

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICTWO I ŚRODOWISKO

MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK

3



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2005

Rada Programowa: *prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Joanna Pinińska, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański*

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: *prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, prof. dr hab. inż. Jan Hankus, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, doc. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rulka, prof. dr hab. Jerzy Sablik, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz*

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redakcja wydawnicza i korekta

Ewa Gliwa

Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Barbara Jarosz

Skład i łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Nakład 100 egz.

Adres Redakcji:

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych

Głównego Instytutu Górnictwa, 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1

tel. (0-32) 259-24-03, 259-24-04, 259-24-05

fax 032/2592774

e-mail: m.kusmirek@gig.katowice.pl

SPIS TREŚCI

JUSTYNA GIBASZEWSKA

Zapobieganie poważnym awariom przemysłowym w zakładach generujących odpady niebezpieczne	5
Prevention of serious industrial damages in institutions generating dangerous waste materials	

PAWEŁ PALAMARCZUK, JAN KONIECZYŃSKI

Ekologiczne walory stosowania kotłów fluidalnych w sektorze komunalnym	13
Ecological features of using boilers with fluidized combustion bed in municipal sector	

OLGA KLEMCZAK

Ograniczanie niskiej emisji na przykładzie miasta Zabrze	25
Limiting low emission on an example of city Zabrze	

MAREK ROTKEGEL, SŁAWOMIR H. BOCK, MARCIN SKUPLIK

Komputerowe wspomaganie projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń. Możliwości i sposoby korzystania z biblioteki typowych elementów	39
Computer-aided designing of road mine working supports and junctions. Possibilities and manners of profiting from a library of typical elements	

GRZEGORZ MUTKE, JACEK CHODACKI

Zastosowanie płytkiego profilowania elektromagnetycznego do rozwiązywania zagadnień inżynierskich i środowiskowych w przypowierzchniowych warstwach podłoża	55
Use of shallow electromagnetic prospecting to solving engineer and environmental problems in subsoil layers	

EUGENIUSZ KRAUSE

Profilaktyka w pokładach metanowych zagrożonych sejsmicznie	65
Coal seams methane protection in seismic hazardous conditions	

LEOKADIA RÓG

Promieniotwórczość naturalna węgla kamiennych i frakcji gęstościowych węgla o zróżnicowanej budowie petrograficznej i chemicznej	81
Natural radioactivity of hard coals and coal density fractions of differentiated petrografical and chemical construction	

KRZYSZTOF STAŃCZYK, KRZYSZTOF GOGOLA, ANDRZEJ BAJERSKI

Analiza możliwości upraw roślin energetycznych na terenach zdegradowanych na przykładzie wierzby wiciowej	103
Plantation of energy willow on demoted post coalmine area	

ANDRZEJ STANIEK

Metoda identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych w górotworze	111
Method for identification of continuity of resin layer of rock bolts	

*Justyna Gibaszewska**

ZAPOBIEGANIE POWAŻNYM AWARIOM PRZEMYSŁOWYM W ZAKŁADACH GENERUJĄCYCH ODPADY NIEBEZPIECZNE

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono dyrektywy Wspólnoty Europejskiej w sprawie zagrożenia awariami przemysłowymi z udziałem substancji niebezpiecznych: dyrektywę SEVESO I, II oraz dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2003/105/WE. Opisano zasadę oceny dopuszczalnego poziomu ryzyka ALARP, wyszczególniając trzy jej obszary. Zwrócono uwagę na kontrolę ryzyka awarii przemysłowych. Określono kierunki prac nad wyznaczeniem poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa dla zakładów zaliczonych do ZZR i ZDR, zgodnie z normą PN-EN 61508.

Prevention of serious industrial damages in institutions generating dangerous waste materials

Abstract

In the work the following European Union directives concerning the threat of industrial damages with participation of dangerous substances were presented: Directive SEVESO I and II, and 2003/105/WE Directive of Parliament and Council of Europe. A rule of admissible level of risk ALARP estimation was described specifying its three areas. Special attention was paid to inspection of industrial damages' risk. The directions of works were qualified toward a determination of levels of safety inviolability for institutions numbered among ZZR and ZDR, in accordance with norm PN-EN 61508.

WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój polskiego przemysłu chemicznego może powodować zwiększone ryzyko wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. W trakcie różnorodnych procesów technologicznych są wytwarzane i przerabiane ogromne ilości substancji niebezpiecznych¹⁾. Substancje te, mimo stosowania przez zakład określonych środków bezpieczeństwa, mogą zostać uwolnione w dużych ilościach i przedostać się do otoczenia. W takiej sytuacji powstaje realne zagrożenie negatywnego ich oddziaływania na zdrowie i życie ludzi oraz środowisko. Mogą także powstać straty materialne. Skutki uwolnienia tych substancji w wyniku niekontrolowanego przebiegu procesu technologicznego, mogą obejmować daną instalację, ale również mogą objąć obszar otaczający zakład bądź nawet mieć oddziaływanie transgraniczne. Zdarzenie to, nazywane poważną awarią przemysłową, może powstać w wyniku przyczyn we-

* Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach.

¹⁾ Zgodnie z Ustawą z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach chemicznych (Dz. U. Nr 11, poz. 84) substancjami niebezpiecznymi są substancje wybuchowe, utleniające, łatwo palne, toksyczne, szkodliwe, żrące, drażniące, uczulające oraz rakotwórcze, mutagenne i substancje niebezpieczne dla środowiska.

wewnętrznych w zakładzie, np. zaburzeń procesowych awarii mechanicznych i technicznych czy błędów w systemie zarządzania, a także z przyczyn zewnętrznych, do których można zaliczyć, między innymi narastające ekstremalne zjawiska przyrodnicze, efekt domina²⁾ czy terroryzm.

Impulsem do powstania unijnego prawodawstwa dotyczącego przeciwdziałania poważnym awariom przemysłowym była katastrofa we włoskim mieście Seveso koło Mediolanu, gdzie 10 lipca 1976 roku w wyniku utraty szczelności reaktora przedostało się do atmosfery około 2 kilogramów dioksyn. Straty, będące następstwem wybuchu, określono jako ogromne – zarówno dla środowiska: skażenie powietrza, powierzchni ziemi, wód gruntowych i powierzchniowych, jak również dla ludności – rannych zostało bowiem około 700 osób, a ewakuowano 5000 (Zapobieganie stratom... 2000, s. 26). Pierwszą dyrektywą dotyczącą zapobieganiu awariom przemysłowym była dyrektywa Rady 82/105/EWG z dnia 24 czerwca 1984 r. w sprawie zagrożenia poważnymi awariami przez niektóre rodzaje działalności przemysłowej, zwana dyrektywą SEVESO I (Dyrektywa Rady... 1984).

Analiza przebiegu i próba oceny skutków awarii, które wydarzyły się w kolejnych latach (np. Bhopal w środkowych Indiach, 1984 r., gdzie doszło do najtragiczniejszej chemicznej katastrofy przemysłowej – w wyniku uwolnienia do atmosfery ogromnych ilości niebezpiecznych toksycznych substancji, śmierć poniosło około 4000 osób, 100 000 zostało poważnie rannych (Zapobieganie stratom... 2000, s. 30) spowodowały potrzebę zmiany dyrektywy SEVESO I i w rezultacie została ona zastąpiona dyrektywą Rady 96/82/WE z dnia 9 grudnia 1996 r. w sprawie zarządzania zagrożeniami poważnymi awariami z udziałem substancji niebezpiecznych, nazwano ją dyrektywą SEVESO II (Dyrektywa Rady... 1996). Według dyrektywy SEVESO II, poważna awaria przemysłowa to zdarzenie takie, jak emisja, pożar lub eksplozja w wyniku niekontrolowanego rozwoju sytuacji w czasie eksploatacji zakładu, który podlega tej dyrektywie. Zdarzenie to może prowadzić do pojawienia się natychmiast lub z opóźnieniem, na terenie zakładu lub poza jego obszarem, poważnego niebezpieczeństwa wiążącego się z występowaniem jednej lub wielu niebezpiecznych substancji. Dotyczy to zarówno substancji, które znajdują się na terenie zakładu w czasie normalnej jego pracy, jak również substancji, które nabierają niebezpiecznych właściwości dopiero w momencie powstania poważnej awarii. W dyrektywie przyjęto procedurę zgłaszania obiektów, w których znajdują się substancje niebezpieczne. Wprowadzono podział obiektów na:

- zakłady zwiększonego ryzyka wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZZR),
- zakłady dużego ryzyka wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZDR).

Dyrektywa SEVESO II zaczęła obowiązywać w krajach Unii Europejskiej od lutego 1999 roku. W Polsce przepisy dyrektywy znalazły odzwierciedlenie w odpowiednich regulacjach prawnych, z których najważniejsze to:

²⁾ Efekt domina – może wystąpić, jeżeli zakłady są zlokalizowane w niedużej odległości od siebie, co może zwiększyć prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przemysłowej lub pogłębić jej skutki, szczególnie ze względu na skoncentrowanie posiadanych rodzajów, kategorii i ilości substancji niebezpiecznych.

- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627) (Ustawa z dnia 27 kwietnia 2000 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627),
- Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o wprowadzeniu ustawy Prawo ochrony środowiska, Ustawy o odpadach oraz zmianie niektórych ustaw (Dz. U. Nr 100, poz. 1085) (Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o wprowadzeniu ustawy Prawo ochrony środowiska, Ustawy o odpadach oraz zmianie niektórych ustaw (Dz. U. Nr 100, poz. 1085).

Realizując przepisy ustawowe wydano akty wykonawcze dotyczące:

- kwalifikacji zakładu do grupy zakładów zwiększonego lub zakładów dużego ryzyka powstania poważnej awarii przemysłowej (Rozporządzenie ministra gospodarki... 2002),
- wewnętrznych i zewnętrznych planów operacyjno-ratowniczych (Rozporządzenie ministra gospodarki pracy i polityki społecznej z dnia 17 lipca 2003),
- raportów bezpieczeństwa (Rozporządzenie ministra gospodarki pracy i polityki społecznej z dnia 29 maja 2003),
- przekazywania informacji społeczeństwu (Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 4 czerwca 2002).

Nowym aktem prawnym, który reguluje zagadnienia zapobiegania poważnym awariom przemysłowym jest dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2003/105/WE z dnia 16 grudnia 2003 r. (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2003/105/WE), zmieniająca dotychczas obowiązującą dyrektywę SEVESO II. Zakres dyrektywy SEVESO II został rozszerzony, m.in. o niektóre rodzaje obiektów wyłączonych dotychczas spod jej działania, wprowadzono również zmiany dotyczące kryteriów kwalifikujących zakłady do ZZR i ZDR.

Ważnym dokumentem, choć bardziej liberalnym od dyrektywy SEVESO II, jest dyrektywa 96/61/WE z dnia 24 września 1996 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania i ograniczania zanieczyszczeń, tzw. Dyrektywa IPPC (Dyrektywa 96/61/WE z dnia 24 września 1996). Dyrektywa ta wymaga od operatorów instalacji, m.in. stosowania Najlepszych Dostępnych Technik, unikania wytwarzania odpadów, czy podejmowania wszelkich niezbędnych działań i stosowania koniecznych środków zapobiegających awariom oraz ograniczania i usuwania ich skutków. Nie nakłada ona na operatora obowiązku raportowania czy składania sprawozdań o systemie, wymaga jedynie monitoringu i raportów o emisji. Rozważania dotyczące podobieństw i różnic dyrektywy IPPC i SEVESO II przedstawili prof. K. Lebecki wraz z dr P. Rosmusem w jednej ze swoich prac (Lebecki, Rosmus 2004, s. 221).

Praca zespołów specjalistów nad analizą przyczyn i przebiegiem dotychczasowych awarii pokazuje, że większość z nich wynikała z niedociągnięć w zarządzaniu, z niedociągnięć organizacyjnych, czyli błędów człowieka. Żadna instalacja nie jest chroniona przed tego typu błędami. Fakt ten uświadomił potrzebę ustalenia podstawowych zasad dotyczących systemów zarządzania, w tym zarządzania ryzykiem wystąpienia poważnej awarii przemysłowej.

