

Badania nowej generacji komórek opartych na detektorach NDIR do pomiaru metanu i dwutlenku węgla

W pracy opisano najnowsze osiągnięcia w konstruowaniu nowej generacji komórek pomiarowych gazów opartych na zjawisku absorpcji promieniowania podczerwonego. Przedstawiono wyniki prowadzonych badań, krótki przegląd dotychczasowych rozwiązań rynkowych i dalszy kierunek prac.

1. WSTĘP

Jednym z istotnych problemów, związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa załóg podziemnych zakładów wydobywczych, jest pomiar stężeń gazów wybuchowych i trujących, które mogą pojawić się w wyrobiskach i stworzyć zagrożenie dla pracowników i ruchu zakładu górniczego. Do tego celu stosowane są w kopalniach systemy automatycznego pomiaru i rejestracji stężeń gazów, głównie: metanu, tlenu węgla i dwutlenku węgla. Systemy te, działające w oparciu o dane uzyskiwane z czujników rozmieszczonych w podziemiu kopalni, dokonują ciągłego pomiaru stężeń gazów i dostarczają informacje do systemu. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych stężeń następuje wyłączenie energii elektrycznej lub wycofanie załogi z zagrożonego rejonu kopalni. Szacuje się, że w polskich kopalniach pracuje obecnie kilkanaście tysięcy różnego typu czujników gazów.

W chwili obecnej, do pomiaru stężenia metanu, powszechnie stosowane są przetworniki pomiarowe oparte na zasadzie katalitycznego spalania. Posiadają one szereg wad, utrudniających ich stosowanie:

- stosunkowo duży pobór mocy, utrudniający rozproszone, iskrobezpieczne zasilanie czujników,
- mała stabilność wskazań, powodująca konieczność częstych kontroli i kalibracji,

- wrażliwość na niektóre substancje chemiczne, powodujące czasową lub nawet nieodwracalną utratę właściwości metrologicznych [1-2].

W ciągu ostatnich kilku lat pojawiły się na rynku rozwiązania przetworników pomiarowych do pomiaru stężenia metanu i dwutlenku węgla oparte na zasadzie pochłaniania promieniowania podczerwonego. Przetworniki te posiadają, w porównaniu z przetwornikami katalitycznymi, pewne zalety: są znacznie bardziej selektywne i odporne na szkodliwe wpływy różnych substancji chemicznych [3]. Ich podstawowymi wadami są natomiast:

- stosunkowo duży pobór mocy (rzędu 350 mW), utrudniający ich stosowanie w górniczych urządzeniach iskrobezpiecznych, zasilanych zdalnie lub bateryjnie. Wynika to z zastosowania w tych przetwornikach mikrożarówek jako źródeł promieniowania podczerwonego. Zastosowanie mikrożarówek powoduje również problemy z wykonaniem przetworników zgodnie z wymogami norm dla urządzeń przeciwybuchowych (iskrobezpiecznych), co jest niezbędne w przypadku urządzeń przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej,
- długi czas odpowiedzi (> 30 s), praktycznie uniemożliwiający stosowanie ich w górniczych przyrządach gazometrycznych, dla których jednym z podstawowych wymagań jest czas reakcji na skokowy wzrost stężenia gazu nie przekraczający kilku sekund [4].

W tabeli 1 zestawiono obecnie produkowane detektory oraz ich podstawowe parametry.

Tabela 1

Zestawienie detektorów typu NDIR nieselektywnych

Producent	Oznaczenie	Gaz	Pobór mocy	Czas T90	Stopień ochrony przeciwwybuchowej
E2V	IR22BD, IR23BD	CH ₄	180 mW	<20 s	I M 1 EEx ia I
E2V	IR21BD	CO ₂	180 mW	<20 s	I M 1 EEx ia I
Dynament	MSH-P-CO2/x	CO ₂	225 mW	<30 s	I M2 EExd I
Dynament	MSH-P-HC/x	CH ₄	225 mW	<30 s	I M2 EExd I
City Technology	IRCel [®] CO2	CO ₂	100 mW	<35 s	EExdI/IIC T4
City Technology	IRCel [®] CH4	CH ₄	100 mW	<35 s	EExdI/IIC T4

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Zjawisko absorpcji promieniowania polega na wzajemnym oddziaływaniu promieniowania elektromagnetycznego z substancjami chemicznymi. Rodzaj oddziaływania jest ściśle uzależniony od chemicznych właściwości substancji. Przeważnie dla każdej molekuly są ściśle określone długości fal przez nią absorbowane. Częstki wykazujące właściwości pochłaniania określonych długości fal promieniowania elektromagnetycznego można charakteryzować przez dwa parametry absorpcji:

- długość fali, dla których występuje maksimum absorpcji,
- natężenie absorpcji dla tych długości fali.

