorzystane przy zagospodarowaniu odpadów wydobywczych do celów budowlanych lub środowiskowych. Należy pamiętać, że istotnym kryterium przy wykorzystywaniu odpadów dla potrzeb inżynierskich jest wartość współczynnika filtracji.

2. KRYTERIA WYBORU OBIEKTU BADAŃ I SPOSOBU ICH PROWADZENIA

W związku z małą zmiennością litologiczną zdeponowanych karbońskich odpadów wydobywczych gromadzonych na składowisku przez wiele lat (badania prowadzone w latach 1995–2011) oraz niezmiennymi od wielu lat warunkami technicznymi składowania stwierdzono, że składowisko „Bogdanka” jest dobrym obiektem do badania i modelowania zmian wybranych parametrów odpadów. Dodatkowym kryterium wyboru było występowanie na wierzchowinie składowiska obszarów, na których, od kilkunastu lat po zakończeniu składowania odpadów, nie były prowadzone prace. Wytypowano zatem cztery różnowiekowe obszary badawcze na wierzchowinie składowiska. W ich obrębie, w latach 2007–2011 przeprowadzano szereg badań i pomiarów polowych oraz pobierano próbki do badań laboratoryjnych. Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację obszarów badań oraz linię przekroju, którą wytypowano do wykonania modelu obliczeniowego. Dodatkowo, na świeżych odpadach pobranych po zwałowaniu na składowisko oraz z taśmociągu transportującego odpady z zakładu przerobczego, wykonano badania laboratoryjne dla modelu zmian współczynnika filtracji. Badania te prowadzono w warunkach symulujących rozpad ziarnowy skał na skutek wietrzenia i zmiany ciśnienia nakładu na różnych głębokościach zalegania

w bryle składowiska. Wyniki badań laboratoryjnych i *in situ* współczynnika filtracji na składowisku wykorzystano do opracowania modelu zmienności współczynnika filtracji w obrębie składowiska o projektowanej wysokości 60 m, wzdłuż linii przekroju (rys. 1).



Rys. 1. Lokalizacja składowiska odpadów wydobywczych kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA z zaznaczonymi obszarami badań różnowiekowych odpadów wydobywczych *in situ*, linią przekroju oraz przekrojem przez model powierzchni składowiska

Fig. 1. Location of the dump of mining exploitation wastes of the Lublin Coal “Bogdanka” mine with marked areas of investigations of exploitation wastes of different ages *in situ*, cross-section line and cross-section through the dump surface model

3. CHARAKTERYSTYKA SKŁADOWANYCH ODPADÓW KOPALNI LUBELSKI WĘGIEL „BOGDANKA” SA

Odpady wydobywcze z Lubelskiego Zagłębia Węglowego od 1982 r. są składowane na składowisku kopalni w Bogdance k. Łęcznej. Miejsce to zlokalizowane jest kilkaset metrów na południe od głównych szybów kopalni „Bogdanka”. Materiałem budującym składowisko są skały płonne, pochodzące z zakładu wzbogacania węgla tejże kopalni oraz z robót górniczych i udostępniających dwa pokłady (382 i 385/2) z obrębu warstw lubelskich (westfal B) (tab. 1).

Tabela 1. Stratygrafia karbonu górnego wraz ze stosowanymi podziałami i ogniwami stratygraficznymi Górnośląskiego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego oraz z położeniem pokładów 382 i 385/2 (Raport... 2009)

Podział karbonu rekomendowany przez ICS (2008)		Podział stosowany w opracowaniach naukowych		Podział stosowany w górnictwie		Wiek (mln lat)	Podział karbonu LZW		
Epoka	Wiek	Ogniwa litostratygraficzne GZW					litostratygrafia		
PENNSYLVAN	środkowy	moskow	WESTFAL	SERIA KRAKOWSKA MULOWCOWA PISAKOWCOWA	warstwy lbiańskie p.110	warstwy lbiańskie p.110	307,2±1,0	formacja magnuszewska	
					 p.119	grupa pokładów 100 p.119 p.201			
					warstwy łaziskie	warstwy łaziskie p.215 p.301	grupa pokładów 200		
	dolny	baszkir	WESTFAL	SERIA KRAKOWSKA MULOWCOWA PISAKOWCOWA	warstwy orzeskie s.s. poziom zmiany facjalnej p.301	warstwy orzeskie p.364 p.401	grupa pokładów 300	311,7±1,1	w-wy lubelskie = pkt. 382 pkt. 385/2
					warstwy zaleńskie	warstwy rudzkie p.419 p.501	grupa pokładów 400		
					MISSISSIP	górny	serpuchow	NAMUR	SERIA GORNOŚLĄSKA PASKOWCOWA PARALICZNA
warstwy siódłowe p.510	warstwy siódłowe p.630 p.701	grupa pokładów 600							
warstwy jejkowickie poziom zmiany facjalnej p.m. Gaebler	warstwy jejkowickie p.723 p.801	grupa pokładów 700	328,3±1,6	formacja terebina					
warstwy jejkowickie p.m. Barbara	warstwy jejkowickie p.848 p.901	grupa pokładów 800							
warstwy grodzieckie	warstwy jejkowickie p.915	grupa pokładów 900							
warstwy florowskie* p.m. Enna	warstwy jejkowickie p.915	grupa pokładów 900							
warstwy sarnowskie* p.m. Star. (XVI)	warstwy jejkowickie p.915	grupa pokładów 900							

- piaskowce średnioziarniste i drobnoziarniste,
- syderyty ilaste,
- sferosyderyty.

4. METODYKA BADAŃ WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI

Istotną właściwością ośrodka porowatego, którą wykorzystuje się do określenia prędkości migracji zanieczyszczeń i w geotechnice, zwłaszcza przy budowie obwałowań osadników, cieków, wałów przeciwpowodziowych jest jego przepuszczalność. Jest ona najczęściej wyrażona za pomocą współczynnika filtracji. Spośród wielu metod określania wartości tego parametru (Pazdro 1977; Myslińska 1998) w artykule omówiono jedynie te, które zostały wykorzystane przez autorów niniejszego artykułu.

4.1. Badania terenowe metodą infiltrometru Guelph

Badania terenowe współczynnika filtracji w różnowiekowych obszarach składowiska wykonano przy zastosowaniu aparatu Guelph Pressure Infiltrometr 2805 (Guelph... 2005) na głębokościach od 0,1 do 1,0 m pod powierzchnią składowiska. Metoda pomiarowa polega na wykonaniu otworu w gruncie specjalnym świdrem o średnicy 50,8 mm. Do tak przygotowanego otworu wprowadza się następnie końcówkę infiltrometru zaopatrzoną w kulkowo-ciśnieniowy zawór, który utrzymuje stały poziom wprowadzonej tam wody. Badanie za pomocą infiltrometru Guelph opiera się na zasadzie działania tuby Mariotte'a i prawie Boyle'a-Mariotte'a. Pomiar i obsługa urządzenia w terenie umożliwiają wykonanie pomiarów dla gruntów spoistych, które trwają od kilkunastu do kilkudziesięciu minut. W trakcie przebiegu eksperymentu mierzy się różnice naporu hydraulicznego ΔH do chwili osiągnięcia ustalonego przepływu (rys. 2). Stanowi to podstawę obliczeń współczynnika filtracji za pomocą wzoru [patrz wzór (1)], który został podany przez Moriana i Olsena w 1987 r. (Elrick i in. 1990; Elrick, Reynolds 1992; Esaki i in. 1996).

Współczynnik filtracji z użyciem infiltrometru Guelph k_f [LT-1] oblicza się według wzoru

$$k_f = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (1)$$

gdzie:

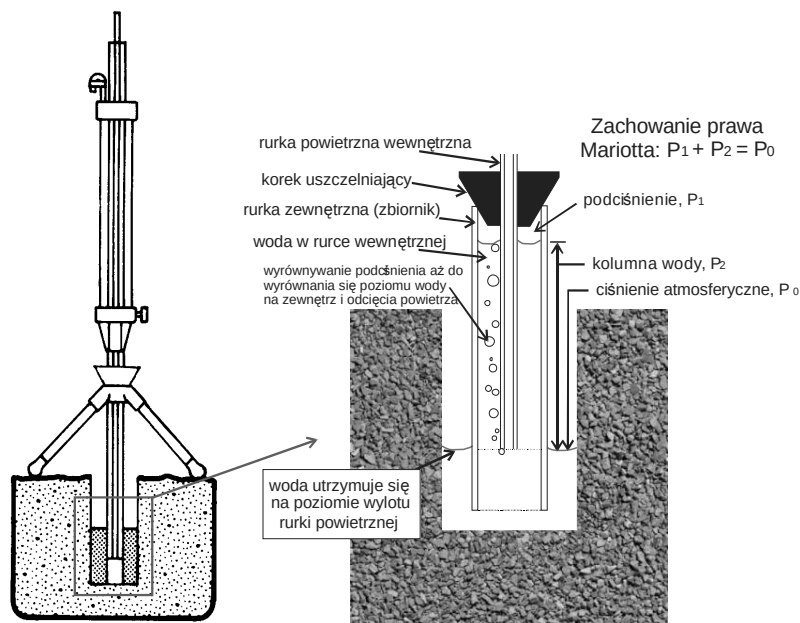
$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]},$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2 H_1 H_2 (H_2 - H_1) + \alpha^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]},$$

$Q_1 = (X) \overline{R_1}$ – funkcja spadku objętości słupa wody (prędkości spadku poziomu wody) w tubie infiltrometru przy H_1 ,

$Q_2 = (X) \overline{R_2}$ – funkcja spadku objętości słupa wody (prędkości spadku poziomu wody) w tubie infiltrometru przy H_2 , przy czym:

H_1 i H_2 – wysokości słupa wody w tubie Mariotte’a, gdzie H_1 – wysokość początku pomiaru, H_2 – wysokość na końcu pomiaru, C_1 i C_2 – współczynniki ciśnienia przepływu wody odpowiadające wysokościami słupa wody H_1 i H_2 , α – log dziesiętny z funkcji przewodności hydraulicznej do ciśnienia ssącego gruntu (standardowo w literaturze stosuje się wartość 0,5 – bezwymiarowy (Guelph... 2005).

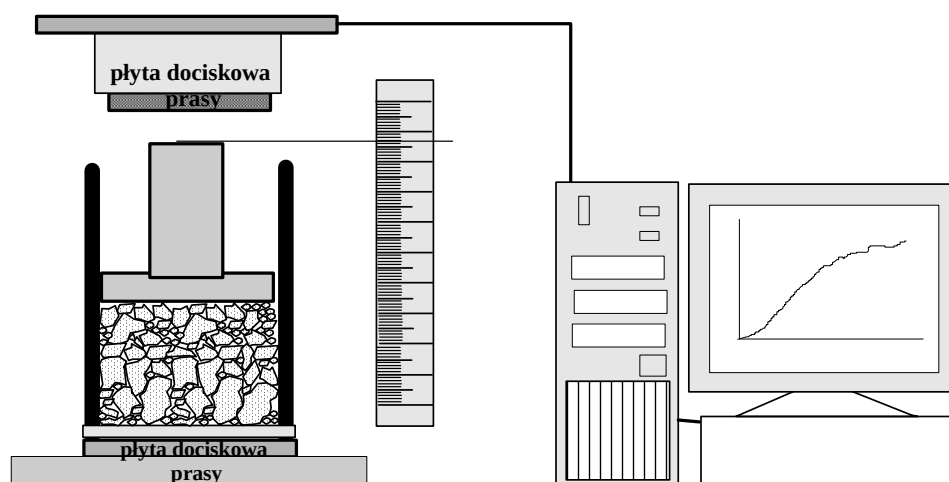


Rys. 2. Ogólny widok infiltrometru oraz schematycznie przedstawiona zasada działania i zastosowanie infiltrometru Guelph

Fig. 2. General view of an infiltrometer and schematically presented principle of operation and application of the Guelph infiltrometer

4.2. Badania laboratoryjne z zastosowaniem aparatu typu edometr (Bromek, Bukowski 2002)

Zastosowany w badaniach aparat typu edometr to modyfikacja metody rurki Kamińskiego, opracowana w Głównym Instytucie Górnictwa, w celu określania współczynnika filtracji zasypów likwidowanych szybów kopalnianych (Bromek, Bukowski 2002). Autorzy pracy w prowadzonych badaniach zastosowali zmienno-gradientowy sposób pomiaru. Oznacza to, że gradient hydrauliczny zmniejsza się wraz z upływem czasu, zbliżając się asymptotycznie do określonego poziomu. Ze względu na niewielkie różnice w poziomach wody przed i po zakończeniu badania, twórcy tej metody przyjęli wartość spadku hydraulicznego równą jeden. Na próbce uprzednio nawodnionej i odsączonej grawitacyjnie naprzemiennie prowadzi się badania współczynnika filtracji i ściśliwości materiału skalnego. Próbkę umieszcza się w naczyniu między płytami maszyny wytrzymałościowej (rys. 3).

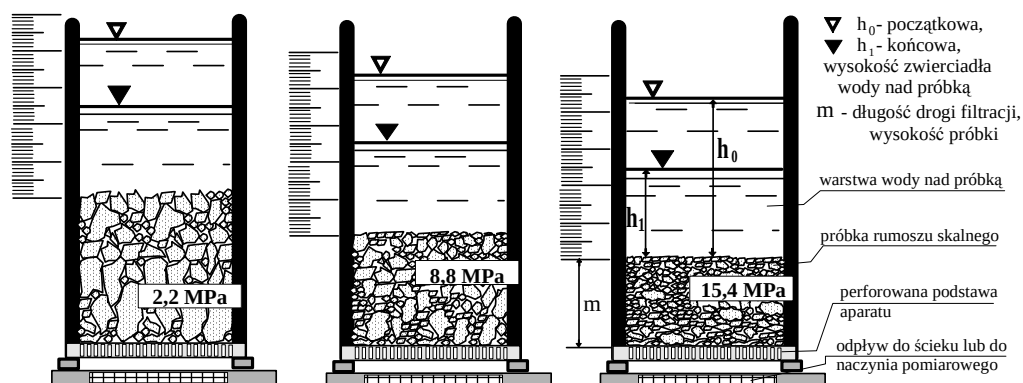


Rys. 3. Schemat urządzenia do pomiarów ścisłości materiału skalnego oraz badania współczynnika filtracji po kolejnych etapach ściskania próbki (Bromek, Bukowski 2002)

Fig. 3. Scheme of device for measurements of rock material compressibility and investigations of the filtration coefficient after successive stages of sample compression (Bromek, Bukowski 2002)

Przebieg oznaczenia współczynnika filtracji skał pobranych ze składowiska „Bogdanka”, wykonany w omawianym aparacie pomiarowym, miał następujący przebieg:

- ściskanie wilgotnych odpadów wydobywczych w maszynie wytrzymałościowej, pomiar obciążenia i odkształcenia próbki,
- zalanie próbki wodą w sposób pozwalający na przepuszczenie przez nią wody, od momentu zaobserwowania wypływu z dolnej części aparatu, aż do ustalenia się wartości przepływu wody przez próbkę (rys. 4),
- pomiar czasu obniżania się poziomu wody nad próbką umieszczoną w aparacie od wartości h_0 do h_1 (S),
- obliczenie współczynnika filtracji zgodnie ze wzorem na obliczanie wodoprzepuszczalności metodą rurki Kamieńskiego według metodyki przedstawionej w pracy Myślińskiej (1998),
- odsączenie wody z próbki, a następnie ponowne jej ściskanie w prasie z rejestracją obciążenia i odkształcenia; następnie powtórzenie cyklu badania współczynnika filtracji dla kolejnych wyższych wartości ciśnienia pionowego,
- powtórzenie cyklu badawczego z krotnością zależną od potrzeb – w przypadku odpadów wydobywczych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego do momentu uzyskiwania zakładanego ciśnienia pionowego lub wyników współczynnika filtracji poniżej $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s (wartości na poziomie $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s i mniejsze wymagają bardzo długiego czasu pomiarów).



Rys. 4. Schemat przeprowadzenia badania współczynnika filtracji odpadów wydobywczych (Bromek, Bukowski 2002)

Fig. 4. Scheme of investigation conducting of the filtration coefficient of mining exploitation wastes (Bromek, Bukowski 2002)

Współczynnik filtracji k dla tej metody można obliczyć według wzoru

$$k = \frac{m}{T} f\left(\frac{S}{h_0}\right) \quad (2)$$

gdzie:

- m – wysokość badanej próbki w przyrządzie, cm;
- T – czas obniżania się słupa wody na wysokości S od początku pomiaru, s;
- S – wielkość obniżenia się słupa wody ($h_0 - h_1$), cm; przy czym: h_0 – początkowa wysokość wody, cm; h_1 – końcowa wysokość wody, cm;
- $f(S/h_0)$ – współczynnik zależny od wartości funkcji różnicy S do h_0 (Myślińska 1998).

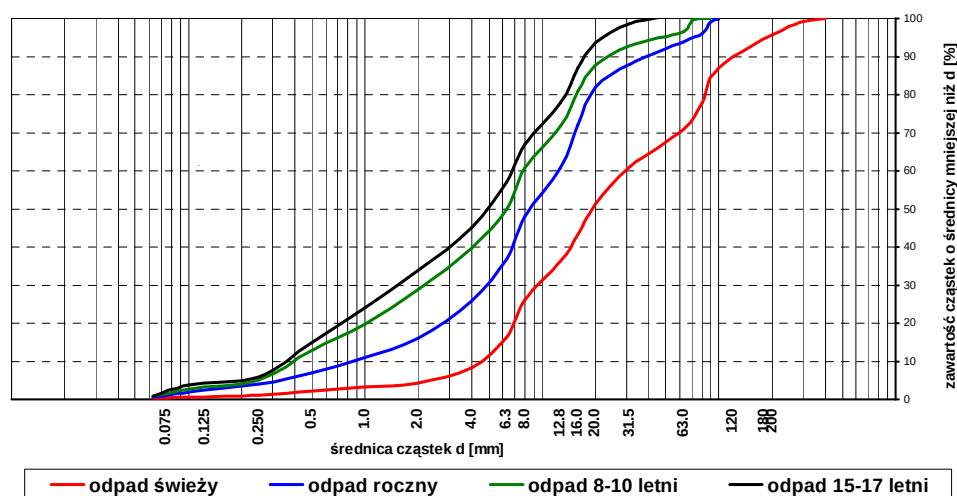
5. ZMIANY UZIARNIENIA RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW

5.1. Zmiany uziarnienia w warunkach składowania odpadów

Zmniejszanie się średnicy ziaren oraz rozpad okruchów skał karbońskich zdeponowanych na składowisku „Bogdanka”, powodują obniżanie współczynnika filtracji całego składowiska. Dla zobrazowania rozpadu fizycznego skał zwałowanych przedstawiono krzywe granulometryczne różnowiekowych odpadów pogórnich oraz tzw. odpadów świeżych ze zwałowiska „Bogdanka” (rys. 5).

Z porównania składu granulometrycznego świeżych odpadów pogórnich (patrz rys. 1 – strefa S-1 na składowisku) z uziarnieniem odpadów zalegających na składowisku od kilku do kilkunastu lat wynika, że odpady te wraz z czasem ich zalegania zawierają zdecydowanie mniej ziaren należących do frakcji kamienistej (wietrzenie fizyczne). Zwiększa się natomiast zawartość ziaren drobniejszych, szczególnie frakcji piaskowej i pyłowej. W miarę upływu czasu składowania odpadów ich uziarnienie zmienia się najszybciej w warstwie przypowierzchniowej, która odpowiada w przybliżeniu strefie

przemarzania (do 1,0 m). Proces ten zauważono, obserwując zmiany uziarnienia odpadów pobranych z warstwy o grubości do 1 m w różnowiekowych strefach zwałowiska – po okresie około jednego roku, 8–10 latach i 15–17 latach ich składowania (rys. 1). Zmiany uziarnienia w wyniku wietrzenia fizycznego na składowisku „Bogdanka”, po różnym okresie składowania przedstawiono na fotografiach 1–4.