Proces zarządzania ryzykiem obejmuje wstępną identyfikację i analizę ryzyka, możliwość jego zaakceptowania, zmniejszania oraz monitorowania odpowiednich przedsięwzięć kontrolnych i ograniczających (PN-IEC 60300-3-9:1999).

Analiza ryzyka polega na identyfikacji potencjalnego zagrożenia chemicznego i obliczeniu ryzyka powstania niepożądanych skutków zdarzenia. Wyniki takiej analizy mogą zostać wykorzystane jako pomoc przy ocenie dopuszczalnego poziomu ryzyka, którą realizuje się przy pomocy zasady ALARP – *As Low As Reasonable Practicable* – tak niski, jak to racjonalnie uzasadnione. Zasada ta wyszczególnia trzy obszary ryzyka:

1. Obszar, w którym ryzyko jest niedopuszczalne – muszą być podejmowane działania na rzecz ograniczania poziomu ryzyka. Przed wyposażeniem instalacji w system zmniejszający ryzyko, praca na niej nie może być kontynuowana.
2. Obszar ALARP – w tym obszarze ryzyko może być podejmowane tylko w przypadku, gdy jest to ekonomicznie uzasadnione, czyli dalsza jego redukcja jest nieopłacalna ze względu na wysokie koszty oraz w przypadku, gdy społeczeństwo świadomie chce korzystać z danej działalności, mimo, że jest ona obciążona pewnym ryzykiem. W obszarze tym nie ma konieczności zmniejszania ryzyka, lecz istnieje konieczność ciągłego kontrolowania, czy ryzyko pozostaje na danym poziomie,
3. Obszar ryzyka ogólnie akceptowanego – nie jest wymagane podejmowanie dodatkowych działań, by ograniczyć ten poziom ryzyka. Ryzyko w tym obszarze jest traktowane jako nieistotne (Kosmowski 2004, s. 40).

Poprzez ocenę ryzyka są dostarczane informacje, z jakim ryzykiem mamy do czynienia, czy jest to ryzyko indywidualne, zbiorowe czy środowiskowe oraz na jakim poziomie jesteśmy w stanie ryzyko zaakceptować. Kolejnym krokiem jest kontrola ryzyka, realizowana przez:

1. Zapobieganie powstaniu ryzyka – zapobieganie zagrożeniom „u źródła” przez wykorzystanie nowoczesnych technik i procesów, właściwe zagospodarowanie terenów położonych w pobliżu obiektu mogącego stworzyć zagrożenie awaryjne.
2. Ograniczanie ryzyka – zainstalowanie w zakładzie dodatkowych zabezpieczeń w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia awarii, wdrożenia skutecznego zarządzania bezpieczeństwem.
3. Pełna gotowość na wypadek powstania awarii – wyszkolenie zakładowych służb ratowniczych, zainstalowanie skutecznego systemu alarmowania (Borysiewicz, Kacprzyk, Żurek 2001, s. 284–299).

Ryzyko towarzyszy każdej działalności ludzkiej i może się odnosić do zdrowia ludzi, ich bezpieczeństwa, gospodarki i oddziaływania na środowisko. Przemysł chemiczny stwarza nieustannie narastające zagrożenie wystąpienia awarii przemysłowej. W chwili, gdy dochodzi do katastrofy, środowisko zostaje skażone niebezpiecznymi, często toksycznymi, związkami chemicznymi. Zdarzenie takie może wywołać różne skutki pierwotne, np. dla zdrowia i bezpieczeństwa ludzi, zasobów wód podziemnych, życia biologicznego w wodzie i na ziemi, gleby czy wód powierzchniowych. Dodatkowo mogą wystąpić skutki wtórne, jak oddziaływanie skażonych

wód podziemnych na jakość wody pitnej, wody do celów rolniczych czy rekreacyjnych (Borysiewicz, Potemski 2004, s. 144).

Mimo stosowania w przemyśle różnych barier ochronnych, może dojść do awarii. Przemysł chemiczny stwarza szczególne zagrożenie dla zdrowia ludzi i środowiska, dlatego wymaga szczególnego traktowania. Wszędzie tam, gdzie są stosowane, wytwarzane, przetwarzane, jak i składowane substancje niebezpieczne, musi zostać zastosowana odpowiednia skuteczna ochrona przed zagrożeniem poważną awarią. Substancje te, w zależności od rodzaju, stwarzają różne rodzaje zagrożeń:

- zagrożenie wystąpienia atmosfery palnej, co może doprowadzić do powstania wybuchu – dotyczy substancji palnych,
- zagrożenie zatrucia organizmów – dotyczy substancji toksycznych (Frączek, Chwećko 2004, s. 234).

Powstanie nowych inwestycji i podmiotów gospodarczych, jak również zwiększona produkcja asortymentu przez istniejących wytwórców, przyczynia się do wzrostu ilości i różnorodności występujących substancji niebezpiecznych, co z kolei powoduje proporcjonalny wzrost ilości odpadów, w tym odpadów niebezpiecznych. W odpadach tej grupy występuje często kilka substancji niebezpiecznych, dlatego też nie można przewidzieć wszystkich zdarzeń, jakie mogą wystąpić w miejscu ich składowania. Zgodnie z Ustawą z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach niebezpiecznych (Ustawa z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach niebezpiecznych (Dz. U. Nr 11, poz. 84)) podlegają one klasyfikacji pod względem stwarzanych przez nie zagrożeń dla zdrowia człowieka i środowiska, a każda z takich substancji powinna mieć zapewnioną przez producenta kartę charakterystyki. Karta taka to zbiór informacji o niebezpiecznych właściwościach substancji lub preparatu oraz zasadach jego bezpiecznego stosowania. Dla odpadów, w tym niebezpiecznych, trudno jest opracować kartę charakterystyki. Wiąże się to ze złożoną naturą chemiczną odpadów. Dlatego też, w celu poprawy bezpieczeństwa funkcjonowania przedsiębiorstw, które generują odpady niebezpieczne należy przede wszystkim minimalizować ilość odpadów oraz ich szkodliwość (np. poprzez eliminację zawartych w nich składników toksycznych). W celu uniknięcia sytuacji zagrażającej awarią z udziałem odpadów niebezpiecznych, których nie można skutecznie unieszkodliwić, można określić poziom nienaruszalności bezpieczeństwa – SIL (*Safety Integrity Level*). Pojęcie SIL-u jest nowe i wprowadza je norma IEC 61508 (IEC Guide: Functional safety and IEC 61508 – A basic guide. International Electrotechnical Commission (IEC), May 2004), która wyszczególnia cztery poziomy – najniższemu przypisuje wartość 1, najwyższemu 4. Norma ta jest normą podstawową, która może zostać bezpośrednio zastosowana przez przemysł. Może również okazać się pomocna przy formułowaniu tzw. norm sektorowych, np. dla zakładów przetwórstwa chemicznego. Norma 61508 odnosi się do systemów elektrycznych, elektronicznych i programowalnych elektronicznych związanych z bezpieczeństwem. Warto jednak zastanowić się nad istotą wyznaczenia poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa także dla zakładów zaliczonych do ZZR i ZDR, a zwłaszcza tych, które generują odpady niebezpieczne.

Obecnie nie istnieją procedury i schematy, które opisują sposoby określania SIL w tym zakresie, a zaproponowanie takich poziomów może pomóc w takim gospodarowaniu odpadami niebezpiecznymi, aby nie stwarzały one zagrożenia wystąpienia poważnej awarii przemysłowej, a ryzyko związane z ich generowaniem nie przekraczało poziomu tzw. akceptowalnego.

Próba wyznaczenia poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa dla zakładów generujących odpady niebezpieczne jest celem dalszej pracy naukowej autorki poświęconej zapobieganiu awariom przemysłowym.

Literatura

1. Borysiewicz M., Kacprzyk W., Żurek J. (2001): *Zintegrowane oceny ryzyka i zarządzanie zagrożeniami w obszarach przemysłowych*. Warszawa, CIOP, s. 284–299.
2. Borysiewicz M., Potemski S. (2004): *Ryzyko poważnych awarii rurociągów przesyłowych substancji niebezpiecznych*. Warszawa, CIOP–PIB, s. 144.
3. Dyrektywa Rady 82/105/EWG z dnia 24 czerwca 1984 r. w sprawie zagrożenia poważnymi awariami przez niektóre rodzaje działalności.
4. Dyrektywa Rady 96/82/WE z dnia 9 grudnia 1996 r. w sprawie zarządzania zagrożeniami poważnymi awariami z udziałem substancji niebezpiecznych.
5. Dyrektywa 96/61/WE z dnia 24 września 1996 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania i ograniczania zanieczyszczeń (Dyrektywa IPPC).
6. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2003/105/WE z dnia 16 grudnia 2003 r., zmieniająca dyrektywę Rady 96/82/WE, dotyczącą zarządzania zagrożeniami poważnymi awariami z udziałem substancji niebezpiecznych.
7. Frączek R., Chwećko A. (2004): *Specyfika wymagań dla systemów detekcji gazów wybuchowych w instalacjach przemysłowych z uwzględnieniem koncepcji bezpieczeństwa funkcjonalnego*. Konferencja naukowo-techniczna, Jurata 2004.
8. IEC Guide: Functional safety and IEC 61508 – A basic guide. International Electrotechnical Commission (IEC), May 2004.
9. Kosmowski K.T. (2004): *Rozwój techniki i problemy zarządzania bezpieczeństwem*. Konferencja naukowo-techniczna, Jurata 2004.
10. Lebecki K., Rosmus P. (2004): *Zintegrowany system zarządzania ryzykiem dla zapewnienia ochrony środowiska i zapobiegania poważnym awariom przemysłowym*. Konferencja naukowo-techniczna, Jurata 2004.
11. Markowski A.S. (2000) (red.): *Zapobieganie stratom w przemyśle*. Część III: *Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym*. Łódź, Politechnika Łódzka.
12. PN-IEC 60300-3-9:1999 Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań. Analiza ryzyka w systemach technicznych.
13. Rozporządzenie ministra gospodarki z dnia 9 kwietnia 2002 r. w sprawie rodzajów i ilości substancji niebezpiecznych, których znajdowanie się w zakładzie decyduje o zaliczeniu go do zakładu o zwiększonym ryzyku albo zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (Dz. U. Nr 58, poz. 535).
14. Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 4 czerwca 2002 r. w sprawie szczegółowego zakresu informacji wymaganych do podania do publicznej wiadomości przez komendanta wojewódzkiego PSP (Dz. U. Nr 78, poz. 712).
15. Rozporządzenie ministra gospodarki pracy i polityki społecznej z dnia 29 maja 2003 r. w sprawie wymagań, jakim powinien odpowiadać raport o bezpieczeństwie zakładu o dużym ryzyku (Dz. U. Nr 104, poz. 970).

16. Rozporządzenie ministra gospodarki pracy i polityki społecznej z dnia 17 lipca 2003 r. w sprawie wymagań, jakimi powinny odpowiadać plany operacyjno-ratownicze (Dz. U. Nr 131, poz. 1219).
17. Ustawa z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach niebezpiecznych (Dz. U. Nr 11, poz. 84).
18. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2000 r. – Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627).
19. Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o wprowadzeniu ustawy Prawo ochrony środowiska, Ustawy o odpadach oraz zmianie niektórych ustaw (Dz. U. Nr 100, poz. 1085).

Recenzent: prof. dr hab. Kazimierz Lebecki

Paweł Palamarczuk, Jan Koniecznyński**

EKOLOGICZNE WALORY STOSOWANIA KOTŁÓW FLUIDALNYCH W SEKTORZE KOMUNALNYM

Streszczenie

Powietrze atmosferyczne na terenie Śląska zostało silnie zanieczyszczone przez procesy przemysłowe w ciągu ostatniego stulecia. Artykuł wskazuje na korzyści wynikające ze stosowania spalania fluidalnego. Wspomniane korzyści mają charakter ekologiczny – możliwość utylizacji różnych paliw, w tym biomasy oraz paliw niskiej jakości przy zachowaniu surowych norm emisyjnych. Opisano sposób redukcji emisji podstawowych zanieczyszczeń. Stosowanie palenisk fluidalnych umożliwia poczynienie wielu oszczędności: od przygotowania paliwa, przez wysoko sprawne przetwarzanie energii.