Jedno z podstawowych twierdzeń spektrofotometrii absorpcyjnej mówi, że absorpcja promieniowania monochromatycznego jest proporcjonalna do stężenia roztworu i do grubości warstwy pochłaniającej. Prawo to zwane jest prawem Beera-Waltera lub Lamberta-Beera [3,4,6] i wyraża się następującym wzorem:

$$I = I_0 \cdot e^{-kl} \quad (1)$$

gdzie:

I – natężenie wiązki promieniowania po przejściu przez warstwę absorpcyjną,

I_0 – pierwotne natężenie wiązki promieniowania,

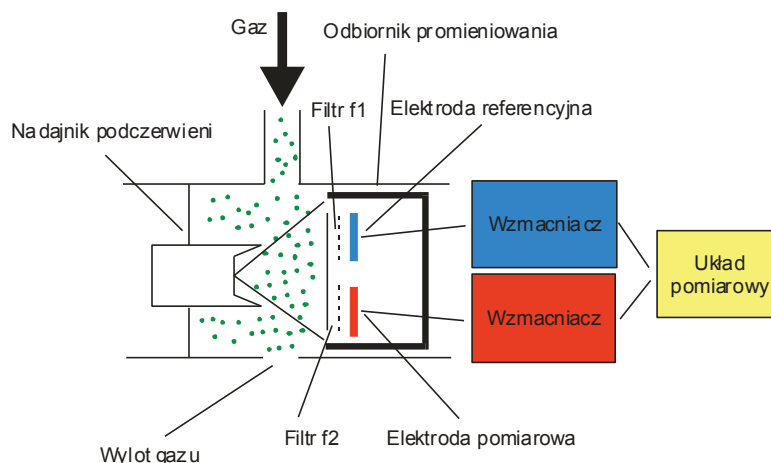
k – stała charakteryzująca zdolność pochłaniania danego ośrodka,

l – grubość warstwy absorbującej promieniowanie.