Rys. 5. Przykładowe krzywe uziarnienia różnowiekowych odpadów składowiska „Bogdanka”

Fig. 5. Examples of graining curves of fresh wastes of different ages of the “Bogdanka” dump



Fot. 1. Odpady bezpośrednio po ich zeskładowaniu

Photo 1. Wastes directly after their storage



Fot. 2. Odpady po okresie około roku składowania

Photo 2. Wastes after the period of about one year of storage



Fot. 3. Odpady po około 8–10 latach składowania
Photo 3. Wastes after about 8–10 years of storage



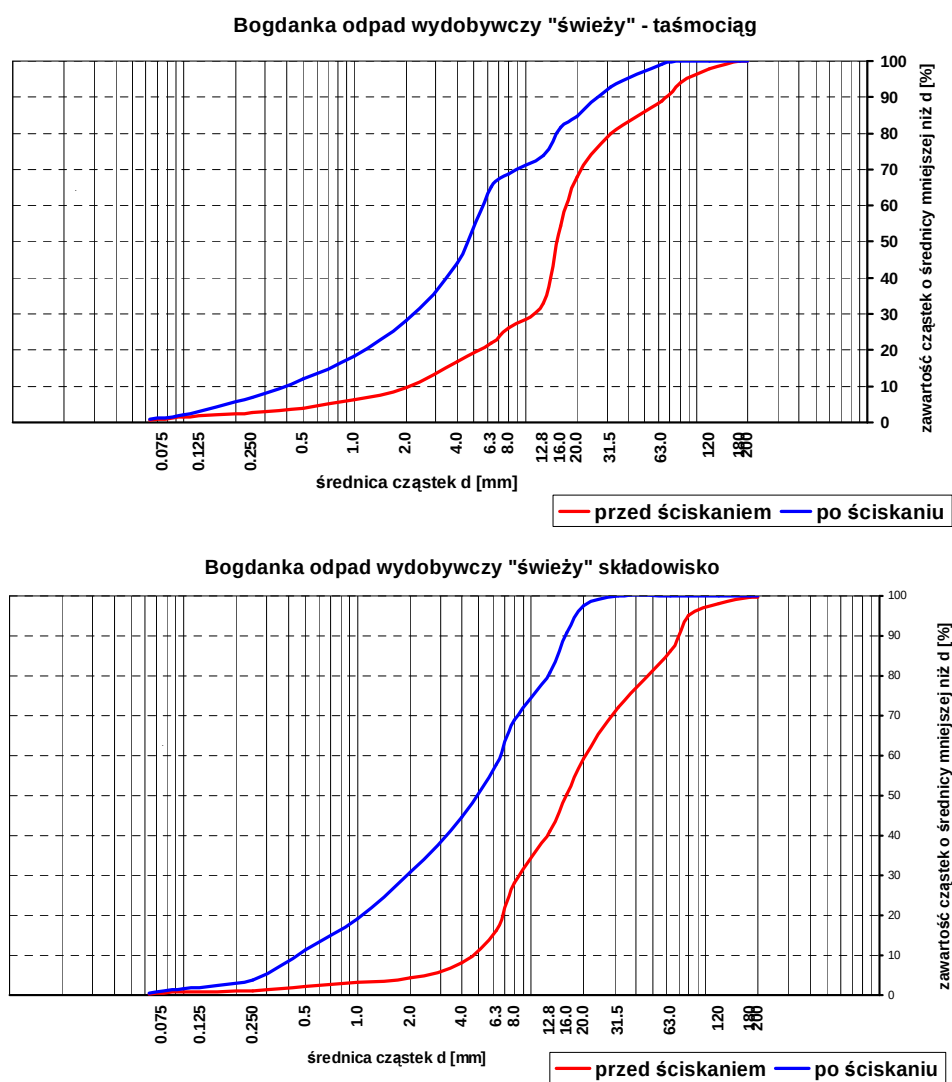
Fot. 4. Odpady po około 15–17 latach składowania
Photo 4. Wastes after about 15–17 years of storage

5.2. Zmiany uziarnienia w modelowych badaniach laboratoryjnych

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumentacji projektu badawczego nr 4670/B/T02/2009/36 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Bukowska i in. 2011), porównano uziarnienie świeżych odpadów wydobywczych przed i po wykonanym ściskaniu w maszynie wytrzymałościowej¹. Zestawienia tego dokonano w celu nawiązania do zmian uziarnienia zachodzących na skutek wietrzenia fizycznego na składowisku i w warunkach narastania ciśnienia pionowego wywołanego ciężarem odpadów nadległych. Przykładowe zmiany uziarnienia przed i po wykonanych modelowych badaniach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 6.

Porównanie uzyskanych krzywych uziarnienia pozwala na stwierdzenie, że świeże odpady po wykonanym badaniu odpowiadają w przybliżeniu uziarnieniem odpadom 8–10-letnim zdeponowanym na składowisku. Potwierdzają to również wyniki współczynnika filtracji przedstawione w tabeli 2, które dla symulacji wysokości nadkładu na poziomie 30–40 m osiągają wartości 10^{-5} – 10^{-7} m/s. Dane przedstawione w tabeli 2 oraz wykresy uziarnienia (rys. 6) sugerują, że ciśnienie pionowe na poziomie około 1,5 MPa (przy maksymalnej wartości uzyskanej ściśliwości ok. 28%) powoduje rozpad ziarnowy odpadów, podobny do kilkunastoletniego wietrzenia odpadów w środowisku (rys. 5). Współczynnik filtracji odpadów zmniejsza się wtedy do około $1,4 \cdot 10^{-8}$ m/s.

¹ Postąpiono zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 4.2.



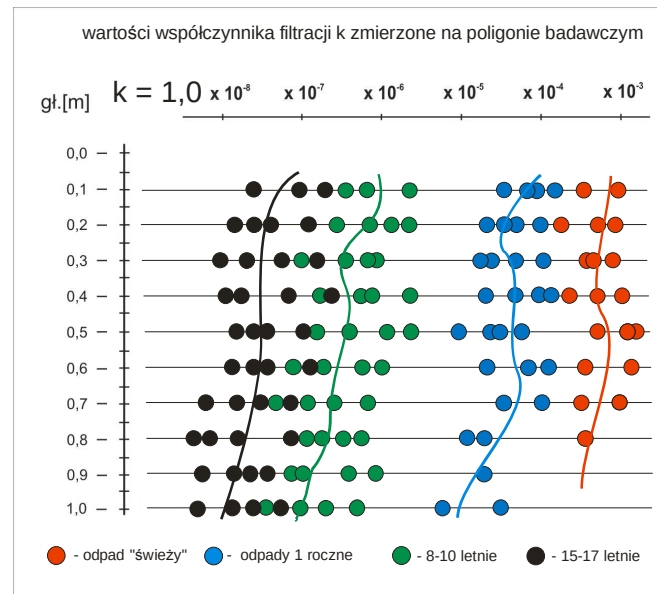
Rys. 6. Przykładowe zmiany uziarnienia odpadów świeżych poddanych modelowym badaniom laboratoryjnym współczynnika filtracji

Fig. 6. Examples of changes of graining of fresh wastes subjected to model laboratory tests of the filtration coefficient

6. ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW NA TŁE WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH

Badanie współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów wydobywczych zdeponowanych na składowisku „Bogdanka” (rys. 1 – strefy S1–S4) przeprowadzono metodą infiltrometru Guelph do głębokości 1,0 m. Pomiary współczynnika filtracji odpadów świeżych ustaliły charakterystyczny dla nich zakres wartości $8,2 \cdot 10^{-2}$

$-9,1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Natomiast odpady po okresie jednego roku wietrzenia charakteryzują się wartościami zmieniającymi się w zakresie od $8,5 \cdot 10^{-3}$ do $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Dla odpadów poddawanych około 8–10-letniemu procesowi wietrzenia współczynniki filtracji zmieniają się w zakresie od $5,0 \cdot 10^{-5}$ do $3,1 \cdot 10^{-7}$ m/s (rys. 7). Są to podobne wartości do uzyskanych w badaniu takich samych odpadów, przeprowadzonych w latach ubiegłych (Borys i in. 2002). Badania terenowe odpadów wydobywczych po 15–17 latach składowania wykazały różnicowanie się wartości współczynnika filtracji w zakresie od $4,2 \cdot 10^{-6}$ do $3,9 \cdot 10^{-8}$ m/s (rys. 8).



Rys. 7. Zakres zmian współczynnika filtracji k odpadów wydobywczych na składowisku „Bogdanka” wraz z liniami odpowiadającymi średnim wartościom dla poszczególnych różnowiekowych grup odpadów

Fig. 7. The scope of changes of the filtration coefficient k of mining exploitation wastes at the “Bogdanka” dump together with lines corresponding with average values for individual waste groups of different ages

Zmiany wartości współczynnika filtracji zachodzą pod wpływem różnych czynników, m.in.:

- charakteru petrograficznego odpadów w poszczególnych miejscach,
- rozwijania się makropor wraz z czasem składowania odpadów,
- uprzywilejowanych dróg migracji wody (wpływa to w decydujący sposób na wartość współczynnika w skali makro).

Rozważając efekt skali (Cunha ed. 1990), należy stwierdzić m.in. za (Simunek i in. 2003), że wartość współczynnika filtracji zwykle jest większa od oznaczonej na próbkach laboratoryjnych lub w skali mikro. Większy udział skał ilastych w profilu pionowym składowiska oraz postępujący proces rozpadu fizycznego fragmentów skalnych wpływa na zmniejszanie współczynnika filtracji zgromadzonych odpadów. Jednocześnie duże ilości syderytów oraz piaskowców tworzą strefy o większej wodo-

przepuszczalności. Postępujący proces wietrzenia i zmniejszania się frakcji uziarnienia odpadów w czasie powoduje również ich zagęszczanie w profilu pionowym, zwłaszcza przy narastającej wysokości składowiska do kilkudziesięciu metrów. Zjawisko to potwierdzają wykonane przez kopalnię „Bogdanka” w 2000 i 2008 r. rdzeniowe otwory wiertnicze. Wykonano je do głębokości około 20 m w głąb składowiska oraz przeprowadzono pilotowe zalewania otworów. Czynność ta potwierdziła, że współczynnik filtracji w obrębie bryły składowiska zmienia się granicach 10^{-6} – 10^{-8} m/s. Z badań wynika, że zagęszczanie odpadów oraz przyrost drobnej frakcji ilowej w procesie wietrzenia odpadów wydobywczych powoduje powstawanie stref bardzo słabo przepuszczalnych, zwłaszcza na głębokości ponad 20 m. Podobne zjawisko obserwuje się w badaniach terenowych odpadów na powierzchni składowiska po kilkunastu latach wietrzenia. Zarówno obserwacje procesów wietrzenia, jak i wyników badań laboratoryjnych pozwalają na odwzorowanie wyników modelowych badań laboratoryjnych w odniesieniu do głębszych stref składowiska.

7. BADANIA LABORATORYJNE ZMIAN WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI I UZIARNIENIA ODPADÓW WYDOBYWCZYCH W LUBELSKIM ZAGŁĘBIU WĘGLOWYM

Określenia współczynnika filtracji świeżych odpadów wydobywczych z kopalni „Bogdanka” poddanych badaniu ściśliwości, przy zmiennym nacisku odpowiadającym wzrostowi ciśnienia nadkładu, dokonano zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale 4.2. Wyniki oznaczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badania ściśliwości oraz zmiany współczynnika filtracji przy symulacji ciśnienia pionowego nadkładu składowiska „Bogdanka” w zakresie obciążenia zewnętrznego 0–6 ton

Ciśnienie pionowe MPa	Wysokość nadkładu, m	„Bogdanka” – odpad wydobywczy świeży – taśmociąg				„Bogdanka” – odpad wydobywczy świeży – składowisko			
		wysokość próbki	ściśliwość %	gęstość objętościowa kg/m ³	współczynnik filtracji m/s	wysokość próbki cm	ściśliwość %	gęstość objętościowa kg/m ³	współczynnik filtracji m/s
0	0	22,5	0	1471	$0,955 \cdot 10^{-2}$	20,5	0	1484	$1,378 \cdot 10^{-2}$
0,07	5	18,4	18,2	1798	$6,934 \cdot 10^{-3}$	17,4	15,1	1748	$1,114 \cdot 10^{-3}$
0,19	10	17,5	22,2	1891	$2,975 \cdot 10^{-4}$	16,7	18,5	1821	$2,438 \cdot 10^{-4}$
0,43	20	17,3	23,1	1913	$2,352 \cdot 10^{-5}$	16	21,9	1901	$4,260 \cdot 10^{-5}$
0,69	30	17,0	24,4	1946	$1,337 \cdot 10^{-5}$	15,6	23,9	1950	$1,544 \cdot 10^{-5}$
0,95	40	16,7	25,7	1981	$7,670 \cdot 10^{-6}$	15,3	25,4	1988	$8,921 \cdot 10^{-7}$
1,21	50	16,5	26,6	2005	$1,960 \cdot 10^{-6}$	15,1	26,3	2014	$5,643 \cdot 10^{-7}$
1,50	60	16,0	28,3	2068	$1,572 \cdot 10^{-7}$	14,8	27,8	2070	$8,438 \cdot 10^{-8}$

W celu otrzymania komputerowego modelu zmian współczynnika filtracji na składowisku odpadów wydobywczych, przy założeniu zwiększenia wysokości tegoż składowiska w przyszłości, podwyższono jego przekrój (rys. 1) z obecnych 30 do 60 m. Symulowano również zmiany współczynnika filtracji na skutek nacisku nadkładu kolejnych warstw odpadów oraz rozpadu ziarnowego (rys. 8). Aby rozwiązać tak postawione zadanie przyjęto model obliczeniowy, w którym wykorzystano metodę elementów skończonych z uwzględnieniem ciśnienia ssącego materiału, będącego w całym profilu

w strefie aeracji. Jako podstawowe narzędzie obliczeniowe wykorzystano program HYDRUS 2D. Do badań numerycznych przyjęto algorytm obliczeniowy wyznaczania współczynnika przewodnictwa hydraulicznego, oparty na metodzie polecanej przez autorów programu – metoda van Genuchtena-Mualem (Simunek i in. 2003)

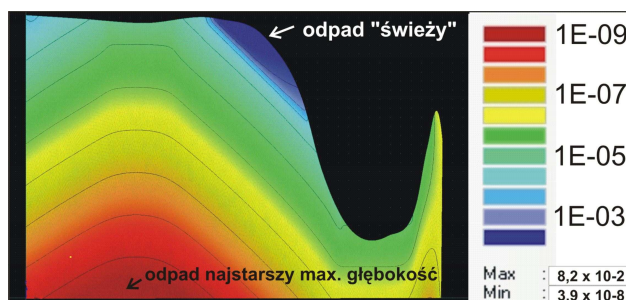
$$k(h) = k_r k_s \quad (3)$$

gdzie:

$k(h)$ – współczynnik przewodnictwa hydraulicznego w strefie nienasyconej, mm/d, zależny od wartości matrycowego potencjału wody gruntowej, wyrażony w jednostkach wysokości ciśnienia słupa wody; cm (zwanego także siłą ssącą lub ssaniem macierzystym),

k_s – współczynnik filtracji w warunkach saturacji gruntu (próbki), mm/d;

k_r – względny współczynnik przewodnictwa hydraulicznego (rezydualny), mm/d.



Rys. 8. Modelowanie zmian współczynnika filtracji wywołanego ciężarem nadkładu oraz fizycznym rozpadem odpadów wydobywczych na przykładowym przekroju przez składowisko

Fig. 8. Modelling of changes of the filtration coefficient caused by the weight of the overburden and physical decomposition of mining exploitation wastes on an example of the cross-section through the dump

Prezentowane obliczenia modelu numerycznego sugerują, że w spągu składowiska odpady wydobywcze ulegają wysokiemu zagęszczeniu oraz silnemu rozpadowi ziarnowemu. Na głębokości około 50–60 m osiągają one minimalną wartość współczynnika filtracji wynoszącą 10^{-9} m/s.

Rysunek 8 przedstawia wynik modelowania fragmentu składowiska (linia przekroju według rys. 1) wykonany w sposób, w którym maksymalna prognozowana wysokość modelu składowiska wynosi 60 m, natomiast minimalna odpowiada miąższości 15 m nadkładu odpadów. Mając na uwadze, że podobne zmiany współczynników filtracji (od około 10^{-3} do około 10^{-8} m/s) obserwuje się na powierzchni składowiska, przy ich kilkunastoletnim narażeniu na warunki atmosferyczne, wydaje się zasadne stwierdzenie, że model zmian współczynnika filtracji, przedstawiony na rysunku 8 można przyjąć, jako zbliżony do warunków rzeczywistych.

8. PODSUMOWANIE

Zmiany fizykochemiczne i mechaniczne wietrzejących odpadów wydobywczych kopalni „Bogdanka” mają istotne znaczenie przy różnorodnym wykorzystaniu tychże

odpadów w środowisku. Poznanie właściwości odpadów podczas kolejnych etapów wietrzenia, a także wykorzystanie wiedzy na temat zmieniających się cech wietrzejących odpadów pozwala na ocenę ich przydatności w pracach inżynierskich.

Odpady wydobywcze kopalni „Bogdanka” bezpośrednio po wydobyciu mają charakter okruszków skalnych o zmniejszającej się z czasem przepuszczalności, łatwych do transportu i formowania obiektów inżynierskich. Po upływie kilku lat odpady te nabierają charakteru gruntu spoistego słabo przepuszczalnego.

Terenowe badania współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów udowodniły postępujące zmniejszanie się współczynnika filtracji odpadów w okresie kilkunastu lat. Początkowo obserwowane wartości wynoszące około 10^{-3} m/s z czasem osiągały poziom około 10^{-7} lub nawet 10^{-8} m/s po upływie od kilku do kilkunastu lat. Podobny efekt uzyskano przy wykorzystaniu metodyki symulowania nacisku nadkładu składowiska w zakresie ciśnień pionowych, odpowiadających 30–40 m miąższości nadkładu. Wartości współczynnika filtracji uzyskane w ten sposób osiągnęły wartości rzędu 10^{-6} i 10^{-7} m/s. Odpowiada to wartościom uzyskiwanym w badaniach *in situ* na składowisku odpadów 8–10-letnich. Analiza zmienności uziarnienia różnowiekowych odpadów wydobywczych oraz wyników uzyskiwanych po laboratoryjnych badaniach ściskania, wykazują duże podobieństwa krzywych uziarnienia odpadów 8–10-letnich do krzywych po ściskaniu symulujących 30–40 m nadkład. Korelacje tych wyników pozwoliły na prognozowanie zmian współczynnika filtracji na składowisku, którego wysokość zostanie podniesiona do 60 m. W modelowaniu numerycznym uwzględniono zarówno rozpad ziarnowy, w wyniku wietrzenia, jak i w wyniku działania ciśnienia nadkładu odpadów. W efekcie modelowania uzyskano wartości współczynnika filtracji na poziomie 10^{-9} m/s. Odpowiadają one głębokości około 60 m, przy zmienności współczynnika filtracji w pionie bardzo podobnej do wyników symulowanych badań laboratoryjnych oraz badań terenowych wykonanych na składowisku.

Wyniki przeprowadzonych badań, wykonanych różnymi sposobami, wykazują wysoką zbieżność. Zdaniem autorów, potwierdzają one słuszność przyjętych założeń i wiarygodność danych, jako danych wyjściowych do dalszych badań modelowych. Zastosowana metodyka badawcza pozwala na prognozowanie zachowania się odpadów w dłuższym czasie. Możliwe jest także prognozowanie zmienności współczynnika filtracji w warunkach zmieniającego się kształtu formowanej wierzchowiny i bryły składowiska.

Wykonane badania oraz ich wyniki zaprezentowane w niniejszym artykule zrealizowane zostały w ramach projektu badawczego promotorskiego ogłoszonego przez Narodowe Centrum Nauki (nr 3361/B/T02/2011/4), realizowanego w latach 2011–2012.

Literatura

1. Borys M., Mosiej K., Czartoryski J., Filipowicz P. (2002): Wytoczne stosowania odpadów pogórnich z Kopalni Bogdanka do budowy wałów przeciwpowodziowych i innych budowli hydrotechnicznych. IMUZ Falenty.
2. Bromek T., Bukowski P. (2002): Ocena przepuszczalności materiałów zasypowych używanych do likwidacji szybów kopalnianych. Przegląd Górniczy nr 11, s. 18–23.
3. Bukowska M. (2012): Skłonność górotworu do tąpnięć – geologiczne i geomechaniczne metody badań. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.

4. Bukowska M., Konopko W., Bukowski P., Szczepański A., Haładus A., Wadas M., Bogusz A., Augustyniak I., Niedbalska K., Borowczyk I. (2011): Opracowanie metodyki badań geomechanicznych dla potrzeb oceny zagrożenia wodnego w kopalniach węgla kamiennego w GZW. Dokumentacja GIG nr 04010369-142. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
5. Bukowski P. (2010): Prognozowanie zagrożenia wodnego związanego z zatapianiem wyrobisk górniczych kopalń węgla kamiennego. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa* nr 882.
6. Cichoń G. (1977): Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna karbońskich gleb stigmariowych z Dorohuczy. *Zeszyty Naukowe AGH, Seria Geologia* t. 3, z. 3.
7. Cunha A.P. ed. (1990): Scale Effects in Rock Masses. *Mat. ISRM Commission on Scale Effects in Rock Mechanics*. Rotterdam, Balkema.
8. Elrick D.E., Reynolds W.D., Geering H.R., Tan K.A. (1990): Estimating Steady Infiltration Rate Times for Infiltrometers and Permeameters. *Water Resource Research* Vol. 26, No. 4, s. 759–769.
9. Elrick D.E., Reynolds W.D. (1992): Infiltration from Constant Head Well Permeameters and Infiltrometers. W: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties. Bringing Theory Into Practice*, G.C. Topp et al. (ed). SSSA Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, s. 1–24.
10. Esaki T., Zhang M., Takahahi M., Morin R.H., Endo H. (1996): Determining the Hydraulic Properties of Saturated, Low-Permeability Geological Materials in the Laboratory: *Advances in Theory*. Kukuoka.
11. Guelph Pressure Infiltrometer Instructions 2805-09/2005.
12. Myślińska E. (1998): *Laboratoryjne badania gruntów*. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
13. Pazdro Z. (1977): *Hydrogeologia ogólna*. Warszawa, Wydaw. Geologiczne.
14. Raport merytoryczny nr 3: segment I, rejon GZW. Projekt badawczy GIG, PIG, PBG „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania”, Warszawa, grudzień 2009.
15. Simunek J., Jarvis N.J., Van Genuchten M.Th., Gardenas A. (2003): Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology* Vol. 272, s. 14–35.

Marzena Majer*, Katarzyna Nowak*

POZIOM PRYZWOLENIA GÓRNIKÓW NA WYDŁUŻENIE WIEKU EMERYTALNEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań sondujących opinie dotyczące przechodzenia górników na wcześniejsze emerytury. Przeprowadzony wśród tej grupy zawodowej sondaż wskazał, iż nie ma powszechnego przyzwolenia na wprowadzenie zmian w obowiązujących warunkach, uprawniających do przechodzenia na górnictwem emeryturę. W opinii górników za zachowaniem status quo przemawiają w szczególności ciężkie i szkodliwe warunki, w jakich wykonują swoją pracę, a także jej fizyczna trudność oraz ponoszone ryzyko wypadkowe i chorobowe. Zdecydowane poparcie górników dla zachowania przez nich prawa do wcześniejszej emerytury, wiąże się z odczuwanym znacznym poziomem zadowolenia ze sposobu, w jaki działa system ubezpieczeń emerytalnych górników. Badani górnicy w większości aprobują warunki przechodzenia na wcześniejsze emerytury stawiane przez ustawodawcę. Jednocześnie nie dają przyzwolenia na zmianę obowiązującej granicy prawnej wieku emerytalnego.