Ecological features of using boilers with fluidized combustion bed in municipal sector

Abstract

The Silesian atmosphere has been polluted since last century with the industrial processes. The article shows profits coming off using fluidal combustion. Referred profits has an ecological character – it's possible to utilize different fuels: biomass and waste fuels with keeping rigour emission norms. The ways of reduction basic pollution substances were described. Using fluidized combustions makes possible savings on preparing fuel and transforming energy.

WPROWADZENIE

Spalanie ziaren węgla zawieszonych w strumieniu przepływającego powietrza, co stanowi istotę paleniska ze złożem fluidalnym, stwarza korzystne warunki dostępu tlenu do cząstek paliwa i zapewnia dużą intensywność spalania, przy niższej temperaturze, nie przekraczającej 1200 °K. Intensywność spalania przejawia się w wysokiej wartości obciążenia jednostki objętości paleniska. Wskutek tego, że w palenisku fluidalnym współczynnik wnikanía ciepła od warstwy fluidalnej do powierzchni parownika jest kilkakrotnie większy w porównaniu z ciągiem konwekcyjnym w palenisku pyłowym, kocioł fluidalny o porównywalnej mocy jest mniejszy. Obniżenie temperatury spalania skutkuje ograniczeniem ilości powstających tlenków azotu, a duża intensywność wymiany masy na granicy fazy stałej i gazowej umożliwia wiązanie ditlenku siarki, chloro- i fluorowodoru przez dodatek alkalicznego addytywu do złoża fluidalnego w palenisku. Inną zaletą paleniska ze złożem fluidalnym jest możliwość spalania węgla o dużej zawartości substancji mineralnej i węgla z dodatkiem paliw z odpadów i biomasy.

* Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze.

Jeśli do tego dodać mniejszą energochłonność przygotowania paliwa (mniejsze rozdrobnienie węgla) okaże się, że zalety ekologiczne spalania w złożu fluidalnym są wielorakie i godne uwagi (Nowak 1998; Kordylewski (red.) 1999; Kucowski, Laudyn, Przekwas 1997; Topper, Cross, Goldthorpe 1994).

1. ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA PYŁEM W AGLOMERACJACH MIEJSKO-PRZEMYSŁOWYCH

Stężenie pyłu o wielkości ziarna nie przekraczającej 10 μm , czyli pyłu zawieszonego w powietrzu w aglomeracjach miejsko-przemysłowych w Polsce, jest znacznie wyższe w porównaniu z państwami zachodnioeuropejskimi, co potwierdza panujące przekonanie o wyraźnym odstawianiu od standardów obowiązujących w UE.

Obowiązująca w Polsce norma dopuszczalnego średniorocznego stężenia PM₁₀, wynosząca 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, często jest przekraczana. W 2003 roku przekroczenie normy (1–2 razy) stwierdzono na 63% stanowiskach pomiarowych, a w woj. śląskim na 88% stanowisk. Norma dopuszczalnego średniodobowego stężenia PM₁₀ wynosi 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Jak wykazują badania, z przejściowym, malejącym marginesem tolerancji, była przekraczana z niedopuszczalną częstością w miastach woj. śląskiego.

Nadmierne stężenie pyłu w powietrzu powoduje wyraźne obniżenie natężenia promieniowania słonecznego, w widzialnej i nadfioletowej części widma, docierającego do powierzchni Ziemi, o ponad 10%. Zawarte w ziarnach pyłu, lub obecne na powierzchni ziaren pyłu, zwłaszcza w przedziale respirabilnym, związki metali ciężkich, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i dioksyny powodują narażenie ludności na pogorszenie zdrowia. Wyniki badań toksykologicznych potwierdzają coraz większe znaczenie substancji śladowych zawartych w pyłach. Niepokojąco wysokie stężenie benzo(a)pirenu w powietrzu w miastach woj. śląskiego, przekraczające wielokrotnie normę średnioroczną jest związane z nadmiernym stężeniem pyłu zawieszonego, pochodzącego ze spalania paliw (Koniecznyński, Pasoń-Koniecznyńska 2004).

Szkodliwe oddziaływanie pyłu dotyczy zarówno powietrza zewnętrznego, jak i wewnętrznego. Pod względem wielkości stężenia frakcji respirabilnej środowisko wewnętrzne nie różni się od zewnętrznego (Pastuszka 2001).

Istotną przyczyną niskiej jakości powietrza atmosferycznego jest wtórne pylenie występujące z dużą intensywnością w miastach, zwłaszcza wzdłuż tras komunikacyjnych i spowodowane porywaniem najmniejszych ziaren pyłu osiadłego, głównie wskutek ruchu pojazdów.

2. UDZIAŁ ENERGETYCZNEGO SPALANIA WĘGLA W ZANIECZYSZCZENIU POWIETRZA PYŁEM W POLSCE

Utrzymujące się od wielu lat nadmiernie wysokie stężenie pyłu zawieszonego w powietrzu na obszarach miejsko-przemysłowych jest powodem zainteresowania źródłami emisji pyłu, jego składem ziarnowym, mineralogicznym i chemicznym oraz

morfologią. Posiadana wiedza i doświadczenie uzasadniają pogląd, że energetyczne spalanie stałych paliw w kotłowniach i ciekłych paliw węglowodorowych w silnikach pojazdów samochodowych, przyczyniają się w decydującym stopniu do zanieczyszczenia powietrza. Szczególnie duży udział węgla kamiennego jako paliwa w Polsce uzasadnia prowadzenie dokładnych badań nad składem produktów spalania węgla. Niezadowalająca jakość powietrza w dużym stopniu wynika ze szczególnie niekorzystnej struktury zużycia pierwotnych nośników energii, wśród których dominuje węgiel, zwłaszcza kamienny.

Jeszcze w latach 80. ubiegłego wieku udział węgla wynosił 79%, a gazu ziemnego i paliw ciekłych pochodzących z przeróbki ropy naftowej około 20% (łącznie). Obecnie (dane z 2003 r.) udział węgla kamiennego i brunatnego wynosi 64%, podczas gdy udział wymienionych paliw gazowych i ciekłych stanowi 31,1%. Chociaż monokultura węglowa odchodzi w przeszłość, nadal w Polsce struktura zużycia pierwotnych nośników energii odbiega od tej, która jest w Europie Zachodniej, gdzie udział węgla wynosi mniej niż 19%, a paliw gazowych i płynnych ponad 63%.

Krajowe wydobycie węgla kamiennego, w 2003 roku wynoszące 102,9 mln Mg wraz z niewielkim importem – 2,5 mln Mg, pokrywało zużycie krajowe, które wynosiło 83,1 mln Mg (głównie procesy przetwarzania na inne nośniki energii – 66,3 mln Mg, w tym około 52,5 mln Mg zużycia w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach). Z kolei 60,9 mln Mg wydobytego węgla brunatnego zużyto w kraju, niemal w całości w energetyce zawodowej. Ten stan rzeczy kształtuje strukturę emisji pyłu w Polsce. Ocenia się, że na 473 tys. Mg pyłu wprowadzonego do powietrza ze wszystkich źródeł 301 tys. Mg, a więc blisko 64%, pochodziło ze spalania paliw, głównie węgla.

Należy jednak podkreślić, że w ostatnich latach w Polsce postępuje w szybkim tempie spadek emisji pyłu z dużych obiektów należących do energetyki zawodowej, wyposażanej w coraz skuteczniejsze elektrofiltry, zapewniające stężenie pyłu w odpylonych spalinach nie wyższe od 50 mg/m^3 . Jeśli dodać, że w największych elektrowniach zainstalowano absorbery do odsiarczania spalin, spełniające dodatkowo funkcję odpylacza drugiego stopnia, staje się zrozumiałe, że rzeczywiste stężenie pyłu w spalinach kierowanych do atmosfery jest jeszcze dwu- a nawet trzykrotnie mniejsze. W odróżnieniu od energetyki zawodowej, stosującej kotły z paleniskami pyłowymi, w energetyce ciepłej komunalnej i zakładowej używa się kotłów z rusztem mechanicznym, wyposażonych w cyklony pojedyncze lub bateryjne. Ze względu na trudną do przekroczenia granicę skuteczności cyklonu, wynoszącą 85%, wskaźnik emisji pyłu, wyrażony w masie pyłu przypadającej na Mg spalonego węgla jest wielokrotnie wyższy w porównaniu z paleniskami pyłowymi w dużych elektrowniach. Okolicznością pogorszającą sytuację jest zlokalizowanie obiektów energetyki komunalnej i zakładowej w dzielnicach mieszkaniowych lub w sąsiedztwie osiedli przyfabrycznych, a także znacznie niższe emitory wprowadzające spaliny do atmosfery (Koniecznyński, Pasoń-Koniecznyńska 2004).

W celu szybkiego zatrzymania degradacji powietrza planuje się przedsięwzięcia inwestycyjne, organizacyjne i w zakresie zagospodarowania przestrzennego [10], a wśród nich: wprowadzanie do eksploatacji instalacji opartych o niskoemisyjne techniki spalania paliw, budowę lokalnych systemów pracujących w układach kogeneracji z wykorzystaniem energii odnawialnej.

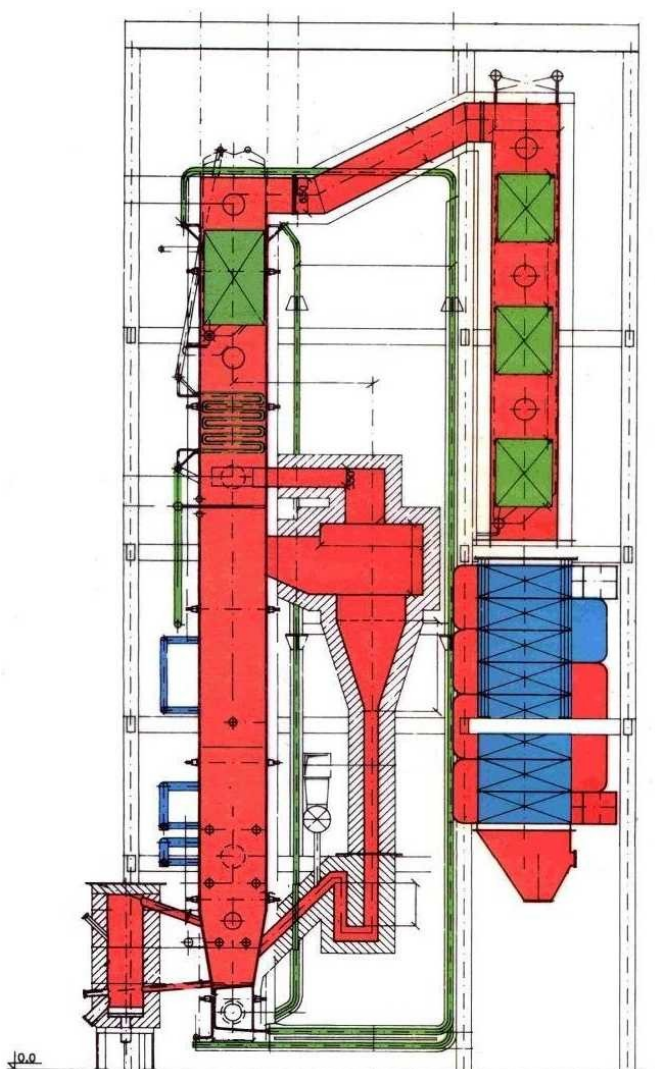
3. CHARAKTERYSTYKA KOTŁA Z PALENISKIEM FLUIDALNYM

Historia procesów fluidalnych sięga 1921 roku, kiedy Fritz Winkler zauważył, że ruch ziarenek pod wpływem strumienia powietrza przypomina wrzenie cieczy. Procesy fluidalne zastosowano w latach 60. XX wieku, jednak nie w celu spalania paliw stałych, lecz w procesach katalitycznego krakingu w przemyśle petrochemicznym. Dopiero na początku lat 80. uruchomiono pierwsze paleniska z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym w obiektach energetycznych. Przemysłowe zastosowania tej technologii wiążą się z firmami: Ahlstrom, Foster Wheeler i ABB. W Polsce duże osiągnięcia ma na tym polu Fabryka Kotłów Rafako w Raciborzu [13]. Obecnie technologia fluidalna jest najlepszym sposobem utylizacji węgla w energetyce. Technologia spalania w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym (CWF ang. CFB – *circulating fluidized bed*) znalazła szerokie zastosowanie w energetyce. Obok innych zalet umożliwia ona sprostanie wymogom emisyjnym podczas spalania paliw niskiej jakości.