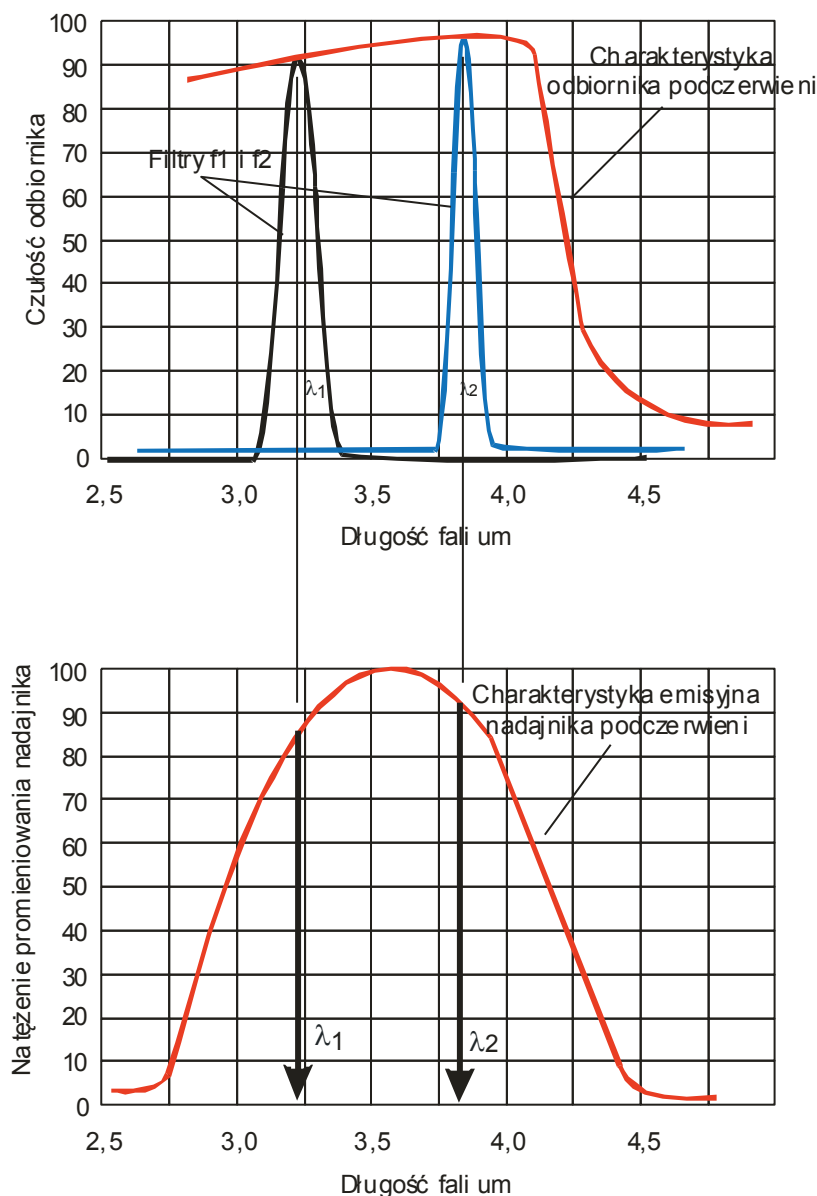
Zarówno dwutlenek węgla jak i metan charakteryzują się kilkoma pasmami pochłaniania leżącymi w bliskiej podczerwieni. Ze względu na łatwość realizacji elementów półprzewodnikowych oraz filtrów, w detektorach najczęściej wykorzystuje się pasmo 3,39 μm dla metanu i 4,3 μm dla dwutlenku węgla [5-8].

3. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA DETEKTORÓW NDIR

Budowę i zasadę działania detektora gazu pracującego na zasadzie pochłaniania promieniowania podczerwonego przedstawiono na rys. 1. Promieniowanie podczerwone emitowane przez źródło przechodzi przez komorę wypełnioną badanym gazem i dociera do dwóch detektorów wyposażonych w optyczne filtry wąskopasmowe f_1 i f_2 .



Rys. 1. Budowa detektora na podczerwień



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki fotoelementów

Dla metanu detektor posiada filtr f_1 przepuszczający promieniowanie o długości fali $3,8 \mu\text{m}$, a filtr f_2 – $3,2 \mu\text{m}$. Zjawisko pochłaniania promieniowania podczerwonego przez metan występuje dla długości fali $3,39 \mu\text{m}$. Przy długości fali $3,8 \mu\text{m}$ zjawisko absorpcji nie występuje, dzięki czemu uzyskujemy sygnał referencyjny, na podstawie którego można minimalizować wpływ zmian temperatury, niestabilności napięcia zasilania oraz wpływ innych zakłóceń na wyniki pomiarów. Długość fali dla sygnału referencyjnego wybiera się tak, aby leżała poza pasmami pochłaniania innych gazów oraz pary wodnej.

Dla dwutlenku węgla odbiornik długości fali sygnału referencyjnego i pomiarowego wynoszą odpowiednio $3,9 \mu\text{m}$ i $4,2 \mu\text{m}$.

Źródło promieniowania podczerwonego powinno emitować promieniowanie w zakresie pokrywającym

pasmo pomiarowe i referencyjne wybrane dla danego gazu. Na rys. 2 przedstawiono zależności jakie zachodzą pomiędzy charakterystykami filtrów, odbiornika oraz źródła promieniowania, aby pomiar stężenia dla danego gazu był możliwy.

Detektory gazów zbudowane wg wyżej przedstawionej zasady określa się wspólnym akronimem NDIR (ang. *Non-Dispersive Infrared Radiation*).