Level of miners permission for prolonging retirement age

Abstract

The article presents the results of study survey sounding out opinions concern going on miners for earlier retire. Carried out survey among miners showed, that there is no common consent on putting changes into currently force condition entitle miners retirement. In miners' opinions keeping "status quo" is connected particular with harmful work conditions and also in less extent in hard work or incurring accident and illness risks. Strongly support by miners their currently rights for earlier retirement is connected with satisfaction of the way in which operate miners social security system. Most of miners participated in survey accept the conditions of earlier retirement placed by legislation, and don't accept changes in currently regulation concern retirement age limit.

1. WPROWADZENIE

Starzenie się społeczeństw europejskich jest faktem znanym i analizowanym od dawna. Prognozy dla Polski wskazują, że w najbliższej dekadzie dynamika procesu starzenia się naszego społeczeństwa będzie ponadprzeciętna (Bukowski, Lewandowski 2011). Znane są także tendencje na rynkach pracy. Dla przykładu można wymienić późniejsze rozpoczynanie pracy na pełny etat, z powodu rosnącego zapotrzebowania na kształcenie się, zachodzące zmiany społeczne, a wśród nich: jednoosobowe gospodarstwa domowe, bezdzietność par, oddzielne mieszkania różnych pokoleń rodziny. Wszystkie te fakty wymuszają konieczność wydłużania okresu aktywności zawodowej oraz stopniowych zmian w systemach emerytalnych. Niestety pomimo wprowadzenia reformy systemu emerytalnego (1999 r.), eksperci wskazują na konieczność wprowadzenia kolejnych zmian m.in.: podniesienia wieku uprawniającego do świadczeń eme-

* Główny Instytut Górnictwa

rytalnych, ograniczenia różnego rodzaju przywilejów. W tej sytuacji, kierując się formułą społecznej odpowiedzialności środowisk naukowych, w Głównym Instytucie Górnictwa podjęto badania rozpoznania poziomu przyzwolenia górników – beneficjentów przywilejów emerytalnych – na wydłużenie wieku emerytalnego.

W sprawie przywilejów emerytalnych górników rząd wyraził następującą opinię: „są złe i kosztują 8 mld zł rocznie” (Dziennik. Gazeta Prawna, 5.10.2009). Jak zapewnił wicepremier Waldemar Pawlak podczas konferencji prasowej, która odbyła się w maju 2011 r. „nie przewiduje się zmian w systemie emerytur górniczych”¹. Późniejsze wydarzenia, w szczególności exposé premiera Donalda Tuska (wygłoszone w listopadzie 2011 r.), potwierdziły zasadność zajęcia się problematyką wcześniejszych emerytur górniczych. Premier powiedział: „Jeśli chodzi o uprzywilejowane warunki przechodzenia na emeryturę w górnictwie, będziemy proponowali utrzymanie tych przywilejów wyłącznie dla tych, którzy pracują bezpośrednio przy wydobywaniu we wszelkiego rodzaju kopalniach” (Kostrzewski, Międzyński 2011).

2. WCZEŚNIEJSZE EMERYTURY GÓRNIKÓW – FUNKCJONUJĄCE ROZWIĄZANIA

Pojęcie **wcześniejszej emerytury** oznacza emeryturę przyznawaną „...w wieku niższym niż wiek emerytalny. Wcześniejsze emerytury obejmują: emerytury w niższym wieku emerytalnym ustanowione dla osób pracujących w tzw. warunkach szkodliwych (zatrudnionych w szczególnych warunkach i w szczególnym charakterze), emerytury przyznawane bez względu na wiek (np. górnikom i nauczycielom) i emerytury wcześniejsze oznaczające pod pewnymi warunkami prawo do przejścia na emeryturę 5 lat przed osiągnięciem powszechnego wieku emerytalnego” (System emerytalny... 2008).

W odniesieniu do górników można mówić o odrębnym systemie emerytalnym, w ramach zabezpieczeń emerytalnych. Ustawodawca w rozdziale 3a *Ustawy o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych* (Ustawa 1998), określił szczegółowo warunki nabycia prawa do emerytury górniczej. Są to: wymagany wiek, wymiar okresu pracy górniczej (i pracy równorzędnej) oraz relacja pomiędzy ubezpieczonym a otwartym funduszem emerytalnym. Ponadto, ustawa precyzuje kilka ważnych pojęć: praca górnicza, praca równorzędna z pracą górniczą, a także warunki zaliczania pracownikom zatrudnionym pod ziemią, w kopalniach siarki lub węgla brunatnego, okresu pracy w wymiarze półtorakrotnym. Ważne, z uwagi na cel podjętego badania, są zapisy odnoszące się do wieku emerytalnego. Określają one, iż górnicza emerytura przysługuje pracownikom, którzy ukończyli 50 lub 55 rok życia i spełniają ściśle określone warunki dotyczące okresu pracy górniczej (art. 50a), a także bez względu na wiek, gdy wykonywali pracę górniczą stale pod ziemią w pełnym wymiarze czasu pracy (art. 50).

Mając na uwadze także inne kraje poza Polską, górnicy zyskują przywilej przechodzenia na emeryturę we wcześniejszym wieku, niż pozostali ubezpieczeni. Sytuacja taka powiela się tam, gdzie górnictwo węglowe jest niszową gałęzią gospodarki,

¹ <http://www.rp.pl/artukul/662634.html>

przykładowo w Wielkiej Brytanii (11 tys. zatrudnionych, w tym 27% pod ziemią – Dziubińska-Michalewicz 2005). Porównując dane zestawione w tabeli 1, tj. wiek emerytalny w systemie powszechnym z wiekiem uprawniającym górników do przejścia na emeryturę, można zauważyć, że w zdecydowanej większości państw europejskich uwzględnionych w analizie, wiek ten jest niższy o pięć lat. Zdarzają się nawet sytuacje, gdy jest on niższy np. o 10 i 15 lat – w Belgii lub o 10 lat – w Polsce.

Najbardziej zbliżony do systemu polskiego jest system belgijski: górnik pracujący tam pod ziemią (spełniający warunki), może zostać emerytem w wieku 55 lat. Przepracowanie pod ziemią 25 lat upoważnia go do przejścia na emeryturę, podobnie jak górnika polskiego, bez względu na wiek.

Warunki otrzymania górniczej emerytury są różne w każdym z analizowanych państw, przy czym najczęściej wymagane jest udokumentowanie 20- lub 25-letniego stażu pracy pod ziemią (pracy górniczej).

Warto podkreślić, iż jedynie w dwóch analizowanych państwach, tj. Bułgarii i Republice Federalnej Niemiec, w systemach emerytalnych dla osób zatrudnionych w górnictwie, partycypacja pracodawcy, czyli opłacana przez niego składka ubezpieczeniowa, jest wyższa niż w systemach powszechnych.

Tabela 1. Uprawnienia emerytalne górników w wybranych państwach (wiek, zasady)

Kraj	Funkcjonujące/planowane rozwiązania w odniesieniu do górników*	Wiek emerytalny w systemie powszechnym w 2010 r. M/K
Austria	Wiek: 60 lat Warunkiem skorzystania z emerytury górniczej jest posiadanie przynajmniej 20 kalendarzowych lat ubezpieczenia w zakładzie górniczym, w tym przynajmniej 10 lat faktycznego zatrudnienia w zawodzie górnika pod ziemią. Przepisy zapewniają górnikom łącznie wyższą emeryturę, np. za 12 miesięcy ubezpieczenia górniczego przysługuje 1,955 pkt. (dla osób niebędących górnikami – 1,78 pkt). Dodatkowo za każde 12 miesięcy rzeczywistego zatrudnienia jako górnik, przysługuje dodatek do emerytury w wysokości 0,3% podstawy obliczenia.	65/60
Albania	Wiek: 60 lat Rząd Albanii obniżył wiek emerytalny dla górników z 65 do 60 lat (zgodnie z obietnicami wyborczymi).	–
Belgia	Wiek: 55 lat – górnicy pracujący pod ziemią, bez względu na wiek, po 25 latach pracy, przepracowanych pod ziemią Przy udokumentowaniu przynajmniej 20 lat pracy w zawodzie górnika można nabyć prawo do emerytury w wysokości 1/30 (zamiast 1/41, 1/42, 1/43 lub 1/44 dla kobiet i 1/45 dla mężczyzn) za rok kalendarzowy pracy górnika pod ziemią. Każdy rok zatrudnienia daje prawo do rocznej sumy emerytury. Górnicy, którzy przepracowali pod ziemią przynajmniej 25 lat, otrzymują dodatek. Odpowiada on różnicy między kwotą emerytury za 30 kalendarzowych lat pracy pod ziemią, a ogólną kwotą ustawowej emerytury.	65/65
Bułgaria	Wiek: 52 lata dla mężczyzn, 57 lat dla kobiet W bułgarskim systemie emerytalnym, w ramach obowiązkowego systemu uzupełniającego (II filar) funkcjonują dwie kategorie, w tym zawodowy system dla zatrudnionych w szczególnych warunkach. Wyodrębnia on dwie kategorie pracowników: I (m.in. górnicy) i II. Składka opłacana każdorazowo przez pracodawcę wynosi dla pracowników I kategorii 12%, a dla II – 7%. Wyłącznie osoby podlegające temu systemowi mogą wcześniej przechodzić na emeryturę. Rozwiązanie to przenosi roszczenia emerytalne osób pracujących w szczególnie trudnych warunkach z obszaru odmienności systemowej na obszar odmienności zwymiarowanej wielkością opłacanej przez pracodawcę składki emerytalnej.	63/60

	Rządowy projekt zakłada podniesienie o dwa lata wieku emerytalnego dla pracowników I kategorii (wojsko, MSW, górnictwo, przemysł chemiczny) i II kategorii zatrudnienia (nauczyciele). Po wejściu w życie kwestionowanych przepisów, planowanym na początek 2011 r., mężczyźni mogliby odejść na emeryturę odpowiednio w wieku 54 i 59 lat.	
Cypr	Wiek: 63 lata dla pracujących pod ziemią	65/65
Czechy	Wiek: 57 lat dla górników legitymujących się 15-letnim stażem pracy pod ziemią , według innego źródła 63 lata Program wcześniejszych emerytur dla górników został zatwierdzony przez czeski rząd w październiku 2009 r. Górnik, który przepracował w kopalni 15 lat ma obecnie możliwość zakończenia pracy w wieku 57 lat. Tydzień pracy w górnictwie jest krótszy o 2,5 godziny od ustawowego (również dla geologów) i wynosi 37,5 godziny.	M: 62 i 2 mies. K niemające dzieci: 60 i 8 mies. M urodzeni po 1968 r.: 65
Francja	Wiek: 1) 55 lat dla osób zatrudnionych w przedsiębiorstwach, których działalność jest bezpośrednio i wyłącznie związana z wydobywaniem oraz wykonywana na miejscu wydobywania lub w bezpośrednim sąsiedztwie; 2) bez względu na wiek – wymóg 55 lat nie obowiązuje w przypadku osób ubiegających się o wcześniejszą emeryturę, jeśli: - legitymują się 120 kwartałami branżowymi pod uwagę przy obliczaniu świadczenia emerytalnego, - legitymują się co najmniej 60 kwartałami i otrzymują rentę z tytułu inwalidztwa zawodowego, - w wypadku przy pracy lub choroby zawodowej w związku ze stałą niezdolnością do pracy, nie korzystając z pomocy specjalnie ustanowionej w celu ułatwienia przeszerogowania pracowników przedsiębiorstw lub zainteresowanych instytucji. Jeżeli w wieku 55 lat podlegający górnictwu systemowi emerytalnemu nie legitymuje się 120 kwartałami, dającymi prawo do uzyskania świadczenia emerytalnego, praca wykonywana po ukończeniu 55 lat wliczana jest do okresu rozliczeniowego, do czasu zakończenia kwartału pozwalającego na osiągnięcie wymaganego okresu pracy. Wymagany wiek emerytalny zostaje obniżony o jeden rok za każde cztery lata pracy pod ziemią, ale nie może być niższy niż 50 lat w przypadku pracowników płacących składki od co najmniej 30 lat.	60/60
Hiszpania	Wiek: 52 lata , przy czym nie ma jednoznacznie ustalonego wieku dla emeryta górniczego (może być redukowany). Hiszpański rząd proponuje zmiany wieku emerytalnego i składek emerytalnych. Jedną z głównych kwestii w ramach planowanych zmian jest podwyższenie wieku emerytalnego dla górników z obecnych 52 lat. W górnictwie wiek emerytalny jest redukowany – w stosunku do powszechnego, tj. 65 lat – w zależności od lat efektywnie przepracowanych w określonej grupie zawodowej. Dla poszczególnych kategorii zatrudnionych jest wyznaczony tzw. wskaźnik redukcji, zróżnicowany ze względu na rodzaje zagrożeń występujące w miejscu pracy oraz toksyczność środowiska. Wynosi on od 0,05 do 0,50, przy czym ostatni z nich obowiązuje dla osób pracujących „na przodku” i wiertaczy. Wcześniejsza emerytura (w pełnym wymiarze) przysługuje górnikom, mającym prawo do wskaźnika redukcji, którzy objęci zostali specjalnym systemem górniczym od 1 kwietnia 1969 r. i wpłacali składki na górniczy fundusz emerytalny lub należeli do funduszu ubezpieczeniowego robotników najemnych przed 1 stycznia 1996 r. i opłacali składki ubezpieczeniowe przez minimum 15 lat (co najmniej ostatnie dwa lata składkowe powinny wystąpić w 15-letnim okresie poprzedzającym nabycie prawa do emerytury).	65/65
Polska	Wiek: 55, 50 lat, bez względu na wiek 1) 55 lat i okres pracy górniczej wynoszący łącznie z okresami pracy równorzędnej co najmniej 20 lat dla kobiet i 25 lat dla mężczyzn, w tym co najmniej 10 lat pracy górniczej; 2) 50 lat i okres pracy górniczej wynoszący łącznie z okresami pracy równorzędnej co najmniej 20 lat dla kobiet i 25 lat dla mężczyzn, w tym co najmniej 15 lat pracy górniczej; 3) bez względu na wiek i zajmowane stanowisko, jeśli wykonywano stałą pracę górniczą pod ziemią i w pełnym wymiarze czasu pracy, przez okres co najmniej 25 lat.	65/60
Republika Federalna Niemiec	Wiek: 60 lat Na ubezpieczenie górnicze pobierana jest przeciętnie wyższa składka niż w innych systemach zakładowych (II filar). W systemie „górnictwa” wyższa jest partycypacja pracodawcy (w pozostałych składka jest płacona po połowie). Wcześniejsza emerytura przysługuje górnikowi dolowemu, jeżeli: - ukończył 60 lat i wykaże 25 lat składkowych ze stałą pracą pod ziemią (do 25 lat stałej pracy pod ziemią zalicza się również okresy otrzymywania zasiłku przejściowego w sytuacji, gdy ostatnią pracą przed jego otrzymaniem była praca górnika dolowego); - ma 25 lat okresu składkowego na podstawie zatrudnienia polegającego na stałej pracy pod ziemią	65/65

	razem z okresami nieskładkowymi przyporządkowanymi do górniczego ubezpieczenia emerytalno-rentowego; - ma 25 lat okresów składkowych w samym górnictwie lub razem z okresami nieskładkowymi przyporządkowanymi do górniczego ubezpieczenia rentowego i a) przez 15 lat był zatrudniony jako rębacz; b) wymagane 25 lat stałego zatrudnienia pod ziemią wypełnił samymi okresami składkowymi lub okresami nieskładkowymi przyporządkowanymi do górniczego ubezpieczenia emerytalnego, jeżeli do tego wlicza się: a) za każde dwa pełne miesiące kalendarzowe pracy rębacza po trzy miesiące kalendarzowe, b) za każde trzy pełne miesiące kalendarzowe, w których ubezpieczony był zatrudniony przed 1 stycznia 1968 r. pod ziemią i wykonywał prace inne niż praca rębacza po dwa miesiące kalendarzowe, c) prace wykonywane pod ziemią przed 1 stycznia 1968 r. w przypadku ubezpieczonych, którzy przed tą datą wykonywali pracę rębacza i muszą z niej zrezygnować, ponieważ zmniejszyła się ich zdolność do pracy w górnictwie. Dla osób ubezpieczonych urodzonych po 31 grudnia 1951 r., wiek emerytalny będzie stopniowo podnoszony do 62 lat, jeśli nie będą miały zastosowania przepisy o ochronie praw nabytych.	
Wielka Brytania	Wiek: 60 lat W Wielkiej Brytanii nie występuje tzw. wcześniejsza emerytura. Dla górników funkcjonuje odrębny system emerytalny: MPS – Program Emerytalny Pracowników Górnictwa. Wiek emerytalny dla członków MPS wynosi 60 lat zarówno dla mężczyzn, jak i dla kobiet (obecnie członkostwo nie jest obowiązkowe). W związku z procesami prywatyzacyjnymi w Brytyjskiej Korporacji Węglowej, górnicy uzyskali specjalne gwarancje, tj. zapowiedź waloryzacji górniczych emerytur przynajmniej zgodnie ze wzrostem inflacji oraz dodatkowe bonusy, które także będą waloryzowane.	65/60

*Źródła: Dziubińska-Michalewicz 2005; Pożera 2007; Kłos 2011; balkaninsight.com/en/article/albania-slashes-retirement-age-for-miners; ibngr.pl; praguepost.com/business/2518-miners-granted-early-retirement.html; nettg.pl; towerswatson.com/spain/research/1483; zus.pl, deutsche-rentenversicherung-bund; mps-pension.org.uk/; bas.sejm.gov.pl, eures-tiregio/eu/pl.

3. WCZEŚNIEJSZY WIEK EMERYTALNY W OPINII SPOŁECZNEJ, PARTNERÓW SPOŁECZNYCH ORAZ GÓRNIKÓW

3.1. Opinia społeczna

Kwestia wieku emerytalnego była w ostatnich latach parokrotnie sondowana w badaniach CBOS. W 2011 r. analizowano m.in. stosunek społeczeństwa do stopniowego podwyższania wieku uprawniającego do przejścia na emeryturę. Wyniki wskazują, że chociaż sprzeciw wobec podwyższania wieku emerytalnego był w 2011 r. minimalnie mniejszy niż rok wcześniej, nie zmieniło to zdecydowanego negatywnego nastawienia społeczeństwa do tej propozycji. Blisko trzy czwarte dorosłych Polaków wypowiedziało się wbrew podwyższeniu wieku uprawniającego do przejścia na emeryturę, a propozycję tę poparło 17% ankietowanych. Niechęć do podnoszenia wieku emerytalnego dominowała we wszystkich analizowanych grupach społeczno-demograficznych (Roguska 2011). W tym samym badaniu zapytano także o nastawienie wobec zmian dotyczących systemu ubezpieczeń społecznych służb mundurowych oraz KRUS. Problem ten był przedmiotem badań od 2008 r., a uzyskane dane pokazują, że Polacy opowiadają się za zmianami zmierzającymi do większego ujednolicenia zasad przechodzenia na emeryturę. Ich zdaniem zasady nabywania świadczeń emerytalnych powinny być jednakowe dla jak największej grup osób pracujących. Większość badanych popierała postulat likwidacji przywilejów emerytalnych pracowników służb mundurowych i objęcie ich powszechnym systemem emerytalnym. Rozwiązaniu temu sprzeciwiał się natomiast więcej, niż co czwarty ankietowany. Jeszcze większe

było społeczne przyzwolenie na zmiany w systemie ubezpieczeń rolniczych. W opinii ogromnej większości badanych, rolnicy podobnie jak inni pracujący, powinni płacić składki emerytalne odpowiadające ich dochodom (przeciwnego zdania był co jedenasty ankietowany) (Roguska 2011).

Szerzej o przywilejach emerytalnych różnych grup społeczno-zawodowych traktowało badanie CBOS przeprowadzone w 2008 r. (Roguska 2008). Zebrane wówczas informacje na temat możliwości korzystania z wcześniejszej emerytury, wskazują na bardzo duże zróżnicowanie opinii badanych. Ponad połowa uważała, iż lista zawodów uprawniających do przechodzenia na wcześniejszą emeryturę powinna być utrzymana w obecnym kształcie lub nawet poszerzona. Za jej ograniczeniem opowiadał się prawie co trzeci ankietowany, a tylko nieliczni (6%) byli przekonani, że możliwość przechodzenia na wcześniejszą emeryturę powinna ulec całkowitej likwidacji. W opinii społecznej prawo do wcześniejszej emerytury należy zachować wśród górników (62%) oraz hutników (49%). Mniej jednoznaczny był stosunek badanych do przywilejów służb mundurowych. Największe grupy badanych były zdania, że prawo do przejścia na wcześniejszą emeryturę powinni utrzymać wyłącznie żołnierze zawodowi i policjanci, pracujący w trudnych warunkach lub będący odpowiedzialni za zdrowie i życie innych ludzi (odpowiednio 42% i 41%). Przeważało także przekonanie o prawie do wcześniejszej emerytury dla: nauczycieli, artystów, dziennikarzy, pracowników energetyki i transportu publicznego.