Komora spalania w kotle z CWF bardzo różni się od tych, jakie są znane z kotłów rusztowych czy pyłowych. Dostarczane do paleniska ziarna paliwa o średnicy nie większej niż 6 mm są zawieszone w strumieniu gazów. Ze względu na zróżnicowanie średnic ziaren dostarczanego paliwa w warstwie fluidalnej dochodzi do segregacji. Grubsze ziarna pozostają w dolnej części warstwy, mniejsze są unoszone do góry. Układ nawrotu, oddzielając gazy spalinowe od części stałych, pozwala na zatrzymanie drobnych, niedopalonych frakcji oraz addytywów i skierowaniu ich ponownie do paleniska. Wydzielone w cyklonie palące się ziarna węgla przed ponownym przedostaniem się do paleniska ulegają wygaszeniu.

Proces ma charakter periodyczny – w pierwszym cyklu węgiel zostaje odgazowany, a części lotne spalone, w następnych następuje już tylko dopalenie części stałych. Ziarna cyrkulują w układzie tak długo, jak długo cyklon nawrotu może je wydzielać. W rezultacie następuje wydłużenie realnego czasu pobytu paliwa w palenisku i osiąga się wysoki stopień wypalenia (ponad 99%). Układ nawrotu może znajdować się na zewnątrz komory paleniska (rys. 1) albo, w nowszych konstrukcjach, centralnie w jej wnętrzu (rys. 2).

Wewnątrz komory spalania występuje podział na strefy redukcji i dopalenia, uzyskany dzięki podziałowi powietrza na pierwotne i wtórne. Prędkość przepływu powietrza pierwotnego, zwanego też powietrzem nośnym, wewnątrz komory paleniskowej musi być odpowiednio duża, aby mogło powstać złożo fluidalne. Zbyt duża prędkość przyczynia się do erozji powierzchni ogrzewalnych kotła, zatem nie powinna przekraczać 6 m/s. Powietrze wtórne jest wdmuchiwane do górnej części warstwy.

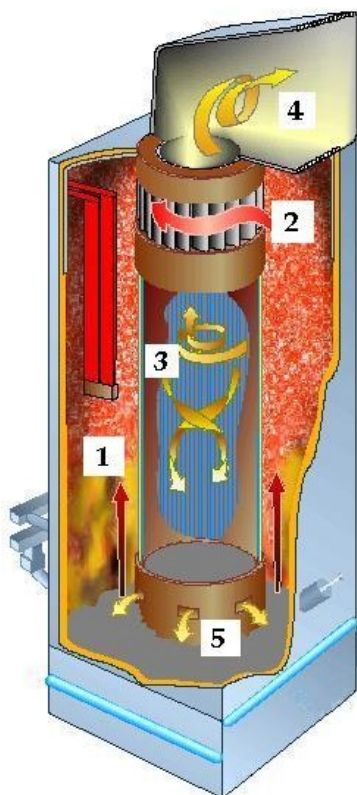


Rys. 1. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym i zewnętrznym układem nawrotu

Fig. 1. A layout of kettle with a circulating fluid bed and with an external returning arrangement

Intensywność wymiany energii i masy w warstwie ułatwia spalanie, pozwala na zmniejszenie wymiarów komory paleniskowej oraz na obniżenie temperatury spalania najczęściej do 850–870 °C. Dodatkowym atutem jest ustalony rozkład temperatury wzdłuż całej komory spalania.

Z chemicznego punktu widzenia relatywnie niska temperatura ogranicza powstawanie termicznych tlenków azotu, a jednocześnie zapewnia stabilność reakcji wiązania powstającego dwutlenku siarki przez podawany sorbent. Z fizycznego punktu widzenia nie powoduje mięknienia ani topienia popiołu, dzięki czemu nie występują problemy z zużłowaniem, a powierzchnie kotłowe nie zarastają.



Rys. 2. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym i wewnętrznym układem nawrotu (CYMIC): 1 – powietrze nośne, 2 – wlot na kierownicę gazów, 3 – wir zstępujący i wstępujący w cyklonie, 4 – wylot spalin z cyklonu, 5 – nawrót materiału zatrzymanego w cyklonie

Fig. 2. A layout of kettle with a circulating fluid bed and with an external returning arrangement (CYMIC): 1 – carrier air, 2 – inflow to gases guide apparatus, 3 – descending and ascending whirl in cyclone, 4 – outlet of fumes from cyclone, 5 – return of material stopped in cyclone

Konstrukcja paleniska z CWF sprzyja utylizacji paliwa gorszej jakości o wartości opałowej od około 6300 kJ/kg, bez odbioru ciepła z warstwy fluidalnej i od około 13 000 kJ/kg z odbiorem ciepła. Takim paliwem mogą być: węgiel o dużej zawartości substancji mineralnej, węgiel brunatny, torf, przetworzone odpady komunalne (RDF), zużyte opony (TDF), mączka mięsno-kostna, odpady z instalacji wzbogacania węgla i biomasa. Na podstawie przeprowadzanych badań ustalono, że graniczny stosunek węgla do paliw alternatywnych podawanych do spalania wynosi 1:1. Samo doprowadzenie paliwa do kotła też jest proste i nie nastręcza dużych problemów technologicznych. Dostatecznie szeroko stosowanym rozwiązaniem jest doprowadzenie w postaci pasty mieszaniny węgla, sorbentu, balastu i wody (25–30%).

Nakłady finansowe niezbędne do budowy instalacji CWF są podobne do ponoszonych przy budowie instalacji z paleniskami pyłowymi, ale w przeciwieństwie do palenisk pyłowych nie jest potrzebna kosztowna instalacja młynów do mielenia węgla. Procesy przygotowania paliw są energochłonne, a ich udział w kosztach produkcji energii jest niemały. Paleniska fluidalne nie wymagają tak drobnych ziaren, więc można poprzestać na kruszeniu, a w przypadku dostaw miałów energetycznych dalsze rozdrabnianie nie jest konieczne. Pozwala to oszczędzić, co najmniej 10 KWh/Mg spalanego węgla.

4. REDUKCJA EMISJI SUBSTANCJI ZANIECZYSZCZAJĄCYCH Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH

Spalanie paliw jest źródłem wielu zanieczyszczeń wpływających negatywnie na wszystkie elementy środowiska naturalnego (powietrze, woda, gleby, organizmy żywe). Cechą charakterystyczną paleniska fluidalnego jest mniejsza w porównaniu z paleniskiem pyłowym emisja podstawowych gazowych substancji zanieczyszczających powietrze: tlenków azotu i siarki, chloro- i fluorowodoru. Do najważniejszych substancji zanieczyszczających należą tlenki azotu, przede wszystkim tlenek NO i niewielkie ilości NO₂ (ok. 5%).

W trakcie spalania węgla, w wyniku endotermicznej reakcji między tlenem i azotem znajdującymi się w powietrzu wprowadzanym do spalania, tworzy się tlenek azotu

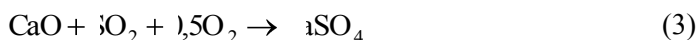


Ilość wytwarzanego tlenku azotu zależy od temperatury procesu spalania, rosnąc szybko wraz ze wzrostem temperatury. Ten rodzaj tlenku azotu nosi nazwę termicznego. W węglu występują także organiczne związki azotu: pirol i pirydyna. Zawartość azotu obecnego w związkach chemicznych zawierających ugrupowania azotu, w węglu wynosi od 0,5 do 2% wag., zwykle około 1,4% w węglu energetycznym. W czasie spalania następuje utlenianie azotu i powstaje paliwowy tlenek azotu. Część azotu zawartego w paliwie utlenia się w przedniej części płomienia i tworzy natychmiastowy tlenek azotu. Paliwowy tlenek azotu pojawia się w spalinach już przy relatywnie niskich temperaturach spalania, natychmiastowy dopiero w wyższych temperaturach, przekraczających 1500 K (Koniecznyński 2004). Wspomniane wyżej bardzo dobre mieszanie substratów w fluidalnym palenisku i wprowadzanie niezbędnej ilości powietrza wtórnego w strefie utleniającej pozwalają osiągnąć pełne spalanie paliwa już w temperaturze około 1100 K, a więc o 400 K niższej od panującej w typowym palenisku tradycyjnym. Obniżenie temperatury spalania i redukcyjne warunki panujące w niższej strefie złoża fluidalnego powodują zmniejszenie ilości powstających tlenków azotu do poziomu określonego stężeniem 130–170 mg/m³_n, a więc kilkakrotnie niższego w porównaniu ze zwykłym kotłem (500–1400 mg/m³_n). Zwraca się jednak uwagę, że w specyficznych warunkach panujących wewnątrz komory CWF dochodzi do syntezy relatywnie znacznych ilości N₂O (stężenie w spalinach przekracza 30 ppm, co odpowiada około 30% wszystkich NO_x).

Podczas spalania węgla utlenieniu ulegają związki siarki zawarte w paliwie i w postaci gazowego SO₂ uchodzą wraz z gazami odlotowymi. W warunkach panujących w palenisku fluidalnym utlenieniu ulega piryt (FeS₂) i organiczne związki siarki zawarte w węglu: tiofen, dibenzotiofen, tiole i siarczki. Powstający ditlenek siarki wiąże się, wykorzystując chemisorpcję, na drodze kontaktu z addytywem, w rodzaju wapniaka lub dolomitu, wprowadzanym z rozdrobnionym węglem do paleniska fluidalnego. W wyniku kalcynacji następuje rozkład węglanów i tworzy się tlenek wapniowy lub magnezowy. W przypadku węglanu wapnia reakcja ma przebieg przedstawiony w reakcji 1.

Kalcynacja wapniaka przebiegająca w warunkach panującej w palenisku temperatury przyczynia się do wzrostu powierzchni właściwej wskutek powstania znacznej liczby mikroporów, co sprzyja wzrostowi reaktywności addytywu.

Wprowadzenie wapniaka o czystości, co najmniej 80% (zawartości CaCO_3), zmielonego do ziarna mniejszego od 0,7 mm do paleniska fluidalnego powoduje, że tlenki siarki łatwo wiążą się z tlenkiem wapnia. Sprzyjające utlenianiu warunki sprawiają, że w produktach reakcji dominują siarczany wapnia (2). Tlenek wapnia reaguje nie tylko z tlenkami siarki, lecz także z chlorowodorem i fluorowodorem (3 i 4). Zawarte w węglu związki chloru i fluoru, głównie nieorganiczne, występują w ilościach co najmniej o rząd mniejszych niż związki siarki, jednak ich obecność nawet w takiej ilości stwarza nie mniejsze zagrożenie niż SO_2 . Przez podanie sorbentu udaje się związać 55–75% chloro- i fluorowodoru unoszonych z paleniska.



Głównym jednak celem wprowadzania addytywu jest odsiarczanie spalin.

Ziarna sorbentu cyrkulują razem z paliwem, przez co zwiększa się ich czas pobytu w kotle. Niekiedy w strefach redukcyjnych komory spalania powstają CaSO_3 oraz CaS , które jednak łatwo ulegają utlenieniu do CaSO_4 .