4. NOWE ROZWIĄZANIE W ZAKRESIE CZUJNIKÓW NDIR

W październiku 2008 r. zakończył się prowadzony od 2007 r. w centrum EMAG projekt badawczy nr R09 02202 pt. „Badanie możliwości zastosowania

metody absorpcji promieniowania podczerwonego w górniczych analizatorach gazów”, finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Efektem tego projektu są modele laboratoryjne przetworników pomiarowych do pomiaru stężenia metanu i dwutlenku węgla, wykorzystujące jako źródło podczerwieni diody LED w miejsce stosowanych do tej pory mikrożarówek. Wyniki przeprowadzonych w ramach projektu badań laboratoryjnych pozwalają na stwierdzenie, że możliwe jest skonstruowanie prototypów przyrządów wykorzystujących przetworniki pomiarowe, pracujące na zasadzie pochłaniania podczerwieni, oparte wyłącznie na elementach półprzewodnikowych. Projekt prowadzony był we współpracy z firmą RECS EUROPE, posiadającą niezbędne doświadczenie i technologię w zakresie produkcji specjalistycznych elementów optoelektronicznych (diod LED i fotodetektorów na odpowiednie zakresy widma), a także w konstrukcji układów optycznych czujników gazów.

W pierwszych wersjach komór (rys. 3) wykorzystano prosty układ optyczny złożony z jednego lustra oraz nadajnika i odbiornika. Wyposażone były w interfejs cyfrowy, układ sterujący pracą nadajnika i mikroprocesor realizujący równania kompensacyjne. Podczas badań laboratoryjnych uzyskano bardzo obiecujące wyniki; komory o tej konstrukcji charakteryzowały się bardzo dobrą stabilnością pomiarów w czasie i ze zmianą temperatury, dobrą powtarzalnością pomiarów i liniowością. Komory pobierały energię poniżej 35 mW, co jest wartością prawie trzykrotnie mniejszą od najlepszych detektorów tego typu dostępnych na rynku. Sygnał wyjściowy był skompensowany termicznie z uwzględnieniem współczynników kalibracyjnych. Parametrem, który postanowiono poddać korekcji był czas odpowiedzi T90 który dla komory o tej konstrukcji wynosił powyżej 30 s. Jest to wartość porównywalna z czasami osiąganymi przez komory innych producentów, jednak nie może w żadnym stopniu konkurować z czujnikami metanu opartymi o pellistory, gdzie czas odpowiedzi wynosi poniżej 6 s.



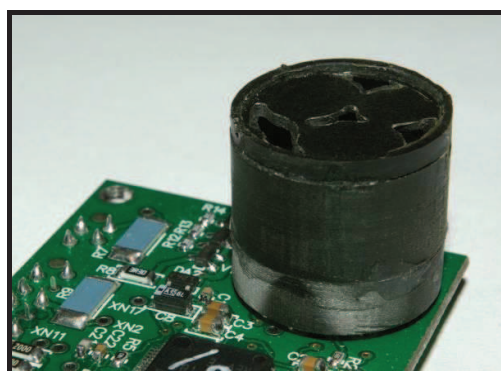
Rys. 3. Komora do pomiaru metanu

W celu skrócenia czasu odpowiedzi została zaproponowana zmiana konstrukcji mechanicznej (rys. 4). Przy zachowaniu tej samej długości drogi optycznej zredukowano wymiary o ponad 50% w stosunku do pierwszej wersji komory, tym samym zmalała objętość gazu potrzebnego do wypełnienia komory.



Rys. 4. Konstrukcja komory o skróconym czasie odpowiedzi

Komora zbudowana jest z układu pięciu lusterek i pozwala na uzyskanie czasu odpowiedzi T90 poniżej 10 s. Poziom zapotrzebowania energetycznego pozostał na dotychczasowym poziomie. Skomplikowany układ optyczny prowadzi do pogorszenia stabilności wyników. Niewielkie naprężenia mechaniczne, mogące powstawać np. przy zmianach temperatury komory wywoływanych zmianami temperatury otoczenia lub nagrzewaniem się lusterek i elementów elektronicznych, powodują odchylenie promieniowanej wiązki. Odchylenie to jest zwielokrotnione przez odbicie promieniowania od lusterek, co w efekcie prowadzi do niestabilności uzyskiwanych wyników.