Podsumowując, za ograniczaniem przywilejów emerytalnych stosunkowo najczęściej optowali badani najlepiej wykształceni i sytuowani. Ciekawostką stanowi fakt, iż osoby z wykształceniem wyższym często były zwolennikami utrzymania wcześniejszych emerytur dla nauczycieli. W świetle przytoczonych danych można zgodzić się z autorką opracowania „System emerytalny – oceny i postulaty” (Roguska 2008). Stwierdza ona, że partykularyzmy grupowe odgrywają dużą rolę w myśleniu o systemie emerytalnym. Potrzeba ograniczenia możliwości przechodzenia na wcześniejszą emeryturę zazwyczaj najczęściej jest deklarowana do momentu, gdy postulowane zmiany nie naruszają własnych interesów.

W badaniu prowadzonym przez CBOS w 2007 r. zwrócono uwagę m.in. na zagadnienie społecznego odbioru korzyści z przechodzenia na wcześniejszą emeryturę w trzech wymiarach: jednostkowym, społecznym i gospodarczym. Zadano następujące pytanie: Czy przechodzenie na wcześniejszą emeryturę przed osiągnięciem wymaganego wieku emerytalnego jest raczej korzystne, czy też niekorzystne dla: 1) pracowników, którzy przeszli na wcześniejsze emerytury, 2) ogółu pracujących, 3) polskiej gospodarki. Większość badanych Polaków uznała, że wcześniejsze emerytury są bardzo korzystne dla samych emerytów, znacznie mniej korzystne dla ogółu zatrudnionych, a zdecydowanie niekorzystnie wpływają na gospodarkę kraju (Szczepańska 2007).

3.2. Górnicze związki zawodowe wobec wcześniejszych emerytur

Przedstawione powyżej badania sygnalizowały, iż w opinii społecznej górnicy mają prawo do przechodzenia na wcześniejsze emerytury. Nie ma także zgody wśród górniczych związków zawodowych na podwyższenie granicy prawnej wieku emerytalnego. Wystarczy przytoczyć wypowiedź przewodniczącego NSZZ „Solidarność”

Piotra Dudy dla „Gazety Wyborczej”: „Nie ma możliwości, by górnicy stracili swoje emerytury. Jeżeli rząd spróbuje je ruszyć, to się przekona, jacy jesteśmy silni” (za: PAP, 23.05.2011). Zdaniem Dominika Kolorza, szefa górniczej „Solidarności”, związkowcy nigdy nie zgodzą się na zmiany w górniczych emeryturach. W 2005 r. eksperci z medycyny pracy byli zgodni, uznając, że praca pod ziemią dłużej niż przez 25 lat jest po prostu niemożliwa. Od momentu przeprowadzenia badań nic się nie zmieniło, gdyż warunki pod ziemią nie uległy poprawie. Kolorz podważa także informacje o dofinansowywaniu z budżetu górniczych emerytur (4 mld zł rocznie). Jak stwierdza: „To bzdura, chyba że bierzemy pod uwagę wszystkich górniczych emerytów, nawet tych z okresu PRL-u. Jeżeli popatrzyć na emerytów, którzy odeszli z kopalń po 2006 roku, to nie kosztują oni budżetu ani złotówki”. Przywołuje także najnowsze wyliczenia Górniczej Izby Przemysłowo-Handlowej w Katowicach, z których wynika, że w ciągu minionych dziesięciu lat górnictwo węgla kamiennego wpłaciło do budżetu państwa i budżetów lokalnych ponad 58,7 mld zł. Stanowi to 34% wpływów górnictwa ze sprzedaży węgla. W tym czasie kopalnie skorzystały jedynie z ponad 8,1 mld zł dotacji budżetowych (Głogowski 2011).

Warto zwrócić uwagę na zapowiadane w listopadowym exposé premiera zmiany w emeryturach górniczych: „Jeśli chodzi o uprzywilejowane warunki przechodzenia na emeryturę w górnictwie, będziemy proponowali utrzymanie tych przywilejów wyłącznie dla tych, którzy pracują bezpośrednio przy wydobywaniu we wszystkiego rodzaju kopalniach. Oni dzisiaj dysponują specyficznymi, im precyzyjnie dedykowanymi przywilejami, i te powinny być zachowane, natomiast niektórzy korzystający ze szczególnych uprawnień do emerytur górniczych tego lub podobnego typu, a którzy nie pracują bezpośrednio przy wydobywaniu, będą mogli skorzystać z emerytur przejściowych, tak aby pozostali jak najszybciej mogli wejść do systemu powszechnego”. Odpowiedź związkowców była natychmiastowa: „Precyzyjne określenie, kto fedruje, a kto nie, jest w kopalni niemożliwe. Przecież górnicy zmieniają oddziały. Raz pracują na ścianie, a innym razem gdzie indziej. Taka jest specyfika tego zawodu” (Wacław Czerkawski, wiceszef Związku Zawodowego Górników). „W górnictwie pracuje 115 tys. osób, z czego ok. 80 tys. zatrudnionych jest pod ziemią. A co z osobami, które pracują w górnictwie, ale niekoniecznie cały czas pod ziemią? Tu zapewne premier przeprowadzi zmiany” (Kostrzewski, Miączyński 2011).

3.3. Poziom przyzwolenia górników na wydłużenie wieku emerytalnego – badania własne

Celem podjętych badań było określenie poziomu akceptacji wydłużenia wieku emerytalnego wśród pracowników kopalń węgla kamiennego uprawnionych do wcześniejszej emerytury. Z uwagi na specyfikę problemu, jak również założony cel, w badaniu zdecydowano się wykorzystać sondaż, a więc jedną z metod badań ilościowych i równocześnie jedną z podstawowych metod socjologii empirycznej. Wykorzystanie w badaniach sondażu implikowało wybór określonej techniki oraz opracowanie poprawnego metodologicznie narzędzia, tj. badania audytoryjnego; użycie ankiety audytoryjnej, czyli wypełnianej niezależnie przez wiele osób w tym samym miejscu i czasie.

Kwestie dotyczące górniczego systemu emerytalnego stanowią niezwykle delikatną materię badawczą. Poruszając tę tematykę starano się, aby zadawane pytania ankietowe były szczególnie dopracowane i nie wzbudzały w respondentach poczucia zaniepokojenia planowanymi przez rząd zmianami. Stąd też pytania zostały poprzedzone krótkim wyjaśnieniem celu badawczego. Ponadto, formułując pytania, starano się, by respondent nie miał najmniejszych trudności z odczytaniem zarówno ich intencji, jak i zamierzonego sensu.

W ankiecie znalazły się pytania o charakterze metryczkowym i sondujące. Pierwsze z nich dotyczyły wieku, stażu pracy pod ziemią i stanowiska pracy. Zachowano następujący układ stanowisk: robotnicze pod ziemią, dozór dołowy, inne (jakie?). Pytania sondujące dotyczyły:

- ogólnego nastawienia do stopniowego podwyższania wieku emerytalnego (wzorzec tutaj na pytaniu, które zadał CBOS w sondażu prowadzonym w 2011 r., przy czym dodano passus o osobach pracujących w warunkach szkodliwych),
- postrzegania korzyści z przechodzenia na wcześniejszą emeryturę – w wymiarze jednostkowym, społecznym i gospodarczym (wykorzystano w tym wypadku pytanie z sondażu CBOS z 2007 r.),
- opinii o przywilejach emerytalnych różnych grup społeczno-zawodowych (w tym górników),
- poziomu przyzwolenia na wprowadzanie zmian w funkcjonującym systemie emerytalnym dla górników.

W wyborze próby (wybór jednostek obserwacji) do badania sondażowego zdecydowano się na dobór celowy, mając świadomość, że nie upoważnia on do stosowania twierdzeń rachunku prawdopodobieństwa i metod statystyki matematycznej. Jak zauważyła Earl Babbie (2005), badania społeczne prowadzone są często w sytuacjach, w których nie jest możliwe dobranie prób probabilistycznych takiego rodzaju, jakie stosuje się w dużych sondażach. Zdarzają się nawet sytuacje, gdy taki dobór nie byłby właściwy.

Dokonując wyboru jednostek obserwacji, wzięto pod uwagę jedno podstawowe kryterium, którym było zatrudnienie w kopalni węgla kamiennego na stanowisku uprawniającym w przyszłości do górniczej emerytury. Starano się także, aby były reprezentowane różne grupy wiekowe. Założono, że wielkość próby wyniesie 100 osób.

Sondaż przeprowadzono w trakcie szkoleń zawodowych dla pracowników kopalń węgla kamiennego, w drugiej połowie 2011 r. Objęto nim w sumie 103 górników, w tym 84 zatrudnionych na stanowiskach robotniczych (z czego 73 pod ziemią) oraz 19 osób dozoru ruchu. Respondenci reprezentowali różne grupy wiekowe:

- do 25 lat – 27 osób,
- od 26 do 30 lat – 19 osób,
- od 31 do 35 lat – 17 osób,
- od 36 do 40 lat – 10 osób,
- 41 lat i więcej – 30 osób.

Staż pracy w górnictwie (w odniesieniu do pracowników dołowych był tożsamy ze stażem pracy pod ziemią) był także zróżnicowany i kształtował się następująco:

- do 5 lat – 57 osób,
- od 6 do 10 lat – 3 osoby,
- od 11 do 15 lat – 3 osoby,
- od 16 do 20 lat – 8 osób,
- 21 lat i więcej – 23 osoby.

Dziewięciu spośród badanych respondentów nie udzieliło informacji o posiadanym stażu.

Wcześniejsze emerytury górnicze w opinii samych górników

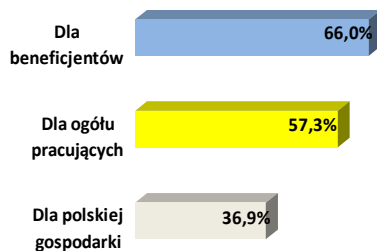
Autorzy pracy postawili grupie badanych respondentów następujące pytania:

1. Czy przechodzenie na wcześniejszą emeryturę jest dogodnie dla korzystających z uprawnień oraz ogółu pracujących?
2. Czy jest to korzystne także dla polskiej gospodarki?
3. Czy podejmujący w przyszłości pracę w zawodach obecnie uprzywilejowanych powinni zachować takie same przywileje?

Kwestie te poddano osądowi samych zainteresowanych, czyli górników.

Jak wynika z zebranych danych (rys. 1), wcześniejsze emerytury są:

- korzystne dla beneficjentów (66% odpowiedzi „zdecydowanie korzystne” i „raczej korzystne”),
- mniej korzystne dla ogółu zatrudnionych (57,3% odpowiedzi „zdecydowanie korzystne” i „raczej korzystne”),
- niekorzystne dla polskiej gospodarki (42,7% odpowiedzi „zdecydowanie niekorzystne” i „raczej niekorzystne”, 36,8% odpowiedzi „zdecydowanie korzystne” i „raczej korzystne”).



Rys. 1. Postrzeganie korzyści z przechodzenia na wcześniejszą emeryturę w odniesieniu do samych zainteresowanych, ogółu pracujących i gospodarki (N = 103)

Fig. 1. Perceived advantages of taking early retirement with reference to the interested workers, the entirety of people employed and the economy (N = 103)

Powyższe dane obrazują, iż opinie badanych górników są zbieżne z nastawieniem większości dorosłych Polaków, wyrażonym w sondażu z 2007 r. (badania CBOS).

Sposób odbioru korzyści z faktu możliwości przechodzenia na wcześniejszą emeryturę – w wymiarze jednostkowym, społecznym i gospodarczym, warunkowały ce-

chy społeczno-demograficzne respondentów. Proporcjonalnie najwięcej badanych postrzegających wcześniejsze emerytury jako korzystne dla samych emerytów, ogółu pracujących i polskiej gospodarki było wśród robotników, odpowiednio: 71,4, 63,1, 39,3% odpowiedzi. Wśród osób dozoru przeważały częściej opinie, że wcześniejsze emerytury są niekorzystne dla ogółu pracujących i dla gospodarki (odpowiednio: 57,9 i 63,2% odpowiedzi). Opinii, iż są one niekorzystne dla samych emerytów było już stosunkowo mniej niż opinii przeciwnych (odpowiednio: 36,8 i 42,1% odpowiedzi).

Na pytanie o zachowanie dotychczasowych przywilejów przez podejmujących w przyszłości pracę w zawodach wyspecyfikowanych w ankiecie, zdecydowana większość badanych (70,9%) opowiedziała się za skróceniem listy zawodów uprawniających do przechodzenia na wcześniejszą emeryturę. Więcej niż co piąty respondent popierał zachowanie przywilejów w przypadku wszystkich wymienionych grup zawodowych. Jedna osoba (robotnik, wiek w przedziale: 41 lat i więcej) była zdania, że podejmujący w przyszłości pracę w tych zawodach, nie powinni mieć żadnych przywilejów (powinni być traktowani tak samo, jak pozostali ubezpieczeni). Rozkład wyników obrazuje tabela 2.

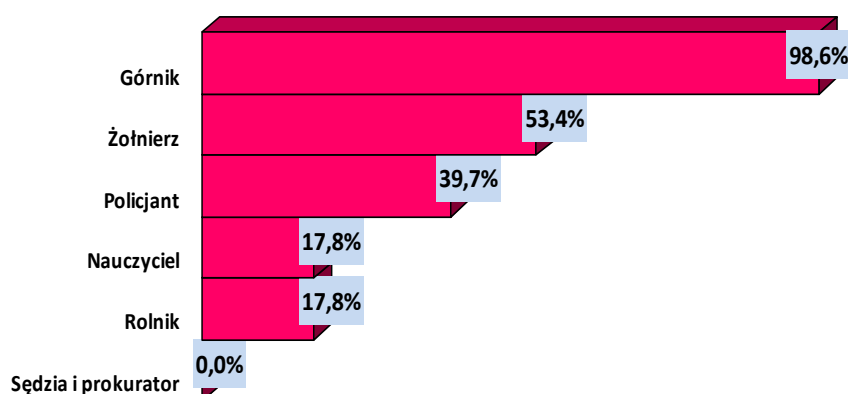
Tabela 2. Zachowanie przywilejów przez wybrane grupy zawodowe

Pytanie: Policjanci, żołnierze, rolnicy, sędziowie i prokuratorzy, górnicy, nauczyciele mają więcej przywilejów emerytalnych niż pozostali ubezpieczeni. Które z poniższych rozwiązań – według Pana – byłoby najbardziej sprawiedliwe dla osób, które w przyszłości będą podejmować pracę w tych zawodach?	Odpowiedź % (N = 103)
1. Podejmujący w przyszłości pracę w tych zawodach powinni mieć te same przywileje, jak obecnie w nich pracujący	22,3
2. Podejmujący w przyszłości pracę powinni zachować przywileje tylko w niektórych zawodach takich, jak	70,9
3. Podejmujący w przyszłości pracę w tych zawodach nie powinni mieć przywilejów (powinni być traktowani tak samo jak pozostali ubezpieczeni)	1
4. Trudno powiedzieć	5,8
Razem	100

Badanych wybierających odpowiedź numer 2, proszono także o wskazanie konkretnych zawodów. Wybór był następujący: policjant, żołnierz, rolnik, sędzia i prokurator, górnik, nauczyciel. Graficzna prezentacja wyników (rys. 2) potwierdza, że prawo do zachowania obecnych przywilejów emerytalnych powinno być utrzymane w szczególności wśród podejmujących pracę w zawodzie górnika (98,6% wskazań). Badani wymienili również takie zawody, jak: żołnierz, policjant, nauczyciel i rolnik. Jako niesprawiedliwe w odczuciu badanych byłoby natomiast pozostawienie dotychczasowych przywilejów przyszłym sędziom i prokuratorom.

Inne pytanie skierowane do respondentów odwoływało się do poczucia sprawiedliwości społecznej w kwestii przywilejów emerytalnych górników, a więc możliwości przechodzenia na wcześniejszą emeryturę. W świadomości zdecydowanej większości badanych (83,7%), przywilej ten jest społecznie sprawiedliwy. Zdecydowane poparcie respondentów wobec prawa górników do wcześniejszej emerytury wiąże się ze znacznym poziomem zadowolenia ze sposobu, w jaki działa system ubezpieczeń

emerytalnych górników w Polsce. Zdecydowana większość górników (85,5%) wyraża zadowolenie z obowiązującego w tym względzie prawa.



Rys. 2. Zawody, które powinny zachować obecne przywileje (N = 73)

Fig. 2. Professions that should maintain the present privileges (N = 73)

Sondując opinie o wcześniejszych emeryturach górniczych zapytano także o obowiązujące warunki przechodzenia na emeryturę, a także ewentualne ich zmiany. Jak wspomniano już wcześniej, ustawodawca określił szczegółowo warunki nabycia prawa do emerytury górniczej, a są to m.in. wymagany wiek, wymiar okresu pracy górniczej (i pracy równorzędnej). Uściślenia te warunkowały zamieszczenie w kwestionariuszu następującego pytania: Prawo do górniczej emerytury na zasadach obowiązujących od 1 stycznia 2007 r. mają górnicy spełniający łącznie określone warunki. Czy Pana zdaniem obowiązujące zapisy (wymienione poniżej) wymagają zmiany bądź uzupełnienia?

Zapisy, o których wspomniano w pytaniu:

Wariant 1. Ukończenie 55 lat. Okres pracy górniczej wynosi łącznie z okresami pracy równorzędnej, co najmniej 20 lat dla kobiet i 25 lat dla mężczyzn, w tym co najmniej 10 lat pracy górniczej.

Wariant 2. Ukończenie 50 lat. Okres pracy górniczej wynosi łącznie z okresami pracy równorzędnej co najmniej 20 lat dla kobiet i 25 lat dla mężczyzn, w tym co najmniej 15 lat pracy górniczej.

Wariant 3. Bez względu na wiek i zajmowane stanowisko, jeśli wykonywało się pracę górniczą pod ziemią stale i w pełnym wymiarze czasu pracy przez okres co najmniej 25 lat.

Możliwość udzielenia odpowiedzi, w każdym przypadku, była taka sama, tzn. respondent dokonywał następującego wyboru:

- moim zdaniem, zapis ten należy pozostawić w obecnym brzmieniu,
- według mnie należałoby wprowadzić następujące zmiany (respondent podaje dokładne przykłady zmian).

Odpowiedzi badanych, zestawione w tabeli 3, pokazują, że większość aprobeje warunki stawiane przez ustawodawcę. Można zatem wnioskować, że większość górników nie wyraża zgody na zmianę obowiązującej granicy wieku emerytalnego.

Uwagę zwraca stosunkowo duży udział procentowy badanych, którzy nie udzielili odpowiedzi. Były to osoby zatrudnione na stanowiskach robotniczych i dozoru, zróżnicowane wiekiem, stąd trudno wyrokować w sprawie ich motywów. Istnieje jednak prawdopodobieństwo, że przytoczone zapisy okazały się zbyt skomplikowane, a nieudzielenie odpowiedzi, wydawało się jedynym sposobem na uniknięcie niekomfortowej sytuacji.

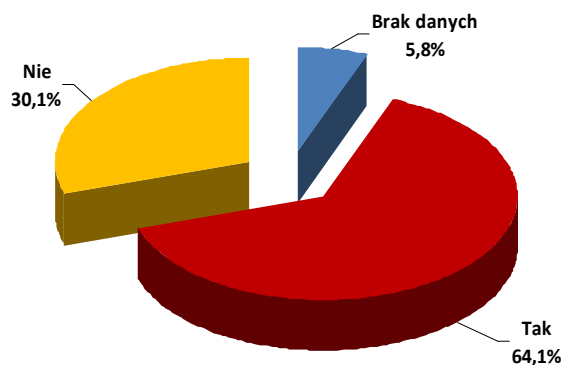
Tabela 3. Ocena warunków wiekowo-stażowych według wariantów (% , N = 103)

Odpowiedź	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Moim zdaniem, zapis ten, należy pozostawić w obecnym brzmieniu	68,9	63,1	68,0
Według mnie należałoby wprowadzić następujące zmiany...	8,7	5,8	4,9
Brak danych	22,3	31,1	27,2
Razem	100	100	100

Proponowane przez badanych zmiany (nie wszystkie pozostawały w zgodzie z ocenianym wariantem), odnosiły się zarówno do wieku, jak i wymaganego stażu pracy górniczej (przykładowo – minimalny wiek 55 lat i 25 lat pracy górniczej). Niektórzy badani proponowali uzależnienie prawa do przechodzenia na wcześniejsze emerytury od warunków pracy, w tym stanowiska pracy górnika (kwestia ta pojawi się ponownie przy analizie odpowiedzi na następne pytanie). Pojawiły się także opinie, że przechodzącym na emeryturę górniczą bez względu na wiek, należy obniżyć wymagany czas pracy górniczej z 25 do 20 lat. Podczas pozostałych pięciu lat górnik powinien zostać skierowany do pracy na powierzchni. Zamiennie proponowano, aby warunkiem przechodzenia na emeryturę górniczą był wyłącznie okres pracy górniczej – wykonywanie pracy górniczej stale pod ziemią i w pełnym wymiarze czasu pracy przez okres co najmniej 25 lat. Wymóg posiadania 25-letniego okresu pracy górniczej pojawiał się także w innych propozycjach, w odniesieniu zarówno do wariantu 1, jak i 2. Inna propozycja dotyczyła wprowadzenia co najmniej 15 lat pracy górniczej (w miejsce obecnej 10-letniej) dla pracowników dozoru.

Pojawiające się tu odpowiedzi bezpośrednio nawiązują do kolejnych, podnoszonych w badaniach kwestii – uzależnienie uprawnień do górniczej emerytury od zajmowanych stanowisk dołowych. Większość ankietowanych (64,1%) podzielała opinię, że wszyscy zatrudnieni pod ziemią pracują w równie ciężkich warunkach. Tym samym przechodzenie na wcześniejszą emeryturę jest kwestią oczywistą. Przeciwnego zdania było 30,1% badanych (rys. 3). Przyznanie prawa do wcześniejszej emerytury wszystkim pracownikom dołowym postulowali:

- najczęściej robotnicy (64,3% odpowiedzi),
- respondenci, których wiek mieścił się w przedziale od 31 do 40 lat (66,7%),
- pracujący w górnictwie, co najmniej od sześciu lat (70,3%).