Do najważniejszych parametrów, które decydują o skuteczności odsiarczania można zaliczyć: czas pobytu ziaren sorbentu, reaktywność sorbentu i jego skład chemiczny, rozkład strefy redukcyjnej i utleniającej w komorze paleniskowej, temperatura w komorze spalania, skład frakcyjny ziaren sorbentu (Żbik 2002).

Podstawowymi parametrami określającymi właściwości wapniaka są wskaźniki reaktywności i sorpcji bezwzględnej oraz stopień przereagowania:

RI – wskaźnik reaktywności określający stosunek molowy Ca/S.

CI – wskaźnik sorpcji bezwzględnej określający ilość siarki w gramach związanej przez kilogram badanego wapienia, (g S/kg).

Tablica 1. Wskaźniki reaktywności oraz sorpcji bezwzględnej sorbentów wapiennych

Ocena wapienia	RI	CI
Znakomity	< 2,5	> 120
Bardzo dobry	2,5–3	100–120
Dobry	3–4	80–100
Dostateczny	4–5	60–80
Niskiej jakości	> 5	< 60

Wprowadzanie addytywu zapewnia nie tylko usuwanie powstającego podczas spalania SO_2 , HCl , i HF , lecz także, zapobiegając nadmiernemu przerostowi temperatury, pozwala na precyzyjne sterowanie procesem.

Stosunek Ca/S mieści się w granicach 2,5–3,5, przy skuteczności odsiarczania na poziomie 90%, co oznacza, że stopień przereagowania addytywu wynosi 25–35%.

Zużycie wapniaka może być mniejsze, jeśli popiół spalanego węgla zawiera dużo tlenków wapnia, magnezu, sodu i potasu. Przypadek taki występuje przy spalaniu niektórych węgli kamiennych.

Należy pamiętać, że dodatek sorbentu do paleniska cyrkulacyjnego bezpośrednio wpływa na skład ziarnowy warstwy fluidalnej, tym samym na aerodynamikę komory paleniskowej oraz przebieg procesów wymiany energii i masy, decydujących o przebiegu spalania oraz zasiarczania sorbentu.

Wprowadzenie addytywu i tworzenie się stałych produktów odsiarczania zwiększa ilość odpadów, ponieważ obok popiołów pojawia się siarczan wapniowy, nieprzereagowane wapno i mineralne zanieczyszczenia kamienia wapiennego, a także chlorek i fluorek wapnia. Wzrost ilości odpadów sięga nawet 40%, co jest mankamentem tej metody. Tym bardziej, że wzrost zawartości CaO w składowanych odpadach powoduje wzrost pH odcieków ze składowisk. Opracowano więc sposoby wykorzystania popiołów z kotłów fluidalnych jako podłoża do budowy dróg lub półproduktu do wyrobu sztucznego kruszywa.

Niezbędne są działania prowadzące do optymalizacji zużycia i wykorzystania sorbentów. W przypadku skuteczności odsiarczania spalin, próba przekroczenia bariery 90% wiązania SO₂, oznacza drastyczny wzrost stosunku Ca/S. Powoduje to obniżenie sprawności kotła (różnica między rosnącym ciepłem kalcynacji a ciepłem reakcji zasiarczania), wzrost strat wylotowych w następstwie zwiększonych ilości popiołów wyprowadzanych z kotła oraz zwiększenie kosztów zagospodarowania odpadów. Innym negatywnym efektem wzrostu ilości związków wapnia w palenisku jest zwiększona emisja NO_x. Stwierdzono, że wzrost Ca/S powyżej 3 wyraźnie zwiększa ilość powstających NO_x, ponieważ nadmiar wolnego CaO wpływa katalitycznie na tworzenie się tlenków azotu (Bis, Radecki 2002). Dążąc do obniżenia NO_x przez zmniejszenie nadmiaru powietrza dostarczanego do spalania należy się liczyć ze wzrostem ilości CO. Zatem kontrola powstających w palenisku CWF zanieczyszczeń wymaga koordynacji działań oraz uwzględnienia kompromisu.

5. EKOLOGICZNE EFEKTY GOSPODARKI SKOJARZONEJ Z UDZIAŁEM KOTŁÓW FLUIDALNYCH

W nowoczesnych elektrociepłowniach procesy cieplne są realizowane w układzie skojarzonym. Głównym produktem jest ciepło, a pozyskiwana energia elektryczna jest produktem ubocznym. Wielkość popytu na ciepło determinuje lokalizację oraz wielkość siłowni. Korzyść wynikająca ze skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej polega na tym, że sprawność łączna, definiowana jako stosunek sumy efektów użytecznych do entalpii napędowej jest większa niż wyliczona sprawność łączna produkcji rozdzielonej. Ilość energii chemicznej paliw pierwotnych, jaka może być zaoszczędzona w skali globalnej dzięki skojarzeniu, jest jednym z najistotniejszych wskaźników porównawczych

$$-\Delta \dot{E}_{ch} = \dot{E}_{ch})_R - \dot{E}_{ch})_S > 0 \quad (6)$$

Fizyczny sposób powiązania jest dla odbiorcy nieistotny, największe znaczenie ma zmniejszenie kosztów jednostkowych produkcji. Pod względem termodynamicznym, na skutek skojarzenia, zostają zmniejszone straty egzergii przez jednoczesne realizowanie procesów spełniających różne zadania energetyczne i technologiczne. Skumulowaną oszczędność energii chemicznej paliwa oblicza się, porównując zużycie w gospodarce rozdzielonej i skojarzonej, przy założeniu stałych ilości ciepła grzejnego i energii elektrycznej dostarczanych do odbiorców (Szargut, Ziębik 2000). Dla celów obliczeniowych wzór przyjmuje następującą postać

$$-\Delta E_{ch} = \frac{1}{\eta_d} \left[Q_o \left(\frac{1}{\eta_{Ek} \eta'_{pc}} - \frac{1}{\eta_{Eec} \eta_{pc}} \right) + E_{elo} \left(\frac{1}{\eta_{Ek} \eta'_{tp}} - \frac{1}{\eta_{Eec} \eta_{tp} (1 - \varepsilon)} \right) \right] \quad (7)$$

gdzie:

- η_d – skumulowana sprawność dostawy paliwa (0,97),
 - η_{Ekc} – średnia sprawność energetyczna ciepłowni (0,8),
 - η'_{pc} – sprawność przesyłania ciepła z ciepłowni (0,85),
 - η_{Eec} – sprawność energetyczna elektrociepłowni (0,85),
 - η_{pc} – sprawność przesyłania ciepła z elektrociepłowni (0,85),
 - η_{Ek} – sprawność energetyczna elektrowni (0,36),
 - η'_{tp} – sprawność przesyłania energii elektrycznej z elektrowni (0,92),
 - η_{tp} – sprawność przesyłania energii elektrycznej z elektrociepłowni (0,92),
 - ε – wskaźnik potrzeb własnych elektrociepłowni,
 - Q_o, E_{elo} – zapotrzebowanie ciepła i energii elektrycznej loco odbiorca.
- W nawiasach podano wartości przyjęte w obliczeniach.

Na przykładzie jednej z elektrociepłowni wyposażonej w kocioł fluidalny obliczono, że oszczędność energii chemicznej, dzięki wykorzystaniu układu kogeneracyjnego wyniosła w 2004 roku około 800 TJ. Aby oszacować efekt ekologiczny skojarzonej gospodarki energetycznej można posłużyć się sposobem obliczeń zastosowanych przy ocenie uciążliwości produkcji energii elektrycznej (Malina, Koniecznyński 2004). Jeśli skumulowany wskaźnik energochłonności produkcji energii elektrycznej wynosi 11,4 MJ/kWh to z 800 TJ energii chemicznej można wyprodukować 70175 MWh energii elektrycznej. Przyjmując za (Malina, Koniecznyński 2004), że w rachunku sekwencyjnym produkcja 1 MWh energii elektrycznej powoduje skumulowaną emisję zanieczyszczeń powietrza odpowiadającą 15,055 kg SO₂ (emisja zastępcza) skojarzona gospodarka energetyczna w przykładowej elektrociepłowni zapobiega emisji 1056 Mg SO₂ (emisja zastępcza). Oszczędność energii wskutek wyeliminowania przemiału węgla, określona na 10 kWh/Mg przekłada się w omawianym przykładzie na oszczędność około 5000 MWh, co oznacza wyeliminowanie dalszych 75 Mg SO₂ (emisja zastępcza).

Należy podkreślić, że warunkiem koniecznym do zastosowania układu skojarzonego jest odpowiednio duże i stabilne zapotrzebowanie na każdy z produktów.

6. SPALANIE PALIW ODNAWIALNYCH A REDUKCJA CO₂

W wyniku spalania paliw węglowodorowych powstaje dwutlenek węgla. Duże stacjonarne źródła emitują ponad 30% całości dwutlenku węgla, pochodzącego ze spalania paliw kopalnych. Największą jednostkową emisją CO₂, wyrażoną w kg/GJ, charakteryzuje się węgiel brunatny, jest ona o 7% większa w porównaniu z węglem kamiennym. W ciągu najbliższych lat Polska jest zobowiązana do redukcji emisji gazów cieplarnianych, a wśród nich CO₂, co wynika z przyjęcia deklaracji z Kioto. Pod względem technologicznym i technicznym nie ma przeszkód, aby dwutlenek węgla ze spalin energetycznych wydzielać i po skropleniu trwale składować w głębi oceanów. Należy jednak liczyć się, że spowoduje to spadek sprawności wytwarzania energii nawet o 33% i wzrost kosztów energii o 40%.

W przyjętych założeniach polityki energetycznej państwa do 2025 roku, mającej zapewnić bezpieczeństwo energetyczne, poprawę konkurencyjności oraz ochronę środowiska przed negatywnymi skutkami oddziaływania energetyki, przewiduje się stopniowy wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych. Zaletą biomasy jako paliwa jest stabilizowanie ilości CO₂ w atmosferze. Wynika to z faktu zamknięcia obiegu węgla C. Wskutek fotosyntezy węgiel C zawarty w atmosferycznym CO₂ staje się budulcem tkanek roślinnych. Po obumarciu roślin, wskutek procesów rozkładu dochodzi do uwolnienia CO₂. Spalenie biomasy jako paliwa też uwalnia CO₂, przynosi jednak pożytek w postaci energii.

Biomasa obejmuje wszelką substancję organiczną pochodzącą z roślin lub zwierząt, jak również substancje uzyskane z przetworzenia surowców roślinnych lub zwierzęcych.

Tablica 2. Rodzaje biomasy

Pochodzenie roślinne	Pochodzenie zwierzęce
Słoma z produkcji zbożowej	Biogaz z fermentacji gnojowicy
Odpady drzewne	Biogaz z fermentacji osadów
Odpady z przemysłu celulozowo-papierniczego	Biogaz z fermentacji odpadów na wysypisku śmieci
Makulatura	Obornik

Wartość opałowa biomasy w dużym stopniu zależy od zawartości wilgoci. Na przykład wartość opałowa sosny, gatunku drzewa dominującego w Polsce, może zawierać się w granicach od 11 MJ/kg (80% wilgotności) do 18 MJ/kg (15% wilgotności). W przypadku mączki mięsno-kostnej waha się ona w granicach 17,5–20 MJ/kg. Można przyjąć, że dwie tony biomasy są równoważne jednej tonie węgla (Nowak, Sekret 2001).

Próby współspalania węgla i biomasy były przeprowadzane z powodzeniem w kilku krajowych elektrociepłowniach i elektrowniach. Wymagało to jedynie dobudowania linii przygotowania i podawania biomasy.

Potencjalne światowe zasoby biomasy oszacowane według różnych źródeł od 128 do 810 PJ/rok są ogromne, choć obecnie wykorzystywane jedynie w 7%.