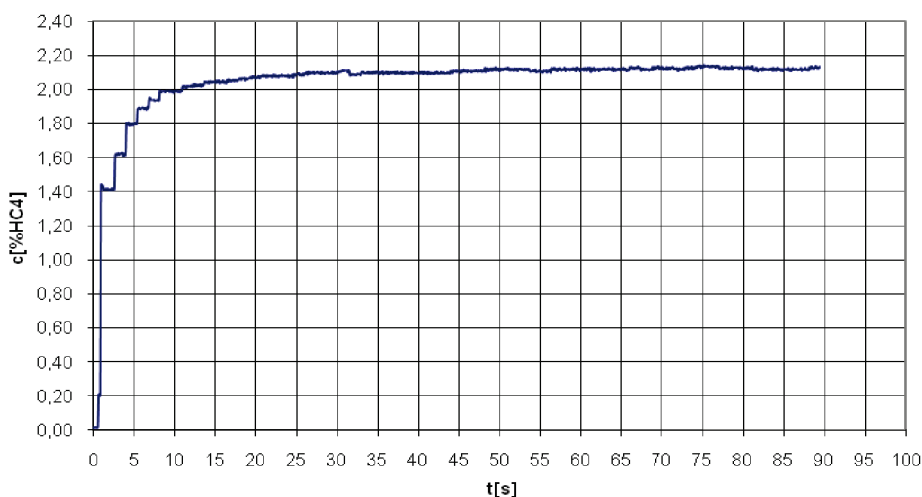


Rys. 5. Komora do pomiaru metanu – (wersja druga)

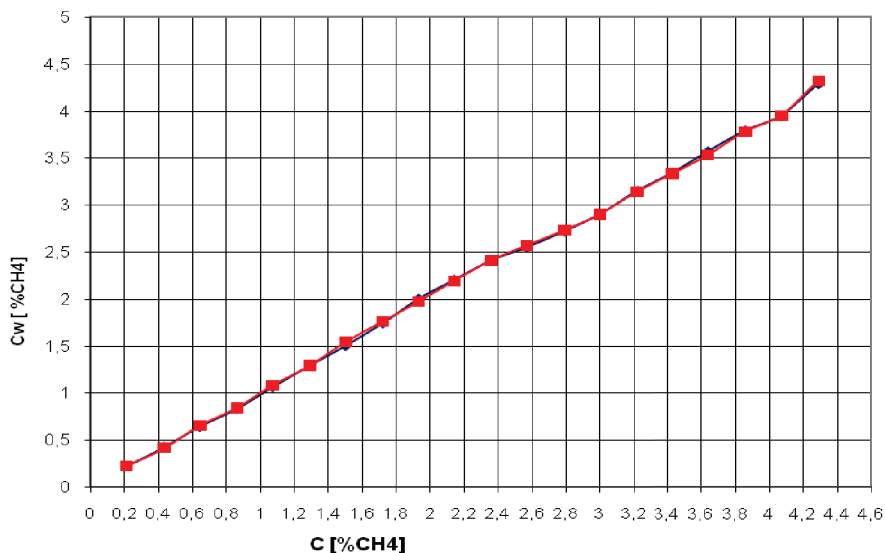
Na rys. 5 przedstawiono układ elektroniczny z komorą do pomiaru metanu o krótkim czasie odpowiedzi. Przedstawiony model pozwala na przeprowadzenie badań mających na celu ustalenie czy zapropono-

wana konstrukcja wykonana z tworzywa sztucznego umożliwi uzyskanie wymaganych czasów odpowiedzi. Uzyskano czasy odpowiedzi od 5 do 6,8 s, co jest wartościami porównywalnymi z komorami pelistorowymi. W kolejnej wersji komora będzie wykonana z materiału o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej, co powinno w znacznym stopniu poprawić

stabilność pomiarów. Ponadto będzie wyposażona w filtr hydrofobowy i spiek dla zapewnienia odpowiedniego stopnia ochrony IP. Zakłada się, że zastosowanie filtrów spowoduje wydłużenie czasu odpowiedzi o około 2-3 s. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki prowadzonych badań dla komory do pomiaru CH_4 i CO_2 .