Rys. 3. Pracujący pod ziemią, a prawo do wcześniejszej emerytury (N = 103)

Fig. 3. Workers employed underground and the early retirement right (N = 103)

Respondentów nieprzekonanych, proszono o wskazanie stanowisk, które – w ich opinii – nie powinny być objęte wspomnianymi uprawnieniami. Wypowiedzi badanych miały bardzo zróżnicowaną formę:

- wyliczenie konkretnych stanowisk pracy oraz nazw oddziałów,
- określenie charakteru pracy,
- wskazanie grup osób poprzez zaprzeczenie i eliminację, przykładowo: „tylko górnicy” (w domyśle – pozostali już nie), „strike górnik – przodki, ściany, stanowiska poza wydobywaniem” („wszystkie oprócz przygotówki i ścian”)².

Pomimo że lista „wykluczonych” z górniczego systemu emerytalnego była dość bogata, interpretacja danych z uwagi na ich formę jest trudna, wręcz merytorycznie niewskazana (możliwość popełnienia błędu). Można jedynie stwierdzić, że proporcjonalnie najczęściej były wskazywane następujące stanowiska: dozór (w tym wyższy i średni), sygnalista szybowy, elektryk (elektromonter), osoby wykonujące prace poza przodkiem i ścianą oraz w oddziale szybowym.

Ankietowanych pytano także o możliwość wprowadzenia innych rozwiązań w kwestii górniczych emerytur. Tylko czterech spośród badanych wybrało odpowiedź twierdzącą i zasugerowało własne rozwiązania. Pozostały odsetek stanowią osoby, które wskazały odpowiedź negatywną (89,3%) lub nie udzieliły żadnej (6,8%).

Propozycje nowych rozwiązań wyrażone przez trzech badanych dotyczyły kwestii zaliczania dni chorobowych do okresów składkowych (należy wyjaśnić, że jest to odwołanie się do stanu prawnego sprzed 1 stycznia 2007 r.):

- „Bez sensu jest odrabianie chorobowego, które nie było następstwem wypadku w pracy. Dlaczego mamy odrabiać okres za który i tak mamy odciągnięte składki. Po to te składki są odciągane, żeby osoba, której stan zdrowia nie pozwala na pracę mogła spokojnie skorzystać z chorobowego. Składki chorobowe powinny być traktowane jako tzw. ubezpieczenie” (robotnik, wiek do 30 lat).
- „Nie odrabianie chorobowego” (robotnik, wiek do 30 lat).
- „Nie odrabianie zwolnienia lekarskiego” (robotnik, wiek do 30 lat).

² W przytoczonych odpowiedziach zachowano oryginalną pisownię.

Propozycja trzeciego respondenta brzmiała następująco: „Wiek emerytalny 65 lat i od każdego roku pracy pod ziemią przeliczyć 1,5. Przykład 30 lat pracy – po przeliczeniu 15 mam do emerytury 65 – 15 = 50 lat i przejście na emeryturę” (dozór dołowy, wiek 41 lat i więcej). Rozwiązanie to przypomina nieco system hiszpański, gdzie wiek emerytalny w odniesieniu do górników jest redukowany – w stosunku do powszechnego (65 lat) – w zależności od lat efektywnie przepracowanych w określonej grupie zawodowej.

Ostatnie pytanie miało charakter otwarty, tzn. respondent odpowiadał własnymi słowami, nie posiadając żadnych możliwości wyboru przygotowanych wcześniej odpowiedzi. Pytanie brzmiało następująco: Jakich argumentów użyłby Pan, gdyby musiał stanąć w obronie obecnego systemu emerytalnego dla górników, a jakich, jeśli stałby Pan na stanowisku iż należy go zmienić?

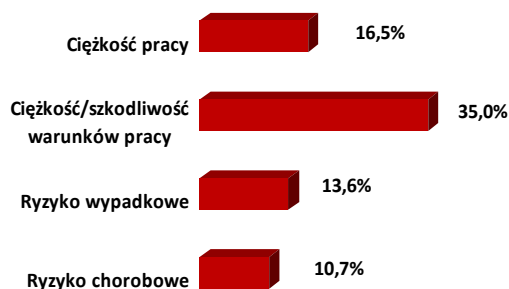
Uogólniając, wyłącznie co drugi badany (54,4%) przedstawił argumenty przemawiające za utrzymaniem obecnych warunków uprawniających górników do przechodzenia na wcześniejszą emeryturę. Warto zauważyć, że obecny system został dużo lepiej oceniony przez robotników niż osoby dozoru (odpowiednio: 47,6% wskazań i 36,8% wskazań). Podobne relacje zachodzą wśród osób młodszych i starszych: do 30 lat – 60,9% wskazań, od 31 do 40 lat – 40,7%, 41 lat i więcej – 26,7% wskazań. Można wnioskować, że młodzi respondenci, przed którymi jeszcze wiele lat pracy zawodowej, są mniej pewni, czy w ich przypadku zachowane zostaną obecne (korzystne ich zdaniem) warunki uprawniające do otrzymania górniczej emerytury. Tym samym, ich motywacja do zabrania głosu w sprawie pozostawienia obecnych warunków emerytalnych w niezmienionej formie, była większa, niż w przypadku osób, którym do emerytury nie pozostało już wiele lat.

Wymieniane przez górników argumenty, przemawiające za obecnym systemem, można uszeregować w następujące pięć kategorii (rys. 4):

- 1) ciężkość pracy – 16,5% badanych,
- 2) ciężkość/szkodliwość warunków pracy – 36% badanych,
- 3) ryzyko wypadkowe – 13,6% badanych,
- 4) ryzyko chorobowe – 10,7% badanych,
- 5) inne – 4,9% badanych.

Piąta kategoria obejmowała odpowiedzi, takie jak: system jest sprawiedliwy (2 wskazania), jest to dobre rozwiązanie (1 wskazanie), ludzie nie lubią zmian, a tym bardziej na gorsze (1 wskazanie), warunki przejścia na emeryturę powinny być znane w momencie podejmowania pracy (1 wskazanie).

Porównanie rodzaju wypowiedzi badanych z zajmowanym przez nich stanowiskiem i posiadaniem wiekiem wskazuje, że bogatszą argumentacją posługiwali się częściej robotnicy niż osoby dozoru (osoby zajmujące stanowiska dozoru koncentrowały się wyłącznie na ciężkości pracy i ciężkości/szkodliwości warunków pracy). Z kolei proporcjonalnie najwięcej badanych, wysuwających konkretne argumenty w każdej z wyodrębnionych kategorii można znaleźć wśród ankietowanych, którzy nie przekroczyli 30 roku życia.



Rys. 4. Argumenty przemawiające za obecnym systemem emerytalnym dla górników według badanej grupy (N = 103)

Fig. 4. Arguments for the present pension system for miners according to the examined group (N = 103)

Warto zauważyć, że jedynie dwie osoby sformułowały argumenty przeciwne obecnemu systemowi. Pierwszy badany odniósł się do problemu zbyt niskiej prawnej granicy wieku emerytalnego („zbyt wczesne przejście na emeryturę”). Drugi uznał, że zmiana obowiązujących warunków jest potrzebna ponieważ jest „zbyt wielu uprawniających”.

4. PODSUMOWANIE

Ekspert zajmujący się systemami emerytalnymi zwraca uwagę, że przy wyznaczaniu granicy wieku emerytalnego powinny być brane pod uwagę różne przesłanki zarówno natury prawnej, ekonomicznej, jak i społecznej. Gertruda Uścińska zauważa: „Ustalenie granicy wieku emerytalnego powinno być oparte na kryteriach zdrowotnych, w tym na poziomie zdolności do pracy, a także ekonomicznych – możliwości dalszej pracy, z uwzględnieniem sytuacji na rynku pracy. W ostatnim okresie coraz większą rolę przy ustalaniu wieku emerytalnego odgrywają czynniki ekonomiczne i demograficzne. (...) Wcześniejsze przechodzenie na emeryturę traktowane jest jako zapobieganie bezrobociu ludzi w starszym wieku. Jednakże taka polityka jest coraz rzadziej stosowana ze względu na sytuację demograficzną wielu państw europejskich, wzrastający odsetek ludzi w wieku starszym, a malejący – ludzi młodszych (Góra 2003), a także zweryfikowanie tezy, że zwalnianie starszych pracowników daje miejsca pracy młodym ludziom (Kryńska 2004). Na decyzję o granicy wieku emerytalnego wpływają także regulacje międzynarodowe. Często jednak decyzja jest podejmowana jako wynik układów i porozumień politycznych” (Uścińska 2010).

Ostatnie kryterium wymienione przez autorkę, tj. układy i porozumienia polityczne, miało zastosowanie w wypadku wcześniejszych emerytur górniczych. Tak przynajmniej wynika z licznych doniesień medialnych, dla przykładu krótki cytat z tygodnika „Polityka”: „Jak uzgodnić choćby definicję, czym emerytura być powinna, skoro jednocześnie funkcjonuje w kraju aż sześć, kompletnie różnych systemów emerytalnych? KRUS – jako sposób transferu pomocy socjalnej dla rolników, bez względu na ich sytuację materialną. Mundurowe – jako rekompensata za niskie pensje i niebezpieczną pracę. Górnicze – bo udało się je wywalczyć kilofami pod Sejmem, bez przekonujących argumentów merytorycznych. Dla sędziów i prokuratorów – jako

forma przywileju” (Solska 2011). Z przeprowadzonej analizy rozwiązań dotyczących emerytury górniczej w Europie wynika, że nie tylko w Polsce, ale też w wielu innych państwach, górnicy z reguły posiadają przywilej przechodzenia na emeryturę we wcześniejszym wieku niż pozostali ubezpieczeni, nawet tam, gdzie górnictwo węglowe jest niszową gałęzią gospodarki. I chyba nie wszyscy „wywalczyli je kilofami” pod parlamentem.

Spółeczeństwo polskie, jak wynika z badań prowadzonych przez CBOS, jest przeciwne podniesieniu wieku emerytalnego, w tym także podniesieniu wieku emerytalnego dla kobiet (w celu zrównania go z wiekiem mężczyzn). Natomiast w kwestii przywilejów emerytalnych, większość popiera postulat likwidacji przywilejów emerytalnych pracowników służb mundurowych i rolników, jednak prawo do wcześniejszej emerytury przyznaje m.in. górnikom. W opinii większości Polaków wcześniejsze emerytury są bardzo korzystne dla samych emerytów, znacznie mniej dla ogółu zatrudnionych, a zdecydowanie niekorzystne dla polskiej gospodarki.

Postulat zachowania przez górników przywileju przechodzenia na wcześniejszą emeryturę znajduje poparcie wśród samych zainteresowanych. Przeprowadzony sondaż pokazał bowiem, że nie ma powszechnego przyzwolenia wśród badanych górników na wprowadzenie w tym względzie zmian w obowiązujących warunkach. Za zachowaniem status quo przemawiają – zdaniem górników – ciężkie, szkodliwe warunki, w jakich wykonują swoją pracę, trudność samej pracy oraz ponoszone ryzyko wypadkowe i chorobowe. Obecnego systemu bronili, relatywnie częściej robotnicy niż osoby dozoru, podobnie osoby młodsze niż starsze. Można wnosić, że młodzi górnicy, przed którymi jeszcze wiele lat pracy zawodowej, są mniej pewni, czy w ich przypadku zachowane zostaną obecne korzystne warunki uprawniające do otrzymania górniczej emerytury.

Badani górnicy, podobnie jak większość społeczeństwa, są przekonani, że wcześniejsze emerytury będą korzystne dla samych emerytów, mniej korzystne dla ogółu zatrudnionych, a zdecydowanie niekorzystnie wpłyną na polską gospodarkę. Tak jak większość Polaków, tak i sami górnicy są negatywnie nastawieni do podnoszenia wieku emerytalnego (przy czym opinie te nie były odnoszone do pracujących w warunkach szczególnych).

Górnicy przyznają prawo do zachowania dotychczasowych przywilejów nie tylko własnej grupie zawodowej (choć w szczególności właśnie jej), ale także policjantom, żołnierzom, rolnikom i nauczycielom. Prawa tego odmawiają jednak sędziom i prokuratorom. W tym kontekście, trudno zarzucić górnikom, iż w myśleniu o systemie emerytalnym, kierują się wyłącznie partykularyzmem grupowym. W odniesieniu do własnej grupy zawodowej uznają, że posiadany przywilej przechodzenia na wcześniejszą emeryturę jest społecznie sprawiedliwy.

Zdecydowane poparcie dla przywileju wcześniejszej górniczej emerytury wiąże się ze znacznym poziomem zadowolenia ze sposobu, w jaki działa system ubezpieczeń emerytalnych górników. Badani górnicy w większości aprobują warunki przechodzenia na wcześniejsze emerytury stawiane przez ustawodawcę, nie dając tym samym przyzwolenia na zmianę obowiązującej granicy wieku.

Przeprowadzone badania przyniosły wiele refleksji. Głównym spostrzeżeniem jest niski poziom przyzwolenia górników na zmianę obowiązujących warunków uzy-

skania górniczej emerytury, w tym prawnej granicy wieku emerytalnego. Sytuacja ta może nieco utrudnić negocjacje, szczególnie w kontekście zmian w górniczych emeryturach zapowiadanych przez premiera Donalda Tuska w listopadowym exposé. W jednej tylko sprawie, być może łatwiej będzie osiągnąć porozumienie – jest to korekta listy stanowisk uprawniających do skorzystania z prawa do emerytury górniczej.

Literatura

1. Babbie E. (2005): *Badania społeczne w praktyce*. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN, s. 201–208.
2. Bukowski M., Lewandowski P. (2011): Czy należy się bać podniesienia wieku emerytalnego? IBS Policy Paper nr 1, s. 5.
3. Bułgarskie związki zbierają podpisy przeciw reformie emerytur, 16 września, 13:16, PD/PAP.
4. Dziubińska-Michalewicz M. (2005): Szczególne uprawnienia emerytalno-rentowe górników w wybranych krajach UE. Warszawa, Kancelaria Sejmu, Biuro Studiów i Ekspertyz.
5. Głogowski T. (2011): Ach, górnikiem być (<http://wyborcza.biz>) 14.09.2011.
6. Kłos B. (2011): Europejskie systemy emerytalne – stan i perspektywy. Warszawa, Kancelaria Sejmu, Biuro Analiz Sejmowych. Analizy BAS nr 5 (<http://www.bas.sejm.gov.pl>).
7. Kostrzewski L., Miączyński P. (2011): Czy to już koniec przywilejów emerytalnych? (<http://wyborcza.biz>, 29.11.2011).
8. Pożeraj J. (2007): System emerytalny w Bułgarii. *Polityka Społeczna* nr 9, s. 16–18.
9. Roguska B. (2008): System emerytalny – oceny i postulaty. *Komunikat z Badań*. Warszawa, CBOS (<http://www.cbos.pl>).
10. Roguska B. (2011): Opinie o planowanych zmianach w systemie emerytalnym. *Komunikat z Badań*. Warszawa, CBOS (<http://www.cbos.pl>).
11. Solska J. (2011): Państwo to oni? *Polityka* nr 3 (2790) z 15.01.2011, s. 12–14.
12. System emerytalny 9 lat po reformie. *Studia BAS* nr 11. Warszawa, Kancelaria Sejmu, Biuro Analiz Sejmowych 2008, s. 178.
13. Szczepańska J. (2007): Wcześniejsze emerytury i praca zarobkowa emerytów. *Komunikat z Badań*. Warszawa, CBOS (<http://www.cbos.pl>).
14. Ustawa z dnia 17 grudnia 1998 r. o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych (tekst ujednolicony), opracowany na podstawie: Dz. U. z 2009 r. Nr 153, poz. 1227, z 2010 r. Nr 40, poz. 224, Nr 134, poz. 903, Nr 238, poz. 1578, Nr 257, poz. 1726, z 2011 r. Nr 75, poz. 398, Nr 149, poz. 887, Nr 168, poz. 1001, Nr 187, poz. 1112, Nr 205, poz. 1203 (<http://isap.sejm.gov.pl>).
15. Uścińska G. (2010): Kierunki rozwiązań w zakresie wieku emerytalnego. W: *Gospodarka i czynniki demograficzne a system emerytalny*. Warszawa, Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową, s. 64–65 (www.ibngr.pl).
16. <http://www.deutsche-rentenversicherung-bund>.
17. <http://www.eures-triregio/eu/pl>.
18. <http://www.ibngr.pl>.
19. <http://www.mps-pension.org.uk/>.
20. <http://www.nettg.pl>.
21. <http://www.praguepost.com/business/2518-miners-granted-early-retirement.html>.
22. <http://www.rp.pl/artykul/662634.html>.
23. <http://www.rp.pl/artykul/662634.html>.
24. <http://www.rp.pl/artykul/662634.html>.
25. <http://www.towerswatson.com/spain/research/1483>.
26. <http://www.zus.pl>.

Adam Smoliński*, Natalia Howaniec*

BADANIA PROCESU ZGAZOWANIA WĘGLA KAMIENNEGO W OBECNOŚCI K_2CO_3

Streszczenie

Technologie zgazowania węgla są technologiami dojrzałymi, które znajdują zastosowanie w przemyśle. W dalszym ciągu prowadzone są jednak prace nad rozwojem nowych i doskonaleniem już istniejących rozwiązań technologicznych w tym zakresie. Liczne prace badawcze poświęcono zastosowaniu katalizatorów w omawianym procesie. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu zgazowania parą wodną węgla z dodatkiem K_2CO_3 jako katalizatora procesu w laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym. Badaniom poddano węgiel pochodzący z kopalni „Szczygłowice” z pokładu 405/1. Przeprowadzono dwie serie eksperymentów. W pierwszej z nich zgazowywano węgiel bez dodatku katalizatora w temperaturze 700, 800 i 900°C. Objętość produkowanego gazu w temperaturze 900°C była około 20% większa, niż objętość gazu otrzymanego w procesie zgazowania w temperaturze 700°C. W drugiej serii eksperymentów węgiel zgazowywano z dodatkiem 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3 w temperaturze 700°C. Przy zastosowaniu powyżej 10% wag. K_2CO_3 zaobserwowano wzrost ilości produkowanego gazu w procesie oraz zmiany w jego składzie. Jako optymalną ilość katalizatora określono 15% wag. K_2CO_3 , dla którego otrzymano objętość gazu, porównywalną z objętością uzyskaną w temperaturze 900°C bez dodatku katalizatora.

Investigations into the hard coal gasification process in the presence of K_2CO_3

Abstract

Coal gasification technologies are commercially proven. Nevertheless, the development of new and improvement of the existing technological solutions in the field are still of research interests. Numerous research works have been devoted to the application of catalysts in the process concerned. In the presented work the experimental results of steam gasification of coal with K_2CO_3 as a catalyst in a laboratory scale fixed-bed reactor are presented. In the experiments coal from coal seam no 405/1 of “Szczygłowice” coal mine was used. Two series of experiments were performed. In the first one coal was gasified with steam without addition of the catalyst at the temperature of 700, 800 and 900°C. The volume of gas produced at 900°C was approximately of 20% higher than the volume obtained at 700°C. In the second series of experiments coal was gasified with 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 and 22.5% w/w of K_2CO_3 at 700°C. Addition of over 10% w/w of K_2CO_3 resulted in increase in product gas volume and changes in its composition. The optimum amount of the catalyst was determined to be 15% w/w of K_2CO_3 , for which gas volume, comparable with the one generated at 900°C without catalyst, was obtained.

1. WPROWADZENIE

Węgiel stanowi obecnie podstawę bezpieczeństwa energetycznego świata. Jego zasoby szacuje się na około 120 lat, przy zasobach gazu ziemnego na poziomie około 63 lat i ropy naftowej 46 lat (BP 2010). Ponad 40% światowej oraz około 95% produkcji energii elektrycznej w Polsce jest opartej na węglu. Przewiduje się 87% wzrost światowo-

* Główny Instytut Górnictwa

wej produkcji energii elektrycznej w latach 2006–2030, ze stałym udziałem węgla w bazie surowcowej na poziomie około 40% (U.S. EIA 2010). Procesy termochemicznej konwersji węgla wiążą się jednak z emisją zanieczyszczeń, takich jak: CO₂, NO_x, SO_x oraz pyłów. W celu minimalizacji negatywnego oddziaływania na środowisko procesów przetwórstwa węgla do celów energetycznych promuje się rozwijanie i wdrażanie czystych technologii węglowych, w tym technologii zgazowania, również zgazowania podziemnego (Stańczyk i in. 2010, 2011), charakteryzujących się wyższą sprawnością i niższymi emisjami zanieczyszczeń w porównaniu z technologiami spalania.