PODSUMOWANIE

Kotły z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym osiągnęły stopień „dojrzałości” konstrukcyjnej i technologicznej, umożliwiając ekspansję w różnych działach krajowej energetyki. Spalając w tych kotłach węgiel kamienny i brunatny, także niskiej jakości, nie wymagający dużego rozdrobnienia, kilkakrotnie zmniejsza się emisję tlenków azotu, a stosując alkaliczny addytyw, również kilkakrotnie zmniejsza się emisję ditlenku siarki. Dodatkowe, znaczne efekty ekologiczne przynosi praca kotła fluidalnego w układzie skojarzonej gospodarki cieplnej. Warunki pracy kotła fluidalnego pozwalają na współspalanie węgla i biomasy, co ma duże znaczenie dla urealnienia programu wykorzystania paliw odnawialnych i ograniczenia emisji ditlenku węgla.

Literatura

1. Bis Z., Radecki M. (2002): *Alternatywne sorbenty wapniowe do odsiarczania spalin w kotłach fluidalnych*, [w:] Materiały IX Konferencji Kotłowej 2002 nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, tom 1, 12–15 listopada 2002, Szczyrk.
2. Koniecznyński J. (2004): *Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami. Metody, aparatura i instalacje*. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
3. Koniecznyński J., Pasoń-Koniecznyńska A. (2004): *Energetyczne spalanie paliw a emisja zanieczyszczeń powietrza*, [w:] Zarządzanie energią w miastach, R. Zarzycki (red.), Łódź, Polska Akademia Nauk.
4. Kordylewski W. (red.) (1999): *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1999.
5. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M. (1997): *Energetyka a ochrona środowiska*. Warszawa, WNT.
6. Malina A., Koniecznyński J. (2004): *Ocena ekologiczna wybranych procesów produkcyjnych*. Monografia Nr 58. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
7. Nowak W. (1998): *Nowoczesne, ekologicznie czyste i wysoko sprawne technologie utylizacji węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 9, s. 16–25.
8. Nowak W., Sekret R. (2001): *Wykorzystanie biomasy w procesie fluidalnego spalania węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 8, s. 2–3.
9. Pastuszka J.S. (2001): *Narażenie na aerozole ziarniste, włókniste i biologiczne populacji generalnej Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Monografie Nr 40.
10. program dla woj. śląskiego.
11. Szargut J., Ziębik A. (2000): *Podstawy energetyki cieplnej*. Warszawa, PWN.
12. Topper J.M., Cross J.I., Goldthorpe S.H. (1994): *Clean coal technology for power and cogeneration*. Fuel d. 7, No 7, s. 1056–1063.
13. www.elektrownie.com.pl.
14. Żbik M. (2002): *Prezentacja wyników próby zastosowania drobnego sorbentu do odsiarczania spalin*, [w:] Materiały II Krajowej Konferencji Użytkowników Kotłów CFB, 25–27 września 2002, Podlesice.

Recenzent: dr hab. inż. Irena Wilkosz, Politechnika Śląska

*Olga Klemczak**

OGRANICZANIE NISKIEJ EMISJI NA PRZYKŁADZIE MIASTA ZABRZE

Streszczenie

Efektem dominacji węgla jako nośnika energii jest nadmierne zanieczyszczenie powietrza emisją pyłu i gazów z różnego rodzaju palenisk węglowych. Szczególnie duży udział w zanieczyszczeniu powietrza mają paleniska domowe kształtujące tzw. niską emisję. W artykule omówiono stan powietrza w Aglomeracji Górnośląskiej, zagrożenia spowodowane emisją spalin z palenisk węglowych, zamierzenia naprawcze i sposoby osiągnięcia poprawy istniejącego stanu rzeczy. W oparciu o dane pochodzące z miasta Zabrze, omówiono działania władz miejskich zmierzające do ograniczenia niskiej emisji, między innymi poprzez substitucję węgla gazem ziemnym.

Limiting low emission on an example of city Zabrze

Abstract

An excessive air contamination by dusts and gasses emission from different kinds of coal furnace has been observed as a result of the coal dominance as an energy carrier. Domestic hearths causing so-called low emission hold particularly large share in total air contamination. In this paper, information about air condition in Upper Silesia Agglomeration, hazards of fumes emission from coal furnaces, as well as repair intentions and ways methods to improve present situation, were given. The local authority activities aiming at a decrease in low emission (among other things through substitution coal for natural gas) were discussed basis of the data from the town of Zabrze.

WPROWADZENIE

Zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza to jedno z najpoważniejszych zadań stojących przed Polską. To nie przemysł ciężki, chemiczny i energetyka są głównymi trucicielami. Restrukturyzacja gospodarki i zmiany technologiczne spowodowały, że aktualnie udział substancji emitowanych przez zakłady przemysłowe jest niewielki i wciąż maleje. Coraz poważniejszym problemem ekologicznym, ekonomicznym, zdrowotnym i społecznym są trujące spaliny i pyły pochodzące ze źródeł tzw. niskiej emisji.

1. STAN POWIETRZA W AGLOMERACJI GÓRNOŚLĄSKIEJ

Agglomeracja Górnośląska jest obszarem, na którym występuje największa koncentracja źródeł emisji przemysłowych w kraju. Jest to obszar o zróżnicowanej strukturze urbanistycznej, którego zachodnia część obejmuje historycznie najstarszą

* Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach.

część obszarów przemysłowych Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, a wschodnia część tereny, których układ urbanistyczny ukształtowały inwestycje realizowane w okresie powojennym.

Przeprowadzona w Aglomeracji Górnośląskiej, w ramach państwowego monitoringu środowiska, ocena jakości powietrza wykazała przekroczenia dopuszczalnych poziomów stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀ wraz z marginesem tolerancji i tym samym konieczność wdrożenia na tym terenie naprawczego programu ochrony powietrza (art. 91 ust. 1, ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska).

24 marca 2004 roku Wojewoda Śląski wydał Rozporządzenie nr 17/2004 w sprawie określenia programu ochrony powietrza dla strefy Aglomeracja Górnośląska.

Program ochrony powietrza dla Aglomeracji Górnośląskiej ma obejmować miasta: Bytom, Chorzów, Dąbrowa Górnicza, Gliwice, Jaworzno, Katowice, Sosnowiec, Świętochłowice, Tychy i Zabrze, a na celu osiągnięcie dopuszczalnych poziomów substancji w powietrzu, ponieważ w ww. strefie, objętej programem, zostały naruszone standardy jakości powietrza dla pyłu zawieszonego PM₁₀.

Na terenie województwa śląskiego jest zlokalizowana znaczna liczba instalacji przemysłowych, będących źródłami emisji pyłów i podstawowych prekursorów aerozoli, która stanowi jedną z przyczyn wysokiego występowania tła stężeń pyłu PM₁₀.

Na wysokość poziomu stężeń pyłu w istotny sposób wpływają warunki topograficzne, uwarunkowania mikro- i mezoklimatyczne oraz efekty ogólnej cyrkulacji powietrza. Lokalne warunki meteorologiczne Aglomeracji Górnośląskiej mogą nasilać zjawisko epizodów wysokich stężeń PM₁₀. Nie bez znaczenia jest także sposób zagospodarowania i użytkowania terenów w obrębie aglomeracji.

Teren Aglomeracji Górnośląskiej ma charakter wyżynny. Naturalne przeszkody terenowe (grzbiety, progi, płaskie wyniosłości oraz izolowane wzgórza z deniwelacjami terenu od 20 do 100 m), utrudniają rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń emitowanych przez źródła niskie.

Poziom stężeń pyłu PM₁₀ jest uwarunkowany lokalizacją i charakterystyką źródeł emisji, a o nim decyduje struktura emisji zorganizowanej, niezorganizowanej i wtórnej głównie ze źródeł:

- komunalnych, w szczególności zlokalizowanych w obszarach starych dzielnic mieszkaniowych,
- liniowych (ciągi komunikacyjne),
- energetycznego spalania, w szczególności w lokalnych instalacjach o małej mocy wyposażonych w kotły opalane węglem,
- przemysłowych, nie posiadających skutecznych instalacji ochrony powietrza – nie spełniających wymagań najlepszej dostępnej techniki (BAT),
- obszarowych (tereny przemysłowe i poprzemysłowe, nieużytki, niezrekultywowane składowiska odpadów, termicznie czynne zwalę).

Przyczynami bezpośrednimi obserwowanych wysokich poziomów stężeń pyłu PM₁₀ są ponadto:

- stosowanie paliw niskiej jakości o wysokiej zawartości popiołu (muły) w nieprzystosowanych do tego celu paleniskach,

- wysoki udział indywidualnego ogrzewania węglowego w zaspokajaniu potrzeb grzewczych mieszkańców,
- zdekapitalizowany osprzęt w lokalnych kotłowniach małej mocy,
- duże natężenie ruchu samochodowego na głównych węzłach przebiegających przez centra miast i obszary o gęstej zabudowie i wysokiej emisji komunalnej,
- zły stan techniczny pojazdów i dróg,
- wypalanie traw i odpadów w ogrodach, pożary na terenach nieużytków,
- emisja wtórna z nierekultywowanych terenów przemysłowych (składowiska odpadów, zwały kopalniane) oraz dużych utwardzonych i zanieczyszczonych pyłem powierzchni obiektów przemysłowych i handlowych (parkingi, chodniki, torowiska kolejowe, place magazynowe itp.),
- emisja powstająca w trakcie prac budowlanych.

Mierzone stężenia pyłu wykazują cykliczność dobową i sezonowość. Wynika to z istotnego udziału niskiej emisji w sumarycznej emisji PM₁₀. Cykl dobowy jest kształtowany pod wpływem emisji komunikacyjnej i aktywności gospodarstw domowych. Cykl sezonowy jest uwarunkowany użytkowaniem źródeł ciepła oraz warunkami meteorologicznymi. Na poziom stężeń średniorocznych w decydujący sposób wpływa sezon zimowy, co jednoznacznie determinuje kierunki działań prewencyjnych (ograniczenie emisji ze źródeł komunalnych). Priorytetem w zakresie ochrony powietrza i najbardziej efektywnym sposobem dojścia do normatywnych poziomów stężeń pyłu jest realizacja zadań związanych z likwidacją niskiej emisji w centralnych częściach miast aglomeracji i wyznaczonych obszarach problemowych zarówno w zakresie ograniczenia emisji źródeł spalania w gospodarce komunalnej, jak i emisji komunikacyjnej oraz intensyfikacji działań w zakresie zapobiegania emisji wtórnej (Rozporządzenie... 2004).

2. GŁÓWNE ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA I ICH SZKODLIWE ODDZIAŁYWANIE

Nadmierne narażenie populacji na zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego, związane z omawianą niską emisją, powoduje szereg niekorzystnych skutków zdrowotnych, przejawiających się pod postacią:

- dyskomfortu i objawów podrażnienia spojówek i błon śluzowych,
- przewlekłych objawów ze strony układu oddechowego,
- zaburzeń czynności układu oddechowego,
- zwiększonej zachorowalności na choroby układu oddechowego,
- pogorszenia przebiegu istniejących chorób układu oddechowego i układu krążenia,
- przedwczesnej umieralności z powodu przewlekłych chorób układu oddechowego,
- zwiększonej częstości występowania chorób nowotworowych.

Do pyłowych i gazowych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego uznawanych za tzw. markery narażenia na zanieczyszczenia, związanych z niską emisją, zaliczamy: PM₁₀, SO₂, NO_x. Ich aktywność biologiczna jest dość dobrze poznana.

Podstawową drogą narażenia jest wdychanie zanieczyszczeń, czego bezpośrednim skutkiem jest podrażnienie górnych i dolnych dróg oddechowych i uruchomienie lokalnych procesów zapalnych oraz ich – zwykle złożonych – konsekwencji.