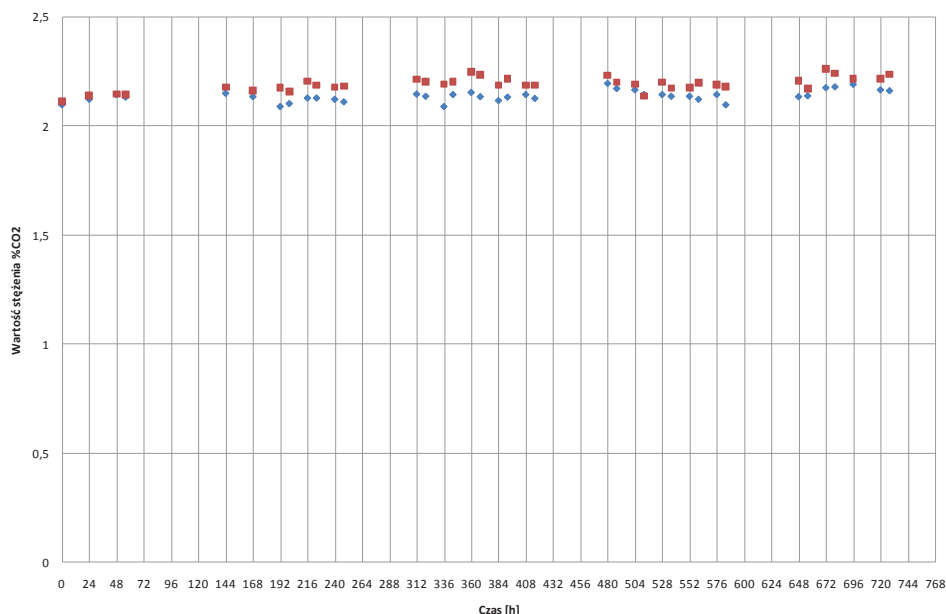


Rys. 6. Pomiar czasu odpowiedzi T90 dla komory CH_4 – (wersja druga)



Cw - stężenie wskazywane przez detektor IR
C - stężenie mieszanki wzorcowej

Rys. 7. Sprawdzanie liniowości dla komory CH_4 – (wersja druga)



Rys. 8. Sprawdzanie dryftu długookresowego dla komory CO₂

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Maksymalny błąd przy sprawdzaniu liniowości komory wyniósł 0,07% CH₄ przy stężeniu mieszanki 2,2% CH₄, taki sam błąd odnotowano przy sprawdzaniu powtarzalności pomiarów. Dryft termiczny komory metanowej wykonanej w wersji z pojedynczym lustrem po zastosowaniu kompensacji temperaturowej wyniósł 0,18% CH₄.

EMAG wraz z firmą RECS EUROPE nadal prowadzą prace nad udoskonaleniem konstrukcji mechanicznej komór oraz algorytmów obliczeniowych. Analiza układów elektronicznych pozwala założyć, że komory będą urządzeniami kategorii MI i będą posiadać cechę EEx ia I wg wymagań norm PN-EN 50303, PN-EN 60079-0, PN-EN 60079-11, co umożliwi ich pracę w dowolnej koncentracji metanu.

Literatura

1. Trzcionka S.: Selektowny pomiar stężeń składników kopalnianych gazów pożarowych z wykorzystaniem metod przetwarzania sygnałów czujników gazometrycznych. Rozprawa doktorska, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2000.
2. Kasprzyczak L., Cuber J., Maślankiewicz G.: Katalityczne i termokonduktometryczne czujniki stężenia metanu - zasada działania, wymagania i badania. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2008, nr 2/454, ss. 32-39.
3. Kasprzyczak L., Krzykowski D., Mirek G.: Pomiary stężeń trujących i wybuchowych gazów przy użyciu mobilnego robota górnictwa w atmosferach niskotlenowych o dużej wilgotności. Materiały konferencyjne EMTECH 2009 „Zasilanie, informatyka i automatyka w przemyśle wydobywczym – Innowacyjność i bezpieczeństwo”, Ossa 10-13 maja 2009, ss.115-121.
4. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. Warszawa 1970.
5. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 28.06.2002 r. „w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych”. Dz. U. Nr 139, poz. 1169 oraz z 2006 r. Nr 124, poz. 863.
6. www.e2v.com
7. www.citytech.com
8. www.intlsensor.com

Recenzent: prof. dr hab. inż. Jerzy Frączek



Pograżeni w głębokim smutku

składamy najszczersze kondolencje Rodzinom oraz Bliskim Górników

zmarłych w wyniku katastrofy w kopalni „Wujek-Śląsk”.

Łączmy się z Wami w bólu i modlitwie za Tych,

którzy odeszli na wieczną szychbę.

Redakcja