Na świecie działają obecnie 144 instalacje zgazowania, o łącznej mocy cieplnej gazu syntezowego 71 tys. MWt. Ocenia się, że do 2016 r. łączna moc instalacji wzrośnie do 122 tys. MWt, czemu będzie towarzyszyć wzrost udziału mocy produkowanej w oparciu o węgiel (z obecnych 51 do 62%), przy utrzymaniu mocy produkowanej w oparciu o biomasę i odpady na poziomie poniżej 1% (NETL 2010). Jednocześnie produkcja, składowanie i transport wodoru, jako nowoczesnego, przyjaznego środowisku nośnika energii, stanowią obecnie przedmiot priorytetowych prac badawczo-rozwojowych zarówno w UE, jak i na świecie, np. w USA. W związku z powyższym zasadne jest prowadzenie również w Polsce badań nad procesem zgazowania węgla oraz jego optymalizacji z zastosowaniem katalizatorów, w celu produkcji gazu bogatego w wodór. Wdrożenie technologii umożliwiłoby zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju w oparciu o własne surowce z zastosowaniem zrównoważonych systemów energetycznych. Wpisałoby się to także w prace nad rozwojem światowej gospodarki wodorowej. Dostępne są liczne prace badawcze poświęcone zgazowaniu węgla, w tym zgazowaniu z zastosowaniem katalizatorów, umożliwiających między innymi prowadzenie procesu w niższej temperaturze, przy zachowaniu lub zwiększeniu stopnia konwersji węgla, wzroście reaktywności karbonizatów węglowych, której wartość stanowi istotną informację na temat możliwości zastosowania paliwa w danym procesie (Smoliński 2007, 2008, 2010, 2011; Sharma, Takanohashi, Saito 2008), zwiększeniu wydajności procesu i optymalizacji składu gazu, zależnie od wymogów związanych z jego zastosowaniem. Wśród badanych substancji i związków o działaniu katalitycznym w procesie zgazowania węgla do gazu bogatego w wodór można wymienić metale alkaliczne (Hauserman 1994; Timpe i in. 1997), związki żelaza (Ohtsuka, Asami 1997; Timpe i in. 1997; Yu i in. 2006), niklu (Timpe i in. 1997) lub wapnia (Ohtsuka, Asami 1997; Lin i in. 2002a, 2002b, 2005, 2006; Mondal i in. 2005). Związki potasu były wcześniej badane w aspekcie zastosowania w procesie katalitycznego zgazowania węgla do gazu bogatego w metan (Juntgen 1983; Nahas 1983; Hauserman 1994) i wodór (Wang i in. 2005, 2009; Sharma, Takanohashi, Saito 2008). Badania omówione w niniejszej pracy nad wpływem ilościowym i jakościowym związków potasu na efektywność procesu zgazowania węgla z polskich zasobów surowcowych, stanowią wkład do badań prowadzonych obecnie na świecie nad wysoko sprawnymi i ekonomicznie konkurencyjnymi technologiami produkcji gazu bogatego w wodór. Technologie te mogłyby zapewnić wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju, przy zachowaniu zasad zrównoważonego rozwoju.

2. METODYKA BADAŃ KATALITYCZNEGO PROCESU ZGAZOWANIA WĘGLA PARĄ WODNĄ

Badania procesu zgazowania węgla były prowadzone dwuetapowo w laboratoryjnej instalacji z reaktorem ze złożem stałym. W pierwszym etapie badano proces zgazowania węgla parą wodną w temperaturze 700, 800 i 900°C. W drugim etapie badań zgazowywano węgiel z dodatkiem różnych ilości katalizatora w temperaturze 700°C. Schemat instalacji przedstawiono na fotografii 1, natomiast szerszy opis działania instalacji można znaleźć w pracach Smolińskiego (2007, 2010).



Fot. 1. Instalacja do badania procesów katalitycznego zgazowania węgla w reaktorze ze złożem stałym (Smoliński 2007, 2010)

Photo. 1. Installation for testing the processes of catalytic coal gasification in the fixed-bed reactor (Smoliński 2007, 2010)

W pierwszej serii badań próbka węgla o masie 10 g w stanie analitycznym była umieszczana w dolnej części reaktora pomiędzy dwiema warstwami waty kwarcowej, zapewniającej lepszy rozkład temperatury oraz zapobiegającej porywaniu ziaren próbki przez media gazowe doprowadzane do reaktora. Po zamknięciu reaktora i sprawdzeniu szczelności układu, był on z umieszczoną wewnątrz próbką ogrzewany za pomocą pieca oporowego, do zadanej temperatury 700, 800 i 900°C, z prędkością $1,33^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Po ustabilizowaniu się temperatury do wnętrza reaktora była wprowadzana para wodna, z natężeniem przepływu $5,33\cdot 10^{-2}\text{ cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Powstające w procesie zgazowania produkty gazowe były kierowane do układu separatorów, w celu zatrzymania smoły węglowej i wilgoci. Objętość schłodzonego i osuszonego produktu gazowego była mierzona za pomocą przepływomierza masowego, natomiast jego skład analizowano w sposób ciągły, przy użyciu dwukanałowego chromatografu gazowego Agilent 3000A.

W drugiej serii eksperymentów zbadano wpływ katalityczny K_2CO_3 na proces zgazowania węgla. W tym celu próbkę węgla o masie 10 g mieszano z K_2CO_3 w ilości 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5% wag. Następnie ogrzewano ją w reaktorze do temperatury 700°C. Po ustabilizowaniu temperatury do reaktora była wprowadzana

para wodna, z natężeniem przepływu $5,33 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Analogicznie do testów zgazowania bez dodatku katalizatora, otrzymywany w procesie gaz był osuszany i oczyszczany, a jego objętość była mierzona przy użyciu przepływomierza masowego, natomiast skład przy użyciu chromatografu gazowego.

Każdy eksperyment powtórzono trzykrotnie, a końcowe wartości są wartościami średnimi.

Na podstawie średniej ilości powstającej mieszaniny gazowej oraz jej składu procentowego obliczono wartość opałową otrzymanego gazu z równania

$$Q_g = \sum_i c_i W_i, \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (1)$$

gdzie c_i określa średnie stężenia poszczególnych składników produkowanego gazu syntezowego [% obj.], natomiast W_i – ich ciepło spalania [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$].

3. CHARAKTERYSTYKA PRÓBEK WĘGLA DO BADAŃ

Do badań wytypowano węgiel z kopalni „Szczygłowie” z pokładu 405/1. Próbki węgla zostały pobrane zgodnie z normą PN-90/G-04502. Dla próbek wykonano analizę elementarną na zawartość pierwiastków C, H, N i S oraz analizę techniczną na zawartość wilgoci, popiołu i części lotnych. Ponadto, określono ciepło spalania, wartość opałową i właściwości popiołu, takie jak: temperatura spiekania, mięknięcia, topnienia oraz płynięcia, w atmosferze utleniającej. Wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 1. Badania przeprowadzono w akredytowanym laboratorium Zakładu Oceny Jakości Paliw Stałych w Głównym Instytucie Górnictwa zgodnie z obowiązującymi normami dla poszczególnych oznaczeń: PN-G-04511:1980 – zawartość wilgoci całkowitej, PN-G-04560:1998 i PN-ISO 1171:2002 – zawartość popiołu, PN-G-04516:1998 i PN-ISO-562:2000 – zawartość części lotnych, PN-G-04513:1981 – ciepło spalania i wartość opałowa, PN-G-04535:1982 i PN-ISO 540:2001 – temperatura topliwości popiołu, PN-G-04584:2001 i PN-ISO 334:1997 – zawartość S_t^a , PN-G-04571:1998 – zawartość C_t^a , H_t^a i N_t^a oraz PN-G-04516:1998 – wskaźnik *fixed carbon*.

Tabela 1. Wyniki analiz właściwości fizykochemicznych badanych próbek węgla z kopalni „Szczygłowie” z pokładu 405/1

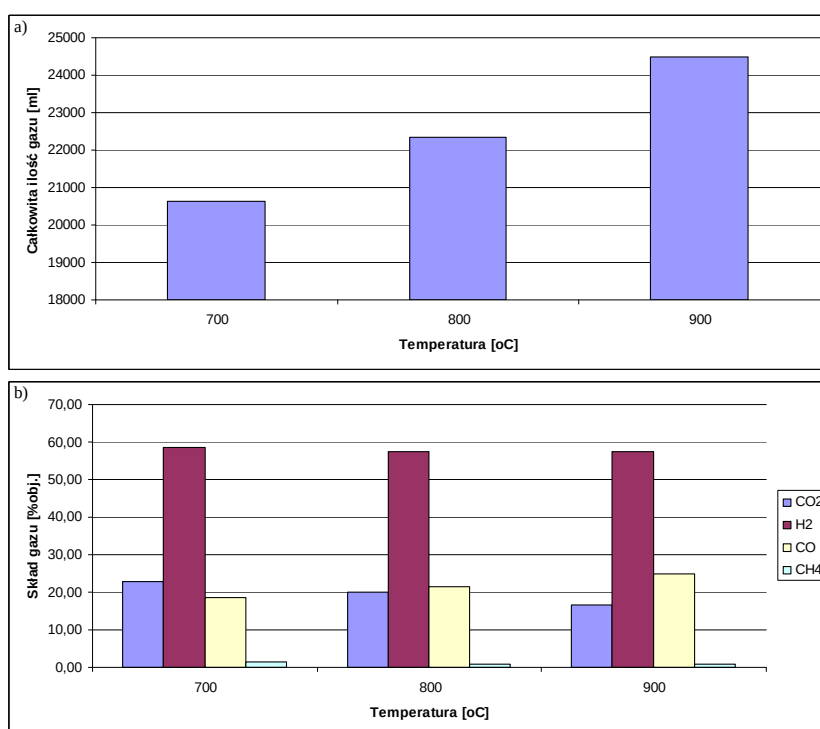
Parametr	Wartości dla próbek węgla z kopalni „Szczygłowie”
Stan roboczy	
Zawartość wilgoci całkowitej W_f , %	2,91
Zawartość popiołu A_f , %	7,04
Zawartość siarki całkowitej S_f , %	0,30
Wartość opałowa Q_f , kJ/kg	31095
Stan analityczny	
Zawartość wilgoci całkowitej W^a , %	1,36
Zawartość popiołu A^a , %	7,15
Zawartość części lotnych V^a , %	28,80
Ciepło spalania Q_{s^a} , kJ/kg	32 743
Wartość opałowa Q_{f^a} , kJ/kg	31 630
Temperatura topliwości popiołu oxy: temperatura spiekania t_s , °C	970

cd. Tabeli 1

Temperatura mięknięcia t_A , °C	1310
Temperatura topnienia t_B , °C	1340
Temperatura płynięcia t_C , °C	1370
Zawartość siarki całkowitej S_r^a , %	0,3
Zawartość węgla pierwiastkowego C_r^a , %	79,75
Zawartość wodoru H_r^a , %	4,42
Zawartość azotu N^a , %	1,32
Stan suchy	
Zawartość popiołu A_d , %	7,25
Zawartość siarki całkowitej S_r^d , %	0,3
Zawartość części lotnych V^{daf} , %	31,48
Ciepło spalania Q_s^{daf} , kJ/kg	35788

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Na rysunku 1 przedstawiono całkowitą ilość gazu oraz jego skład procentowy uzyskany w czasie jednej godziny testu, w procesie zgazowania węgla kamiennego w temperaturze 700, 800 i 900°C.



Rys. 1. Całkowita objętość (a) oraz skład procentowy gazu (b) otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną węgla kamiennego z kopalni „Szczygłowice” w temperaturze 700, 800 i 900°C

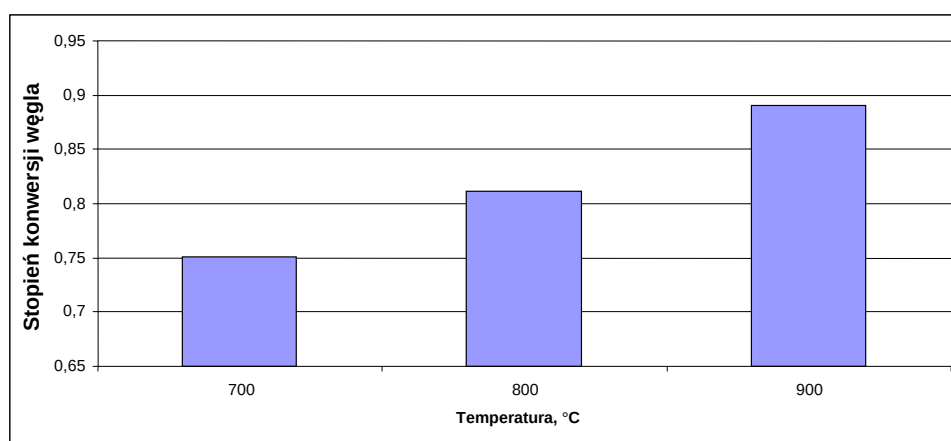
Fig. 1. Total gas volume (a) and percentage composition (b) of gas obtained in the process of steam gasification of “Szczygłowice” coal at the temperature of 700, 800, and 900°C

Na podstawie średniej objętości powstającej mieszaniny gazowej oraz jej składu procentowego obliczono wartość opałową gazu otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną w temperaturze 700, 800 i 900°C (tab. 2).

Tabela 2. Wartość opałowa Q_g [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$] gazu otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną węgla z kopalni „Szczygłowice” w zakresie temperatury 700–900°C

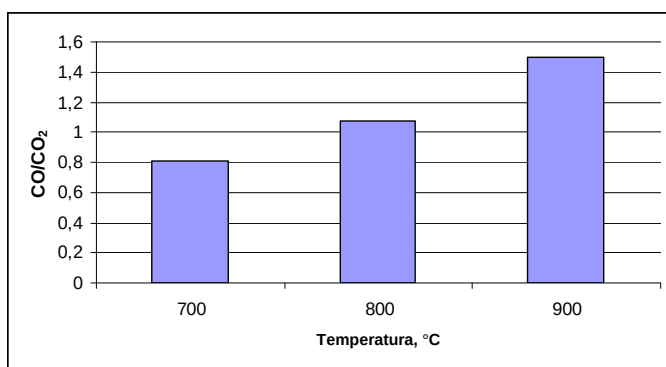
Parametr	Temperatura, °C		
	700	800	900
Q_g , $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	9,0	9,1	9,4

Wartość opałowa gazu, jego ilość oraz stopień konwersji węgla rosły wraz ze wzrostem temperatury procesu zgazowania (rys. 2). Całkowita objętość produkowanego gazu była odpowiednio o 8 i 19% większa w temperaturze 800 i 900°C niż w temperaturze 700°C. Wraz ze wzrostem temperatury procesu zgazowania zaobserwowano również obniżenie stężenia wodoru w produkowanym gazie. Zmalało ono z 58,7% obj. w temperaturze 700°C do 57,5% obj. w 900°C. Jednocześnie nastąpił spadek stężenia dwutlenku węgla z 22,8% obj. w temperaturze 700°C do 16,7% obj. w 900°C. Zaobserwowano natomiast wzrost stężenia tlenu węgla w gazie z 18,5 do 25,0% obj. odpowiednio w temperaturze 700 i 900°C. Znaczny wzrost stężenia tlenu węgla, przy jednoczesnym obniżeniu stężenia dwutlenku węgla i nieznacznym obniżeniu stężenia wodoru w produkowanym gazie ze wzrostem temperatury, tłumaczy wzrost wartości opałowej produkowanego gazu (tab. 2). Stosunek molowy CO/CO_2 w gazie produkowanym w procesie zgazowania węgla parą wodną w temperaturze 700, 800 i 900°C przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Stopień konwersji węgla w procesie zgazowania parą wodną w temperaturze 700, 800 i 900°C

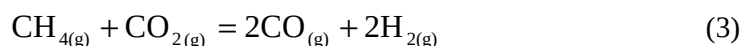
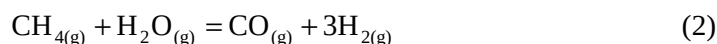
Fig. 2. Carbon conversion rate in the process of steam gasification of coal at the temperature of 700, 800, and 900°C



Rys. 3. Stosunek molowy CO/CO₂ w gazie produkowanym w procesie zgazowania parą wodną węgla z kopalni „Szczygłowice” w temperaturze 700, 800 i 900°C

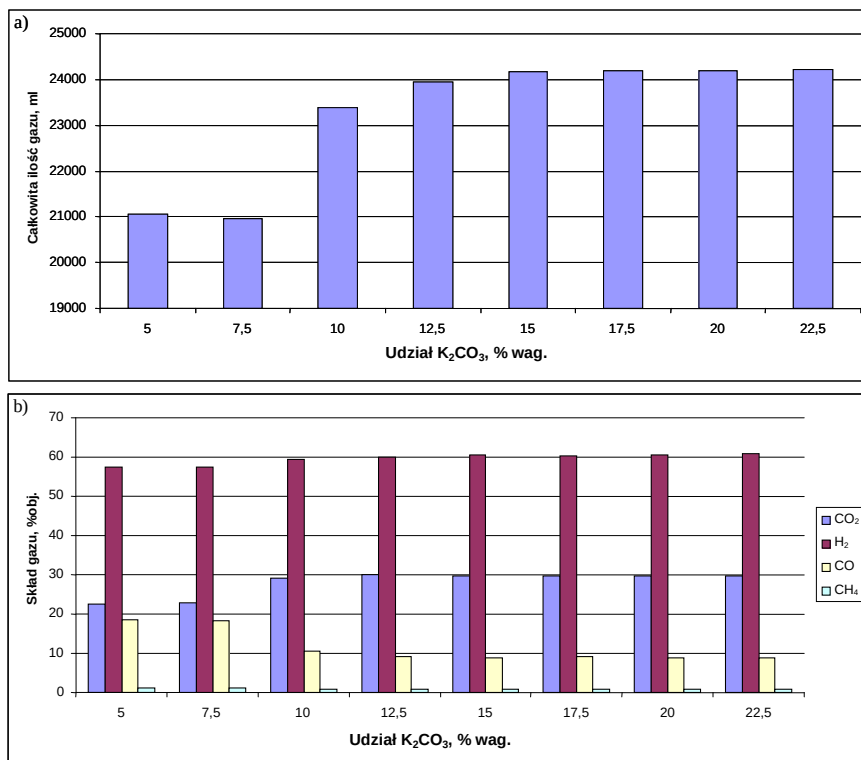
Fig. 3. Molar ratio CO/CO₂ in gas generated in the process of steam gasification of “Szczygłowice” coal at the temperature of 700, 800, and 900°C

Obniżenie stężenia dwutlenku węgla i jednocześnie wzrost stężenia tlenku węgla obserwowany ze wzrostem temperatury prowadzenia procesu, wynika z reakcji Boudouarda oraz niewystępowania reakcji konwersji tlenku węgla parą wodną w temperaturze powyżej 800°C. Obserwowane w całym zakresie temperatury niskie stężenie metanu jest spowodowane występowaniem reakcji reformingu metanu parą wodną oraz tzw. suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla:



Dalsze badania były ukierunkowane na określenie wpływu K₂CO₃ na proces zgazowania węgla parą wodną, a w szczególności wpływu udziału wagowego katalizatora na skład i objętość produkowanego gazu w temperaturze 700°C. Na rysunku 4 przedstawiono całkowitą objętość oraz skład procentowy gazu uzyskanego w czasie jednej godziny testu, w procesie zgazowania węgla kamiennego w temperaturze 700°C z dodatkiem 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K₂CO₃. Stwierdzono, że dodatek 5 i 7,5% wag. katalizatora nie powodował zmian w objętości i składzie produkowanego w procesie zgazowania gazu, w porównaniu z gazem otrzymanym w procesie zgazowania węgla parą wodną, w temperaturze 700°C bez dodatku katalizatora. Dopiero przy zastosowaniu dawki 10% wag. K₂CO₃ zaobserwowano również wzrost całkowitej objętości produkowanego gazu o 13%. Użycie większej ilości K₂CO₃ wywołało również wzrost stopnia konwersji węgla w procesie (rys. 5). Ponadto, zaobserwowano niewielki wzrost stężenia wodoru w produkowanym gazie z 58,7 do 59,4% obj. Jednocześnie odnotowano wyraźne obniżenie stężenia tlenku węgla z 18,5 do 10,7% obj. i wzrost stężenia dwutlenku węgla z 22,75 do 29,16% obj., odpowiednio w procesie bez i z dodatkiem katalizatora. Zaobserwowano również obniżenie stężenia metanu z 1,3 do 0,8% obj. Zwiększenie udziału wagowego katalizatora do 15% wag. K₂CO₃ spowodowało dalszy wzrost ilości gazu oraz zmiany w jego skła-

dzie. Zaobserwowano wzrost całkowitej objętości gazu o 17% oraz wzrost stężenia wodoru i dwutlenku węgla w produkowanym gazie do odpowiednio 60,5 i 29,8% obj., a także obniżenie stężenia tlenku węgla i metanu odpowiednio do 9,0 i 0,8% obj., w porównaniu z gazem otrzymywanym w procesie zgazowania węgla bez dodatku katalizatora w temperaturze 700°C. Ta ilość katalizatora stanowiła wartość graniczną, powyżej której dalsze zwiększanie jego udziału nie powodowało już wyraźnych zmian w ilości i składzie produkowanego gazu.

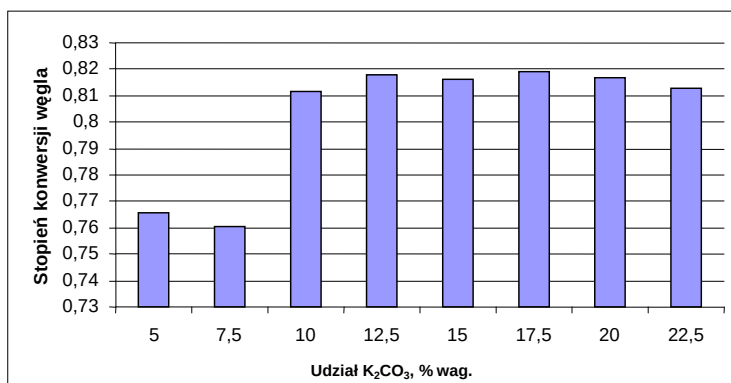


Rys. 4. Całkowita ilość (a) oraz skład procentowy gazu (b) otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną węgla kamiennego z kopalni „Szczygłowice” w temperaturze 700°C z dodatkiem 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3

Fig. 4. Total gas volume (a) and percentage composition (b) of gas generated in the process of steam gasification of “Szczygłowice” coal at the temperature of 700°C with the addition of 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 and 22.5% w/w of K_2CO_3

W tabeli 3 przedstawiono wartość opałową gazu otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną węgla w obecności katalizatora K_2CO_3 w temperaturze 700°C. Gaz uzyskany w procesie katalitycznego zgazowania parą wodną węgla (dodatek K_2CO_3 powyżej 10% wag.) charakteryzował się niższą wartością opałową niż gaz produkowany bez dodatku katalizatora w temperaturze 700°C, co było spowodowane obniżeniem stężenia tlenku węgla i wzrostem stężenia dwutlenku węgla w produkowanym gazie. Mimo to odnotowano znaczny wzrost jego objętości. Ponadto, gaz ten charakte-

ryzował się wyższą zawartością wodoru, niż gaz produkowany w procesie zgazowania węgla bez dodatku katalizatora. Na rysunku 6 przedstawiono stosunek molowy CO/CO_2 w gazie produkowanym w procesie zgazowania węgla parą wodną w obecności różnych udziałów wagowych katalizatora w temperaturze 700°C .