Dwutlenek siarki (SO_2) jest gazem powstającym podczas spalania paliw zawierających domieszkę siarki. Podstawowymi źródłami SO_2 są tzw. źródła domowe związane ze spalaniem węgla dla celów grzewczych, źródła przemysłowe oraz pojazdy mechaniczne. Stężenia SO_2 w powietrzu atmosferycznym podlegają znacznym wahaniom. W większości państw Europy, w tym w Polsce, od lat obserwuje się systematyczne obniżanie się poziomu zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki, głównie dzięki zmianie stosowanych paliw oraz wprowadzeniu tzw. kontroli emisji. Mniej korzystnie kształtuje się sytuacja w rejonach, gdzie nadal podstawowym paliwem jest węgiel, co sprawia, że zanieczyszczenia dwutlenkiem siarki i innymi produktami spalania pozostają jednym z priorytetowych problemów jakości powietrza atmosferycznego. Biologiczna aktywność SO_2 wynika z drażniącego działania tego gazu na błonę śluzową dróg oddechowych. Bezpośrednie następstwa narażenia dotyczą wystąpienia wielu objawów ze strony układu oddechowego i zaburzeń sprawności wentylacyjnej płuc, a pośrednio manifestują się także w postaci zwiększonej zachorowalności na choroby układu oddechowego i umieralności.

Dwutlenek azotu (NO_2) jest gazem występującym w powietrzu atmosferycznym w niskich stężeniach. Zwiększone stężenia NO_2 są następstwem emisji tego gazu w procesach spalania paliw stałych i benzyn oraz w niektórych procesach technologicznych, a wahania stężeń, zwłaszcza w krótkich odstępach czasu, można wiązać ze zmiennym natężeniem ruchu ulicznego/transportu samochodowego. Szkodliwe działanie gazu przejawia się m.in. wywoływaniem reakcji skurczowych oskrzeli i spadkiem sprawności wentylacyjnej płuc.

Pojęcie: zanieczyszczenia pyłowe odnosi się do mieszaniny stałych i ciekłych cząstek zawieszonych w powietrzu, o różnej wielkości, składzie, pochodzeniu i skutkach. Charakterystyka chemiczna pyłu jest bardzo różnorodna i odzwierciedla złożoność źródeł emisji. W skład pyłu mogą wchodzić także cząstki biologiczne (np. pyłki roślin, zarodniki). Normy zanieczyszczenia pyłem są oparte na pomiarach pyłu o średnicy aerodynamicznej poniżej $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}), tj. tej frakcji pyłu, która może być deponowana w końcowych odcinkach dróg oddechowych. Poza tym wyodrębnia się też pomiar pyłu o średnicy poniżej $2,5\text{ }\mu\text{m}$, charakteryzującego się większą zdolnością penetracji końcowych części układu oddechowego (pęcherzyków płucnych).

Skutki biologiczne wdychanych cząstek pyłu zależą od ich własności chemicznych i fizycznych (szczególnie rozpuszczalności), od miejsca odkładania w układzie oddechowym, od fizjologicznej „odpowiedzi” ustroju na wchłonięte zanieczyszczenia oraz od mechanizmów uszkadzającego działania na układ oddechowy. Znaczącą rolę odgrywają cząstki wnikaące głęboko do dróg oddechowych, mogące wywoływać skurcz oskrzeli oraz zaburzenia mechaniki oddychania. Ponadto, niektóre składowe pyłów np. kwaśne siarczany, mogą upośledzać funkcje nabłonka oddechowego i zmniejszać odporność układu oddechowego na infekcje, a także inicjować procesy zapalne w tkance płucnej.

Wyniki wielu badań dokumentujących szkodliwy wpływ pyłowych i gazowych zanieczyszczeń powietrza wykazały, że skutki zdrowotne zależą od stężeń zanieczyszczeń i ich kompozycji (ilościowe i jakościowe parametry narażenia), czasu narażenia, a także od podatności osobniczej na wpływ tych zanieczyszczeń (Zejda 2003).

3. SPALANIA PALIW KOPALNYCH A ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA

Wielkość emisji z poszczególnych źródeł i poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń (określonych prawnie) może być ustalona albo na podstawie pomiarów, albo obliczeń z bilansu surowcowo-paliwowego w oparciu o wskaźniki emisji zanieczyszczeń dla charakterystycznych procesów technologicznych. Mając na uwadze konieczność ograniczenia emisji substancji do powietrza, zostały wprowadzone normy ich emisji oraz programy monitoringu efektów stosowania norm i programów redukcji emisji na poziomie krajowym i regionalnym na podstawie wskaźników emisji dla poszczególnych procesów i źródeł, analizy trendów zmian emisji, pomiarów jej wielkości, porównania z normami emisji i na podstawie aktualizacji jej wskaźników w celu inwentaryzacji emisji.

W Polsce obserwuje się nadal szczególnie niekorzystną strukturę zużycia pierwotnych nośników energii, z dominującą pozycją węgla, zwłaszcza kamiennego. Jeszcze w latach 80. ubiegłego wieku udział węgla wynosił 79%, a gazu ziemnego i paliw ciekłych pochodzących z przeróbki ropy naftowej około 20% (łącznie). Obecnie udział węgla kamiennego i brunatnego wynosi 63,2%, podczas gdy udział wymienionych paliw gazowych i ciekłych stanowi 31,5%. Spalanie węgla jest nadal głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza pyłem i gazami. Zmniejszenie zużycia węgla jest więc najkrótszą drogą do redukcji emisji zanieczyszczeń.

Dziedzictwem przeszłości jest stara zabudowa mieszkaniowa w miastach i na wsi, gdzie spala się rocznie około 15 mln Mg węgla. W odróżnieniu od kotłów energetycznych i ciepłowniczych praktycznie cała emisja z pieców domowych następuje do atmosfery i przez niskie emitery, stąd też ten sposób użytkowania węgla stanowi największe zagrożenie powietrza, zwłaszcza w starych dzielnicach miejskich. Podczas spalania paliw, obok energii cieplnej, powstają liczne stałe i gazowe produkty reakcji spalania. Część z nich zawdzięcza swoje powstanie składnikom zawartym w samym paliwie, inne zaś tworzą się w wyniku reakcji zachodzących między składnikami paliwa i gazami uczestniczącymi w procesie spalania. Z kolei część produktów spalania powstaje w palenisku lub jest z niego odprowadzana (żużel), część natomiast uchodzi do powietrza atmosferycznego (tlenki węgla, azotu, siarki, pył). Zostały one omówione już wcześniej.

Ocena wielkości emisji substancji zanieczyszczających jest zadaniem trudnym. Podstawą prognozowania emisji z projektowanych instalacji przemysłowych i uogólnionych ocen emisji z zespołu instalacji, dzielnicy miasta, miasta, aglomeracji miejsko-przemysłowej, regionu i kraju są wskaźniki emisji. W celu oceny uciążliwości technologii produkcji, transportu i usług, prognozowania poziomu zanieczyszczeń atmosfery i oceny skali przedsięwzięć zmierzających do ochrony atmosfery stosuje się wskaźniki emisji zanieczyszczeń. Wyrażone są one w ilości zanieczyszczeń uchodzą-

cych w sposób zorganizowany do atmosfery z instalacji w odniesieniu do ilości wytworzonego produktu, zdolności produkcyjnej instalacji przemysłowej, ilości spalnego paliwa lub liczby kilometrów przejechanych przez pojazd wyposażony w silnik spalinowy.

Do wyznaczenia wskaźnika emisji posłużyć się można różnymi metodami. Są to:

- szczegółowe badania źródła emisji, uwzględniające zmienność parametrów technologii,
- pomiary wyrwykowe – bilans materiałowy – analiza założeń technologicznych.

Dają one wyniki o różnej dokładności. W pracach badawczych można się posługiwać bardziej uogólnioną miarą do oceny zagrożenia powietrza – mianowicie scalonym albo skumulowanym wskaźnikiem emisji. Stanowi on sumę emisji rozpatrywanych substancji przeliczonych na emisję równoważną ditlenku siarki.

Do przeliczeń emisji rzeczywistych na równoważną służy współczynnik toksyczności określany jako stosunek wartości średniorocznej normy dopuszczalnego stężenia ditlenku siarki w powietrzu i obowiązującej wartości średniorocznej normy dopuszczalnego stężenia danej substancji w powietrzu (D_a). Aby skuteczniej stosować scalony wskaźnik emisji do przeprowadzenia studiów i analiz porównawczych w zakresie użytkowania węgla w różnych urządzeniach energetycznych uznano, że korzystniej jest operować pojęciem Umownego Wskaźnika Emisji (UWE). Odpowiada on bezwymiarowemu scalonemu wskaźnikowi emisji, wyrażonemu w liczbach całkowitych (tabl. 1).

Tablica 1. Skumulowane wskaźniki emisji głównych substancji zanieczyszczających powietrze przy spalaniu węgla kamiennego w różnych paleniskach

Rodzaj paleniska	PM10	SO ₂	NO ₂	HCl	HF	B(a)P	Umowny Wskaźnik Emisji
Pyłowe	0,56	16,0	4,50	0,98	1,65	0,03	24
Mechaniczne	3,85	17,0	3,75	1,20	2,25	4,80	33
Domowe	2,80	14,4	1,12	1,20	2,25	150	172

Pominięcie rzeczywistego wymiaru kg SO₂/Mg ma na celu uniknięcie ewentualnych nieporozumień co do rodzaju emitowanych substancji zanieczyszczających przy spalaniu węgla.

Zastosowanie skumulowanych wskaźników emisji głównych substancji zanieczyszczających powietrze przy spalaniu węgla kamiennego w różnych paleniskach, umożliwia kompleksową ocenę szkodliwości emisji zanieczyszczeń. Jak wynika z uzyskanych rezultatów scalony wskaźnik emisji wyrażonej w równoważnej emisji ditlenku siarki przybiera wartości od 24 kgSO₂/Mg dla palenisk pyłowych, 33 kgSO₂/Mg dla palenisk z rusztem mechanicznym i do 172 kgSO₂/Mg dla palenisk domowych. Potwierdza to przekonanie o szczególnej szkodliwości użytkowania węgla w piecach domowych, charakteryzujących się najgorszymi parametrami procesu spalania. Trzeba podkreślić, że obliczone wskaźniki dotyczą emisji i że rzeczywiste szkodliwe oddziaływanie palenisk domowych opalanych węglem jest znacznie większe z powodu małej wysokości emitorów (Koniecznyński 2004).

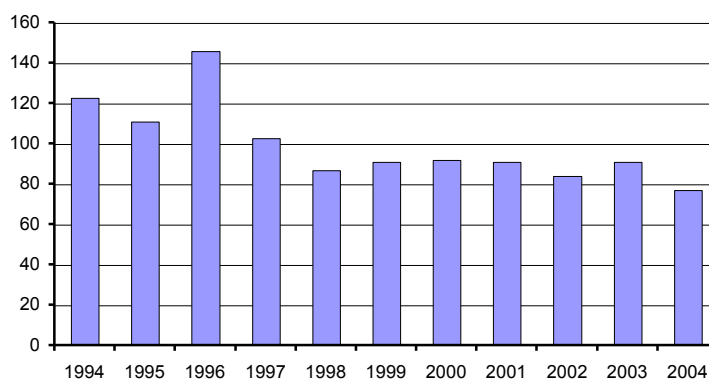
4. DZIAŁANIA NA RZECZ POPRAWY STANU POWIETRZA W ZABRZU