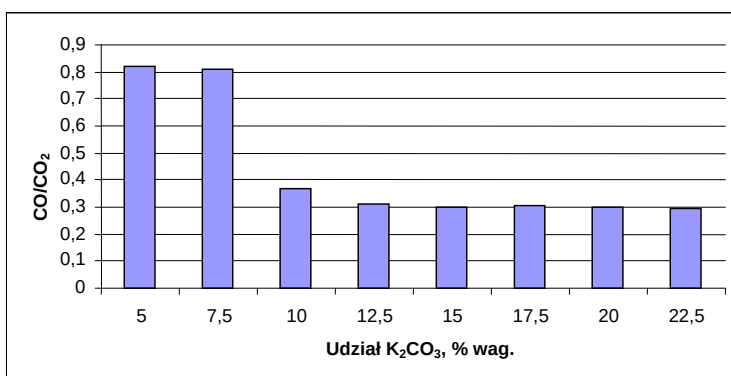


Rys. 5. Stopień konwersji węgla w procesie zgazowania parą wodną z dodatkiem 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3 w temperaturze 700°C

Fig. 5. Carbon conversion rate in the process of steam gasification of coal with the addition of 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 and 22.5% w/w of K_2CO_3 at the temperature of 700°C

Tabela 3. Wartość opałowa Q_g [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$] gazu otrzymanego w procesie zgazowania parą wodną węgla z kopalni „Szczygłowice” w temperaturze 700°C w obecności 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3

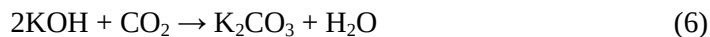
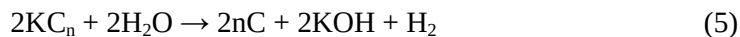
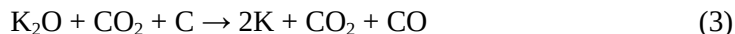
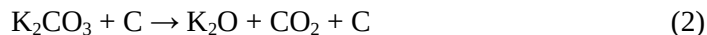
Parametr	% wag. K_2CO_3							
	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5
Q_g , $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	8,8	8,8	8,0	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9



Rys. 6. Stosunek molowy CO/CO_2 w gazie produkowanym w procesie zgazowania parą wodną węgla z kopalni „Szczygłowice” w obecności 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3 w temperaturze 700°C

Fig. 6. Molar ratio CO/CO_2 in gas generated in the process of steam gasification of “Szczygłowice” coal with addition of 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 and 22.5% w/w of K_2CO_3 at the temperature of 700°C

Dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych zaproponowano następujący mechanizm katalitycznego procesu zgazowania (Wang i in. 2009):



W badaniach Wang i inni (2009) stwierdzili, że gaz otrzymywany w procesie zgazowania parą wodną węgla z dodatkiem 10–17,5% wag. katalizatora charakteryzował się wysoką zawartością wodoru i niską zawartością tlenku węgla oraz praktycznie nie tworzył się metan w zakresie temperatury 700–750°C. Timpe i inni (1997) wykazali natomiast istotny wpływ katalizatora na szybkość zachodzenia procesu zgazowania. W przeprowadzonych badaniach zgazowania węgla z kopalni „Szczygłowice” stwierdzono, że zwiększanie dodatku katalizatora powyżej 15% wag. nie powodowało dalszej poprawy efektywności procesu zgazowania. Całkowita objętość i skład gazu produkowanego przy zastosowaniu 17,5, 20 i 22,5% wag. K_2CO_3 była porównywalna z otrzymanymi przy zastosowaniu 15% wag. katalizatora.

5. PODSUMOWANIE

- W badaniach zgazowania węgla z kopalni „Szczygłowice” bez dodatku katalizatora stwierdzono istotny wpływ temperatury na objętość otrzymywanego gazu. Objętość gazu produkowanego w procesie zgazowania w temperaturze 900°C była o około 20% większa niż objętość gazu otrzymanego w temperaturze 700°C. Jednocześnie zaobserwowano, że wraz ze wzrostem temperatury prowadzenia procesu zgazowania stężenie wodoru i dwutlenku węgla w produkowanym gazie malało, natomiast stężenie tlenku węgla rosło, co spowodowało wzrost wartości opałowej produkowanego gazu.
- W badaniach potwierdzono katalityczne właściwości K_2CO_3 w procesie zgazowania węgla parą wodną w temperaturze 700°C. Stwierdzono, że działanie katalityczne jest obserwowane dopiero przy zastosowaniu 10% wag. K_2CO_3 . W przypadku dodatku 5 i 7,5% wag. katalizatora nie obserwowano znaczących zmian w objętości i składzie produkowanego gazu.
- W testach z zastosowaniem powyżej 10% wag. K_2CO_3 obserwowano wzrost ilości produkowanego gazu w procesie i zmiany w jego składzie. Zaobserwowano niewielki wzrost stężenia wodoru w produkowanym gazie z 58,7 do 59,4% obj. Jednocześnie odnotowano wyraźne obniżenie stężenia tlenku węgla z 18,5 do 10,7% obj. i wzrost stężenia dwutlenku węgla z 22,75 do 29,16% obj. odpowiednio w procesie bez i z dodatkiem katalizatora.
- Użycie większej ilości K_2CO_3 spowodowało również wzrost stopnia konwersji węgla w procesie (rys. 5).

- Stwierdzono, że objętość gazu produkowanego w procesie zgazowania w temperaturze 700°C w obecności 15% wag. katalizatora, była porównywalna z objętością gazu otrzymywanego w procesie zgazowania węgla w temperaturze 900°C bez dodatku K_2CO_3 . Gaz ten składał się w 60,5% obj. z wodoru, 9,0% obj. tlenku węgla, 29,8% obj. dwutlenku węgla i 0,8% obj. z metanu.

Literatura

1. BP (2010): Statistical Review of World Energy 2010. <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>.
2. Hauserman W.B. (1994): High-yield hydrogen production by catalytic gasification of coal or biomass. *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 19, s. 13–19.
3. Juntgen H. (1983): Application of catalysts to coal gasification processes: Incentives and perspectives. *Fuel* Vol. 62, s. 234–238.
4. Lin S., Harada M., Suzuki Y., Hatano H. (2002b): Hydrogen production from coal by separating carbon dioxide during gasification. *Fuel* Vol. 81, s. 2079–2085.
5. Lin S., Harada M., Suzuki Y., Hatano H. (2005): Process analysis for hydrogen production by reaction integrated novel gasification (HyPr-RING). *Energy Conversion and Management* Vol. 46, s. 869–880.
6. Lin S., Harada M., Suzuki Y., Hatano H. (2006): Continuous experiment regarding hydrogen production by Coal/CaO reaction with steam (II) solid formation. *Fuel* Vol. 85, s. 1143–1150.
7. Lin S.Y., Suzuki Y., Hatano H., Harada M. (2002a): Developing an innovative method HyPr-RING to produce hydrogen from hydrocarbons. *Energy Conversion and Management* Vol. 43, s. 1283–1290.
8. Mondal K., Piotrowski K., Dasgupta D., Hippo E., Wiltowski T. (2005): Hydrogen from coal in a single step. *Industrial and Engineering Chemistry Research* Vol. 44, s. 5508–5517.
9. Nahas N.C. (1983): Exxon catalytic coal gasification process: Fundamental to flowsheets. *Fuel* Vol. 62, s. 239–241.
10. NETL (2010): Worldwide Gasification Database (www.netl.doe.gov).
11. Ohtsuka Y., Asami K. (1997): Highly reactive catalysts from inexpensive raw materials for coal gasification. *Catalysis Today* Vol. 39, s. 111–125.
12. Sharma A., Takanohashi T., Saito I. (2008): Effect of catalyst addition on gasification reactivity of Hyper Coal and coal with steam at 775–700°C. *Fuel* Vol. 87, s. 2686–2690.
13. Smoliński A. (2007): Opracowanie stanowiska do badań reaktywności węgla w procesie zgazowania w reaktorze ze złożem stałym. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 1, s. 49–58.
14. Smoliński A. (2008): Gas chromatography as a tool for determining coal chars reactivity in a process of steam gasification. *Acta Chromatographica* Vol. 20(3), s. 349–365.
15. Smoliński A. (2010): Niekonwencjonalne metody wykorzystania węgla kamiennego do otrzymywania gazu bogatego w wodór. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa* nr 880.
16. Smoliński A. (2011): Coal char reactivity as a fuel selection criterion for coal-based hydrogen-rich gas production in the process of steam gasification. *Energy Conversion and Management* Vol. 52, s. 37–45.
17. Stańczyk K., Howaniec N., Smoliński A., Świądrowski J., Kapusta K., Wiatowski M., Grabowski J., Rogut J. (2011): Experimental simulation of air and oxygen-enriched air underground gasification of lignite and hard coal. *Fuel* Vol. 90, s. 1953–1962.

18. Stańczyk K., Smoliński A., Kapusta K., Wiatowski M., Świądrowski J., Kotyrba A., Rogut J. (2010): Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite. *Fuel* Vol. 89, s. 3307–3314.
19. Timpe R.C., Kulas W., Hauserman W.B., Sharma R.K., Olson E.S., Willson W.G. (1997): Catalytic gasification of coal for the production of fuel cell feedstock. *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 22, s. 487–492.
20. U.S. EIA (2010): Energy Information Administration. *International Energy Outlook*. Washington, EIA.
21. Wang J., Jiang M., Yao Y., Zhang Y., Cao J. (2009): Steam gasification of coal char catalyzed by K₂CO₃ for enhanced production of hydrogen without formation of methane. *Fuel* Vol. 88, s. 1572–1579.
22. Wang J., Sakanishi K., Saito I., Takarara T., Morishita K. (2005): High-yield hydrogen production by steam gasification of HyperCoal (ash-free coal extract) with raw coal. *Energy and Fuels* Vol. 19, s. 2114–2120.
23. Yu J.L., Tian F.J., Chow M.C., Mckenzie L., Li C.Z. (2006): Effect of iron on the gasification of Victorian brown coal with steam: enhancement of hydrogen production. *Fuel* Vol. 85, s. 127–133.

Małgorzata Wysocka*, Stanisław Chałupnik*, Elżbieta Molenda**, Justin Brown***,
Rajdeep Sidhu****

OBSERWACJE ZMIAN EKSHALACJI RADONU W REKULTYWOWANYM OSADNIKU KOPALNIANYCH WÓD DOŁOWYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ekshalacji ^{222}Rn z osadów dennych likwidowanego osadnika wód dołowych. Badania prowadzono podczas wszystkich etapów likwidacji, tj. od osuszania, poprzez przykrywanie warstwami uszczelniającymi, aż po działania agrotechniczne i nasadzeniowe.

Wyniki badań wykazały, że wykonana rekultywacja osadnika zaowocowała obniżeniem ekshalacji radonu do wartości typowych dla terenów naturalnych. Stwierdzono jednocześnie, iż w przypadkach uszkodzenia lub rozszczelnienia warstw przykrywających osady denne, dojdzie do wzmożonej ekshalacji radonu.

Observations of radon exhalation changes in the reclaimed sedimentation basin of underground mine wastes

Abstract

In this paper, results from an investigation concerning the exhalation of the radioactive gas radon ^{222}Rn from bottom deposits in a reclaimed settling pond are presented. The measurements were performed at different stages of reclamation, starting from an initial step when bottom sediments were left to dry, then during the process of covering deposits with isolation layers and soil, and finally when agro-technical measures were applied.

The obtained results have shown that due to reclamation, the radon risk caused by radon exhalation from bottom sediments has been reduced significantly. Levels have decreased to those typical for undisturbed and unpolluted areas. However, on a cautionary note, any damage of the isolation layers may lead to a significant increase of radon emission from confined sediments.

1. WPROWADZENIE

Promieniotwórczy gaz – radon to drugi, po paleniu tytoniu, czynnik powodujący wzrost prawdopodobieństwa zachorowania na raka płuc (WHO 2009). Stężenie radonu w domach zależy przede wszystkim od budowy geologicznej podłoża, która nieustannie ulega modyfikacji w wyniku działalności człowieka. W obszarze Górnego Śląska najistotniejsza forma działalności jest związana z eksploatacją węgla kamiennego. Przyczyną potencjalnych zagrożeń ryzykiem radonowym są deformacje górotworu wywołane eksploatacją górnictwem i ich skutki na powierzchni, a wśród nich: de-

* Główny Instytut Górnictwa

** Kompania Węglowa SA, Oddział Kopalnia Węgla Kamiennego „Piast” w Bieruniu

*** Norwegian Radiation Protection Authority, Østerås, Norwegia

**** Institute for Energy Technology, Kjeller, Norwegia

zintegracja skał w strefie przypowierzchniowej, powstawanie zapadlisk oraz innych deformacji nieciągłych na powierzchni.

Wyżej wymienione zjawiska powodują, że powierzchnia, z której może następować emanacja radonu jest znacznie większa niż z niespękanej, litej skały. Ma to związek z otwieraniem się nowych dróg migracji fluidów. Pustki poeksploatacyjne, będące przyczyną powstawania zniszczeń struktury górotworu oraz powodujące deformacje nieciągłe na powierzchni, ułatwiają kumulację gazów. W konsekwencji także wzmacnia się migracja w glebie i wnikanie do budynków radonu oraz innych gazów (Wysocka 2002).

Restrukturyzacja polskiego górnictwa, ograniczanie wydobycia i zamykanie kopalń sprawiają, że tereny pogórnice są stopniowo przekazywane gminom. Przed oddaniem gruntów społecznościom lokalnym, przeprowadzane są działania związane z ich rekultywacją, prowadzoną w taki sposób, by mogły być one użytkowane zgodnie z planami gmin. Wiedząc, że wieloletnia eksploatacja węgla i innych surowców mineralnych powodowała dezintegrację górotworu ułatwiającą migrację gazów oraz skażenie promieniotwórcze środowiska, można postawić pytanie: czy na terenach pogórnich będzie można budować domy, bez obawy narażania mieszkańców na otrzymywanie podwyższonych dawek radonu i produktów jego rozpadu. Udzielenie właściwej odpowiedzi wymaga zbadania poziomu emisji radonu w obszarach pogórnich. Do tego celu najodpowiedniejszy jest pomiar współczynnika ekshalacji radonu. Współczynnik ten jest wielkością opisującą zdolność wydostawania się radonu ze skał, gruntów i materiałów budowlanych do powietrza, szczególnie powietrza atmosferycznego. Można go zdefiniować jako aktywność radonu przechodzącego do powietrza z jednostki powierzchni (gruntu, gleby) w jednostce czasu. Jednostką tak zdefiniowanego współczynnika ekshalacji jest $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Zazwyczaj używa się jednak podjednostki, czyli $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Zgodnie z doniesieniami, które można znaleźć w literaturze, wartość współczynnika ekshalacji w tzw. warunkach normalnych zmienia się w zakresie od 17 do 50 $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Wilkening, Clements, Stanley 1972; Colle i in. 1981; NCRP 1988; Porstendörfer 1991). W obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wartości współczynnika ekshalacji mierzone w obszarach o odmiennej budowie geologicznej, różniących się litologią, zaangażowaniem tektonicznym oraz stopniem skażeń promieniotwórczych (efekt działalności górniczej), wahają się od poniżej 1,1 do ponad 80 $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Chałupnik, Wysocka 2003; Wysocka 2009). Przykładowo Mazur (2008), prowadząc pomiary na poligonie badawczym w Krakowie, zmierzyła wartości przekraczające 300 $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Podwyższone, sięgające 400 $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ wartości współczynnika ekshalacji, zmierzono m.in. wokół zamkniętej kopalni węgla kamiennego w Słowenii (Jovanovic 2001). W obszarze rekultywowanym wokół nieczynnej kopalni uranu w północnej Australii, zaobserwowano znaczne wahania ekshalacji radonu, od około 100 do 6500 $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Bollhöfer i in. 2006). W Niemczech natomiast pomiary emisji radonu na terenach górniczych i pogórnich prowadzone są od ponad 20 lat (Dushe, Kummel, Schulz 2003). W ostatnim czasie zrealizowano wiele prac poświęconych problemowi podwyższonej emisji radonu w obszarach przemysłowych i poprzemysłowych. Zwrócono szczególną uwagę na tereny obecnej lub historycznej

eksploatacji surowców mineralnych, w tym węgla kamiennego, a także na tereny poddawane innym oddziaływaniom antropogenicznym (Sengupta i in. 2001; Ferry i in. 2002; Sun, Guo, Zhuo 2004; Sasaki, Gunji, Okuda 2007; Muhlar i in. 2008).

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ekshalacji radonu, prowadzonych w rejonie likwidowanego powierzchniowego osadnika wód kopalnianych.

2. POMIARY EKSHALACJI RADONU Z OSADÓW DENNYCH LIKWIDOWANEGO OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH

Pewne ilości naturalnych substancji promieniotwórczych były lub są nadal odprowadzane do osadników wraz z wodami dołowymi (Lebecka i in. 1994; Wysocka i in. 1988; Michalik i in. 2002). Likwidowanie osadników, a następnie rekultywacja ich terenów, może wiązać się z problemem podwyższonej emisji radonu z osadów dennych osuszanych osadników. Dotyczy to zwłaszcza tych kopalń, które odprowadzały na powierzchnię znaczne ładunki izotopów ^{226}Ra i ^{228}Ra . Ocena poziomu emisji radonu z osadów dennych jest istotnym elementem, definiującym sposób prowadzenia rekultywacji terenu dawnego osadnika. W przypadku podwyższonej ekshalacji radonu należy bowiem zaplanować takie uszczelnienie osadów, by zapobiec migracji i wnikiemu gazu do budynków zbudowanych (w przyszłości) na miejscu osadnika.

Pomiary wykonywano w granicach likwidowanego, a następnie zrehabilitowanego osadnika wód dołowych „Bojszowy”, należącego do kopalni węgla kamiennego „Piast”.

W latach 1980–2001 do osadnika „Bojszowy” były odprowadzane wody o podwyższonej promieniotwórczości naturalnej, odpompowywane z wyrobisk górniczych z dwóch kopalń „Piast” oraz „Czeczott”. Powierzchnia osadnika „Bojszowy” wynosiła 16 hektarów, a zgromadzone osady sięgały jednego metra grubości. Ładunek radu zrzuconego wraz z wodami do osadnika wynosił okresowo 120 MBq na dobę. Maksymalne zmierzone stężenie ^{226}Ra w zalegających na dnie osadach wynosiło $2000 \pm 60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, a ^{228}Ra – $4000 \pm 110 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Pomiary współczynnika ekshalacji radonu wykonywano w latach 2002–2004, w różnych warunkach atmosferycznych (Wysocka 2002, 2009). Wiosną 2002 r. rozpoczęto spuszczenie wody z osadnika do rzeki Gostynia, dopływu Wisły. Przez około półtora roku od spuszczenia wody z osadnika, osady denne pozostały nasiąknięte wodą. W związku z tym, nie można było prowadzić pomiarów stężeń radonu w powietrzu gruntowym w osadach. Ich nasycenie wodą uniemożliwiało bowiem pobranie próbki powietrza z odpowiedniej głębokości. Pomiar współczynnika ekshalacji jest, w przypadku terenów podmokłych, jedynym narzędziem pozwalającym na oszacowanie ryzyka wystąpienia wzmożonej emisji radonu.

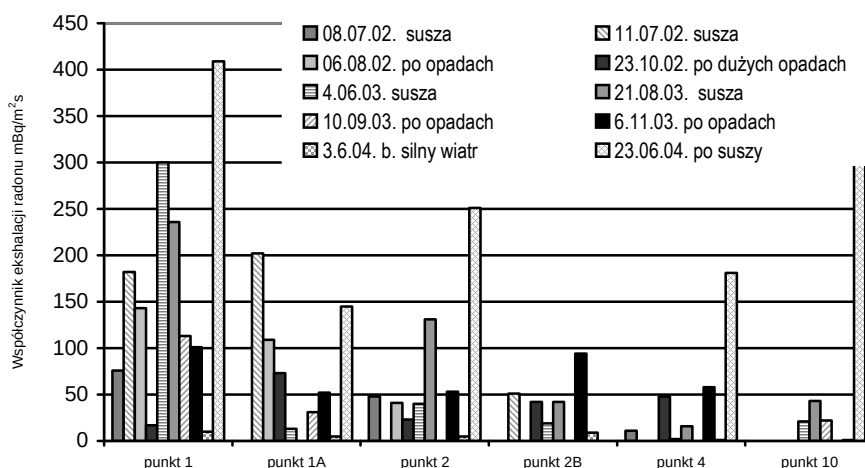
Pomiary rozpoczęto dopiero w lipcu 2002 r., po kilkutygodniowym okresie bezdeszczowym. Pierwszą serię pomiarową wykonano na niewielkim osuszonym obszarze blisko brzegu. Zmierzone wartości współczynnika ekshalacji wahały się od około 2,0 do ponad $70 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Kolejne pomiary, wykonane po tygodniu słonecznej, bezdeszczowej pogody pokazały znaczny wzrost ekshalacji radonu. Maksymalna zmierzona wartość wynosiła $160 \pm 28 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Pomiary powtarzano co dwa tygo-

dnie do ostatnich dni października 2002 r. W miarę upływu czasu obszar osuszonego dna ulegał poszerzeniu, co umożliwiło zwiększenie liczby punktów pomiarowych. Najwyższa wartość współczynnika ekshalacji zmierzona w pierwszym roku badań wynosiła $202 \pm 34 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Była zatem znacznie wyższa od wcześniej mierzonych wartości. Dla porównania, jego wartości mierzone na wychodniach różnych utworów geologicznych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, nie przekraczają $80 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Chałupnik, Wysocka 2003). Dodatkowo należy podkreślić, iż w trakcie prowadzenia pomiarów, osady z dna osadnika „Bojszowy” były bardzo wilgotne, a ekshalacja zachodziła wyłącznie z cienkiej warstwy przypowierzchniowej. Można było przypuszczać, że stopniowe wysychanie osadów doprowadzi do wzrostu ekshalacji radonu z osadnika. Mając to na uwadze, pomiary kontynuowano w sezonie wiosna – lato – jesień w roku następnym.

Pierwszy pomiar drugiej kampanii wykonano na początku czerwca 2003 r. Poza niewielkimi zagłębieniami, dno osadnika było wystarczająco osuszone, aby znacznie zwiększyć obszar pomiarów w porównaniu z rokiem poprzednim. Poziom wody w osadach uległ widocznemu obniżeniu, a emisja radonu zachodziła ze znacznie grubszej warstwy. Wyniki badań wykonanych po dłuższym okresie bezdeszczowym wykazały, że ekshalacja radonu w najbardziej wysuszonych miejscach osadnika przekracza wartości mierzone wcześniej. Dla przykładu można podać, iż w punkcie pomiarowym numer 1 współczynnik ekshalacji wynosił $302,0 \pm 49,6 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. W miejscach, w których dotychczas nie prowadzono pomiarów, również zaobserwowano wysokie wartości współczynnika ekshalacji, tj. $200,0 \pm 34 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ blisko wlotu wód dołowych; $50,0 \pm 9 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w punkcie numer 4, odległym od zrzutu wód o około 390 m. Kolejne pomiary pokazywały, że wysoka emisja radonu utrzymywała się nawet po okresach opadów, a mierzone współczynniki ekshalacji osiągały wartość $100 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Należy przypuszczać, że radon migrował ze stosunkowo grubej (20–30 cm) warstwy osuszonych osadów dennych i z łatwością przenikał do powietrza atmosferycznego. W rezultacie zaobserwowano wysokie wartości współczynnika ekshalacji zmierzone w trakcie okresów bezdeszczowych.

Przedostatni etap obserwacji zmian współczynnika ekshalacji osuszanego osadnika przypadł na wiosnę 2004 r. Pomiary prowadzono po opadach. Warstwa powierzchniowa osadu była wilgotna, a mimo to, we wszystkich punktach pomiarowych współczynniki ekshalacji radonu były wyższe, niż w latach ubiegłych. Warstwa osadu uległa osuszeniu, radon łatwo przemieszczał się między ziarnami mineralnymi, a następnie przenikał do powietrza atmosferycznego. Maksymalna wartość zmierzona w punkcie numer 1 wynosiła $409,0 \pm 68 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dla porównania, wartości współczynnika ekshalacji mierzone w sąsiedztwie osadnika, nie przekraczały $3,0 \pm 1 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dotychczas w żadnym innym poligonie badawczym nie stwierdzono tak intensywnej emisji radonu, jak w granicach likwidowanego osadnika „Bojszowy”.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów współczynników ekshalacji radonu z osadów dennych osadnika, w trakcie poszczególnych kampanii pomiarowych.



Rys. 1. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy”

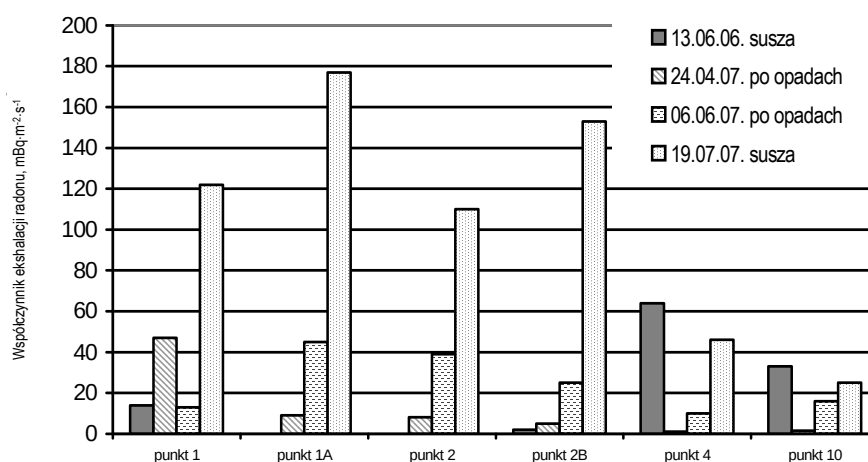
Fig. 1. Results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond

3. POMIARY EKSHALACJI RADONU W REJONIE OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH W TRAKCIE REKULTYWACJI

W 2006 r. osadnik „Bojszowy” został przygotowany do rekultywacji. Część jego powierzchni została zasypana pierwszą warstwą odpadów wydobywczych (wydobywcą masą skalną). W tym okresie rozpoczęto kolejną serię pomiarów emisji radonu. Zmierzone wartości współczynnika ekshalacji były niższe, niż mierzone podczas poprzednich kampanii pomiarowych (rys. 1). Najwyższa zanotowana w tym czasie wartość wynosiła $64,0 \pm 12 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. W roku następnym trzykrotnie powtarzano pomiary współczynnika ekshalacji. Jego wartości mierzone w trakcie kolejnych pomiarów wahały się w szerokim zakresie, od odpowiadających dolnemu limitowi detekcji, wynoszącemu $1,6 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ do $177 \pm 32 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Zmienność ekshalacji radonu należy wiązać z właściwościami fizycznymi warstwy przykrywającej osady denne osadnika: stopniem kompaktacji i uszczelnienia, wysychaniem, pojawianiem się spękań w schnącej warstwie osadów, a w rezultacie ponownym jego rozszczelnieniem. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów z lat 2006–2007. Jak zauważono, współczynnik ekshalacji nie osiągnął wtedy wartości maksymalnej, zmierzonej przed rozpoczęciem rekultywacji, tj. $409,0 \pm 68,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Niemniej widać, że proces izolowania osadów dennych, w taki sposób, by ograniczyć emisję radonu, był czasochłonny i wymagał dużej staranności od wykonawców. Stabilizowanie się warstw izolujących trwało kilka lat, a zmiany ekshalacji radonu jednoznacznie wskazywały, czy kolejny etap prac rekultywacyjnych był wystarczający dla zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego terenu.

Rekultywacja została przeprowadzona zgodnie z opracowanymi na zlecenie kopalni wytycznymi. Osady denne przykryto odpadami wydobywczymi z kopalni „Piast” z bieżącej produkcji (łupek i piaskowiec) w celu ich zagęszczenia i ustabilizowania całej powierzchni. Następnie wykonano warstwę podsypki z piasku gruboziarnistego i ułożo-

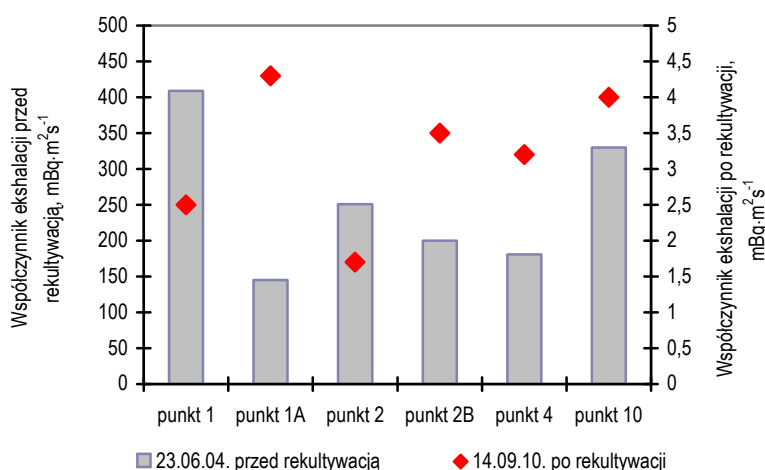
no sieć drenarską do odbioru wód opadowych, która jednocześnie pełniła rolę systemu kontrolno-wentylacyjnego dla zgromadzonych osadów. Kolejno wzmocniono uszczelnienie powierzchni następną warstwą ochronną odpowiednio zagęszczoną, wykonaną z kopalnianych odpadów wydobywczych o grubości jednego metra. Całość została następnie przykryta glebą, obsiana trawą i obsadzona specjalnie dobraną roślinnością. Po całkowitym zakończeniu rekultywacji wykonano повторно pomiary ekshalacji radonu w wybranych punktach pomiarowych. W celu sprawdzenia skuteczności wykonanych prac przeprowadzono pomiary współczynnika ekshalacji w punktach monitorowanych w trakcie osuszania osadnika. Wszystkie zmierzone wartości były bardzo niskie, wahały się w granicach od $1,7 \pm 1,1$ do $4,3 \pm 1,2$ $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Były porównywalne z wartościami mierzonymi na łące w sąsiedztwie osadnika. Na rysunku 3 porównano współczynniki ekshalacji z ostatniej kampanii pomiarowej przed zasypywaniem osadów dennymi warstwami odpadów i gleby, z wynikami badań z uszczelnionego osadnika. Zastosowano dwie skale, ponieważ współczynniki różnią się o dwa rzędy wielkości. Wyniki pomiarów potwierdziły zatem, że osad denny został skutecznie uszczelniony, a ekshalacja radonu ograniczona.



Rys. 2. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy” w trakcie prowadzenia prac rekultywacyjnych

Fig. 2. Results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond during ground reclamation

Pomiar współczynnika ekshalacji radonu jest dobrym narzędziem kontroli efektów wykonania rekultywacji. Prawidłowe przykrycie osadów, będących źródłem radonu, warstwą o niskiej przepuszczalności, ogranicza możliwości migracji gazu. Tym samym zlikwidowane lub co najmniej ograniczone zostało potencjalne zagrożenie radiologiczne, którego źródłem jest osad denny o podwyższonej promieniotwórczości, zalegający w rekultywowanym osadniku wód kopalnianych.



Rys. 3. Porównanie wyników pomiarów współczynnika ekshalacji radonu z osadnika „Bojszowy” przed i po rekultywacji; wartości współczynników ekshalacji po rekultywacji są około 100 razy mniejsze niż zmierzone wcześniej

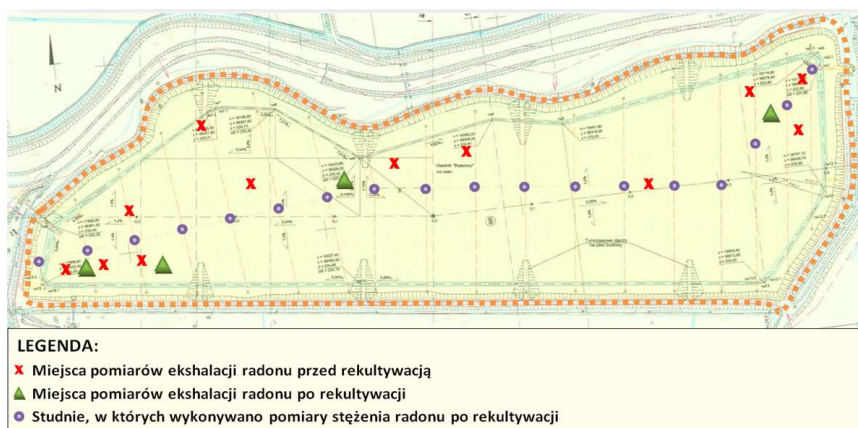
Fig. 3. Comparison of results of radon exhalation rate measurements in the “Bojszowy” settling pond before and after reclamation. The ratio of values measured before and after reclamation is higher than 100:1

4. POMIARY STĘŻENIA RADONU W POWIETRZU W STUDZIENKACH DRENAŻOWYCH ZREKULTYWOWANEGO OSADNIKA WÓD DOŁOWYCH

W celu sprawdzenia, jakie efekty może spowodować naruszenie lub zniszczenie warstwy uszczelniającej osady denne, wykonano serię pomiarów stężenia radonu w powietrzu w studzienkach drenażowych, których lokalizację przedstawiono na rysunku 4. Detektory śladowe umieszczano w studzienkach kilka centymetrów nad poziomem gruntu. Czas ekspozycji detektorów wynosił ponad dwa miesiące, a integrujący charakter pomiaru pokazał stężenie radonu uśrednione za czas ekspozycji. Zmierzone stężenie radonu wielokrotnie przekraczało średnią wartość pomiarów na otwartym powietrzu, która według Nazaroffa wynosi około $8 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (Nazaroff, Nero eds. 1988). Przekraczało także wartość referencyjną dla budynków mieszkalnych, wynoszącą $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (ICRP 2008). Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Najwyższe stężenie radonu w studzience drenażowej wynosiło ponad $4100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Dzieje się tak, gdyż wymiana powietrza w studzienkach jest bardzo ograniczona, wskutek czego mierzone stężenie radonu jest podwyższone w stosunku do wartości obserwowanych na otwartym powietrzu.

Wyżej przedstawione zjawisko powoduje, że plany wykorzystania zrekultywowanych terenów pogórnich muszą uwzględniać potencjalne zagrożenia radiacyjne dla użytkowników i środowiska. W granicach omawianego zlikwidowanego osadnika wód kopalnianych nigdy nie powinny być budowane budynki mieszkalne. Wszelkie nieszczelności w podłogach, fundamentach, wokół instalacji, mogłyby spowodować

wnikanie do wnętrza radonu o stężeniu promieniotwórczym, porównywalnym do mierzonego w studzienkach drenażowych. Skutkiem wnikania gazu mogą być podwyższone stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych, co narażałoby mieszkańców na otrzymywanie większej dawki radonu i produktów jego rozpadu. Nie wskazane jest także zakładanie na tym terenie placów zabaw, nie można bowiem założyć, że uszczelnienie osadów dennych zawsze będzie w dobrym stanie technicznym. Migracja radonu przez pęknięcia i rozszczelnienia, następnie jego ekshalacja z powierzchni, może być źródłem zagrożenia radiacyjnego dla bawiących się w piaskownicy dzieci. Jednak na większych wysokościach radon rozcieńczy się w powietrzu atmosferycznym i nie będzie stanowił zagrożenia.



Rys. 4. Teren po osadniku „Bojszowy” – lokalizacja pomiarów ekshalacji radonu z osadów dennych przed rekultywacją i po rekultywacji oraz stężenia radonu mierzonego w studniach po rekultywacji

Fig. 4. The sketch plan of the “Bojszowy” settling pond with location of sampling points

Tabela 1. Wyniki pomiarów radonu w studzienkach zrekultywowanego osadnika wód dołowych „Bojszowy”

Punkt pomiarowy	Czas ekspozycji	Stężenie radonu w studniach drenażowych po rekultywacji, Bq·m ⁻³
1	16.11.2010–19.01.2011	
2		170 ± 60
3		1170 ± 60
4		1540 ± 240
5		3180 ± 320
6		3270 ± 330
7		2150 ± 260
8		4170 ± 530
9		1660 ± 240
11		brak detektora
12		brak detektora
13		4860 ± 560
14		4620 ± 550
15		3080 ± 300
Średnia wartość mierzona na otwartym powietrzu (Nazaroff, Nero eds. 1988), zalecana wartość referencyjna dla domów mieszkalnych (ICRP 2008)		8 200

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podczas rekultywacji nieczynnych terenów kopalnianych może pojawić się wiele problemów; jednym z nich jest możliwość wzmożonej ekshalacji radonu. Sytuacje niezwykle utrudniają przypadki, gdy do osadników wód dołowych odprowadzono wody o podwyższonej promieniotwórczości. Jeżeli wytrącone i zdeponowane tam osady charakteryzują się podwyższonymi stężeniami radu, wówczas ekshalacja radonu może mieć znaczący wpływ na sposób i możliwości wykorzystania takiego terenu. Mimo że właściwie przeprowadzona rekultywacja ogranicza ekshalację radonu z powierzchniowej warstwy gruntu do wartości tła naturalnego, to jednak w powietrzu glebowym stężenie radonu może osiągać wartości tysięcy $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Opracowując plany zagospodarowania terenów pogórnich należy uwzględnić możliwość wzrostu ryzyka radonowego badanych obszarów.

Badania wykonane w rejonie likwidowanego osadnika „Bojszowy” pokazały, że pomiar współczynnika ekshalacji radonu jest dobrym wskaźnikiem oceny efektywności wykonywania rekultywacji terenów, na których były gromadzone osady o podwyższonej zawartości izotopów radu. Potwierdzono, że rekultywacja była wykonana poprawnie, mimo to teren nigdy nie powinien być wykorzystany jako budowlany.

Podziękowania

Praca była częściowo finansowana przez Norwegię w ramach grantu Norweskiego Mechanizmu Finansowego i stanowi etap projektu PORANO (Survey of the impact of enhanced natural radioactivity on human and natural environments), nr kontraktu PNRF-192-AI-1/07.

Acknowledgments

This work was partly supported by a grant from Norway through the Norwegian Financial Mechanism and forms part of PORANO project (Survey of the impact of enhanced natural radioactivity on human and natural environments), contract no. PNRF-192-AI-1/07.

Literatura

1. Bollhöfer A., Storm J., Martin P., Tims S. (2006): Geographic Variability in Radon Exhalation at a Rehabilitated Uranium Mine in the Northern Territory. *Environmental Monitoring Assessment* Vol. 114, s. 313–317.
2. Chałupnik S., Wysocka M. (2003): Measurements of radon exhalation from soil – development of the method and preliminary results. *Journal of Mining Science* Vol. 39(2), s. 199–206.
3. Colle R., Rubin R.J., Knab L.I., Hutchins T.M.R. (1981): Radon transport through and exhalation from building materials. National Bureau of Standards Technical Note 1139. Springfield, Virginia, National Technical Information Service.
4. Dushe C., Kummel M., Schulz H. (2003): Investigations of enhanced outdoor radon concentration in Johanngeorgenstadt (Saxony). *Health Physics* Vol. 84(5), s. 655–659.
5. Ferry C., Richon P., Beneito P., Robe M.-C. (2002): Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium tailings: transient radon flux analysis. *Journal of Environmental Radioactivity* Vol. 63, s. 49–64.
6. ICRP (2008): International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. ICRP Publ. 103. Elsevier.

7. Jovanovic P. (2001): Radon exhalation rate measurements on and around the premises of a former coal mine. *Science of the Total Environment* Vol. 272(1-3), s. 147–151.
8. Lebecka J., Chałupnik S., Michalik B., Wysocka M., Skubacz K., Mielnikow A. (1994): Radioactivity of Mine Waters in Upper Silesian Coal Basin and its influence on natural environment. *Proc. of 5th Int. Mine Water Congress*, Quorn Repro Ltd., Loughborough, England.
9. Mazur J. (2008): Dynamika procesu ekshalacji radonu z gruntu, a parametry meteorologiczne i własności gleby. Raport nr 2014/AP Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk. Kraków (praca doktorska).
10. Michalik B., Chałupnik S., Wysocka M., Skubacz K. (2002): Ecological problems of the coal industry and the ways to solve them. *Journal of Mining Science* Vol. 38, No. 6, s. 601–607.
11. Muhlar A.K., Kumar R., Mishra M., Sengupta D., Prasad R. (2008): An investigation of radon exhalation doses in coal and fly ashes samples. *Applied Radiation and Isotopes* Vol. 66, s. 401–406.
12. Nazaroff W.W., Nero A.V., eds. (1988): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc.
13. NCRP (1988): Report No. 97 National Council on Radiation Protection Measurements, Bethesda, USA.
14. Porstendörfer J. (1991): Radon and toron and their decay products. *Proceedings of the 5th International Conference on Natural Radiation Environment*, Salzburg, Austria.
15. Sasaki T., Gunji Y., Okuda T. (2007): Suppression methods of radon emanation from phosphorous fertiliser and diatomaceous earth. *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 124, No. 2, s. 75–84.
16. Sengupta D., Kumar R., Singh A.K., Prasad R. (2001): Radon exhalation and radiometric prospecting on rocks associated with Cu-U mineralization in Singhbhum sher zone, Bihar. *Applied Radiation and Isotopes* Vol. 55, s. 889–894.
17. Sun K., Guo Q., Zhuo W. (2004): Feasibility for mapping radon exhalation rate from soil in China. *Journal of Nuclear Science and Technology* Vol. 41, No. 1, s. 86–90.
18. Wilkening M.H., Clements W.E., Stanley D. (1972): Radon-222 flux measurements in widely separated regions. W: *The natural radiation environment II*, Ed. John A.S. Adams. Houston, Texas, Rice University, s. 717–730.
19. WHO (2009): World Health Organization, *Handbook on Indoor Radon*.
20. Wysocka M. (2002): Zależność poziomu stężeń radonu od warunków geologiczno-górnictwowych na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 3.
21. Wysocka M. (2009): Emisja radonu w obszarze Górnego Śląska. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* nr 2, s. 37–46.
22. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S., Skubacz K., Lebecka J. (1988): Zachowanie się w środowisku naturalnym radu odprowadzonego z kopalń węgla z wodami i osadami. *Krajowa Konferencja Radiochemii i Chemii Jądrowej „W Stulecie Odkrycia Polonu i Radu”*. Warszawa, ICHTJ.