Zabrze – to jedno z największych miast aglomeracji górnośląskiej, zajmujące obszar 80 km², na którym mieszka 194 tys. mieszkańców. Burzliwy rozwój miasta, podobnie jak i wielu innych położonych na obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, nastąpił w XIX wieku, po odkryciu bogatych złóż węgla kamiennego. Przez 200 lat przemysł wywierał swoje piętno nie tylko na gospodarce, demografii i rozwoju cywilizacyjnym, ale także na stanie środowiska. Znikały dominujące tu niegdyś lasy, pola, łąki. Powstawały, często przy pogwałceniu wszelkich założeń urbanistycznych i zasad ochrony środowiska, kopalnie, huty, zakłady przemysłowe. Przez wiele lat wizerunkiem tego obszaru były dominujące w krajobrazie wieże wyciągowe kopalń i dymiące kominy. Rzadko mówiono o skutkach działań odczuwalnych przez mieszkańców – zanieczyszczeniu powietrza. Lata 90. XX wieku zapoczątkowały wyraźne zmiany w traktowaniu środowiska. Znacznemu ograniczeniu uległa emisja do środowiska zanieczyszczeń przemysłowych. Był to z jednej strony efekt ograniczenia produkcji, z drugiej zaś skutecznych działań podejmowanych w tym zakresie przez odpowiednie służby, urzędy oraz zainteresowane zakłady przemysłowe. W ochronie środowiska punkt ciężkości coraz bardziej przenosi się na sektor komunalny. Uzyskanie znaczącej poprawy w tym sektorze będzie jednak zdecydowanie trudniejsze niż w przemyśle. Wynika stąd, że coraz większy wpływ na stan powietrza, wody i gleby będą wywierać działania podejmowane przez samorządy – gminy i powiaty. Ich podstawą powinny być, prowadzone w szerokim zakresie działania informacyjne i edukacyjne włączające w prace na rzecz środowiska coraz większą ilość mieszkańców. Zabrze należy do miast, w których problemy związane z ochroną środowiska w sektorze komunalnym są rozwiązywane w wielu płaszczyznach. W latach 90. oddano do użytku, m.in. nowe oczyszczalnie ścieków, zbudowano stację segregacji i kompostowania odpadów, zmodernizowano szereg systemów ogrzewania. Przez wiele lat o obliczu miasta decydował przemysł ciężki. Zlokalizowane na jego terenie kopalnie, huty, koksownie stanowiły podstawę utrzymania ludności oraz dochodów miasta. Do niedawna Zabrze należało do grona najbardziej rozwiniętych przemysłowo miast Górnego Śląska. Jeszcze trzydzieści lat temu funkcjonowało tu 8 kopalń, 3 zakłady koksownicze i inne duże zakłady związane z przemysłem surowcowym. W tamtym okresie bezpośrednio lub pośrednio z przemysłem było związanych blisko 70% mieszkańców aktywnych zawodowo. Okres przemian politycznych, gospodarczych i społecznych po 1989 roku wymusił konieczność gwałtownych zmian, na które nie wszyscy byli przygotowani. Stopa bezrobocia na dzień dzisiejszy w Zabrzu szacuje się na poziomie ok. 24%, co było skutkiem tak znacznego ograniczenia produkcji przemysłowej. Lata 90. to trudny proces dostosowywania się przedsiębiorstw do wymagań gospodarki rynkowej. Sytuacja gospodarcza w mieście spowodowała konieczność opracowania podstaw strategii jego harmonijnego rozwoju. W ostatnich latach w Zabrzu obserwuje się znaczną poprawę stanu powietrza atmosferycznego (tabl. 2–6) niemniej jego ochrona przed zanieczyszczeniem jest ważnym zagadnieniem w dziedzinie ochrony środowiska.

Stan zanieczyszczenia powietrza na podstawie pomiarów zanieczyszczeń powietrza, przeprowadzonych w Zabrzu na stacji pomiarowej zlokalizowanej w Śródmieściu przy ulicy 3 Maja 64 przez Śląską Wojewódzką Stację Sanitarno-Epidemiologiczną w Katowicach:

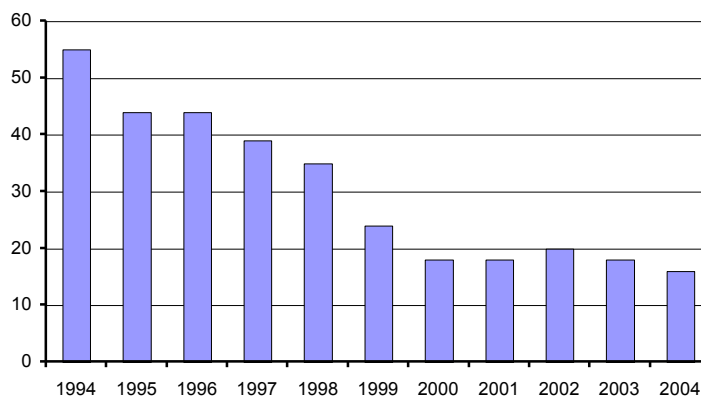
Tablica 2. Pył zawieszony, PM10 $\mu\text{m}/\text{m}^3$

Stanowisko pomiarowe	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
ZABRZE	123	111	146	103	87	91	92	91	84	91	77



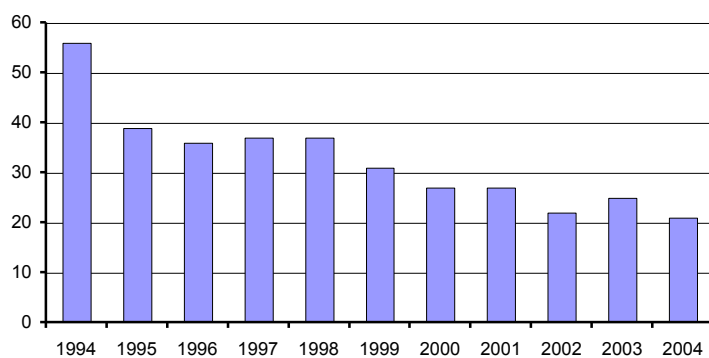
Tablica 3. SO_2 , $\mu\text{m}/\text{m}^3$

Stanowisko pomiarowe	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
ZABRZE	55	44	44	39	35	24	18	18	20	18	16



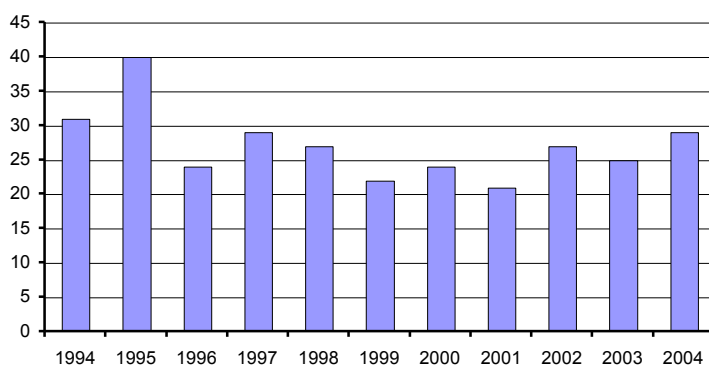
Tablica 4. NO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Stanowisko pomiarowe	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
ZABRZE	56	39	36	37	37	31	27	27	22	25	21



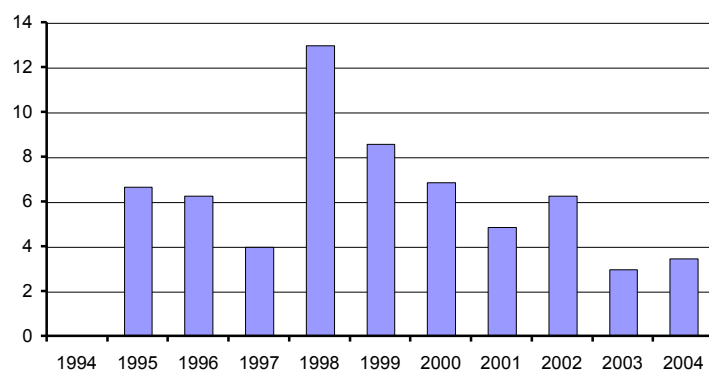
Tablica 5. NH₃, µg/m³

Stanowisko pomiarowe	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
ZABRZE	31	40	24	29	27	22	24	21	27	25	29



Tablica 6. Fenol, µg/m³

Stanowisko pomiarowe	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
ZABRZE	–	6,7	6,3	4,0	13,0	8,6	6,9	4,9	6,3	3,0	3,5



Źródłami zanieczyszczeń powietrza są:

- źródła energetyczne i przemysłowe, niska emisja, komunikacyjne źródła zanieczyszczeń, emisja niezorganizowana, emisja spoza obszaru miasta. Według danych „Rocznika statystycznego woj. śląskiego 2002”:
 - emisja zanieczyszczeń pyłowych z zakładów szczególnie uciążliwych w 2001 roku wynosiła 32,8 tys. Mg, a w tym 25,6 tys. Mg pochodziła ze spalania paliw;
 - emisja zanieczyszczeń gazowych wynosiła 34 095 tys. Mg, w tym:
 - dwutlenek węgla – 145,5 tys. Mg,
 - tlenek węgla – 125,2 tys. Mg,
 - dwutlenek węgla – 33 524 tys. Mg.

Miasto Zabrze emituje do powietrza z zakładów szczególnie uciążliwych:

- 0,6 tys. Mg/rok pyłu,
- 677,9 tys. Mg/rok zanieczyszczeń gazowych.

Jest to odpowiednio około 1,8 i 2,0% emisji w woj. śląskim.

Poza źródłami energetycznymi na terenie miasta Zabrze jest zlokalizowanych wiele kotłowni indywidualnych – około 230 sztuk oraz piece w budynkach jednorodzinnych i ogrzewania etażowe.

W tablicy 7 przedstawiono rodzaje używanych paliw w kotłowniach indywidualnych oraz ogrzewaniach indywidualnych (domach jednorodzinnych i mieszkaniach).

Tablica 7. Zużycie poszczególnych rodzajów paliw, Mg/a; tys. m³/a

Źródło ciepła	Rodzaj paliwa			
	paliwo stałe (węgiel, koks)	gaz ziemny	gaz koksowniczy	olej
1. EC Zabrze	376 021	332		79
2. Kotłownie lokalne	12 700	1 355	55 362	9 310
3. Kotłownie indywidualne	10 247	10 914		586
4. Ogrzewania indywidualne	165 691	13 446		37
RAZEM	564 659	26 047	55 362	10 012

Wielkości emitowanych zanieczyszczeń przez źródła energetyczne w Zabrzu przedstawiono w oparciu o opracowanie pt.: „Projekt założeń do planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe na obszarze miasta Zabrze”.

Tablica 8. Emisja zanieczyszczeń ze źródeł energetycznych, Mg/a w 2002 roku

Źródło ciepła	SO ₂		NO		Pył	
	Mg/a	%	Mg/a	%	Mg/a	%
1. EC Zabrze	3 626	59	1 145	68	244	4
2. Kotłownie lokalne	223	4	313	19	133	2
3. Kotłownie indywidualne	130	2	29	2	293	5
4. Ogrzewania indywidualne	2 121	35	183	11	4 971	89
RAZEM	6 100	100	1 670	100	5 641	100

Źródło: Program ochrony środowiska dla miasta Zabrze.

Największy udział w ogólnej emisji zanieczyszczeń pyłem – 89%, mają ogrzewania indywidualne, spalające paliwa stałe. Wynika to z ich największego udziału, to aż 40% w pokryciu potrzeb ciepłych miasta. Zanieczyszczenia emitowane podczas spalania paliw dla celów grzewczych i bytowych w gospodarstwach domowych, lokalnych kotłowniach stanowią podstawową część zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. Potwierdzają to pomiary stężenia pyłu oraz zanieczyszczeń gazowych wykonywane w okresie letnim oraz w sezonie grzewczym.

Zestawienie przypadków przekroczeń dopuszczalnego poziomu stężeń pyłu PM10 powiększonego o margines tolerancji – stężenie 24-godzinne w 2002 roku w Zabrzu przedstawiono w tablicy 9.

Tablica 9.

Stano- wisko pomia- rowe	MIESIĄC												Przekroczenie w sezonie		Udziały przekroczeń w sezonie, %	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	zimo- wym	letnim	zimo- wym	letnim
Zabrze	10	7	4	2	–	–	–	1	4	3	7	11	42	7	86	14

Przyczyną przekroczeń jest duży udział węgla w produkcji ciepła oraz fakt, że jest on spalany w źródłach ciepła o małych, głównie ułamkowych mocach cieplnych. Ilość węgla spalana w kotłowniach lokalnych oraz w ogrzewaniach indywidualnych w Zabrzu, według stanu na 2000 rok, wynosiła 188,64 tys. Mg/rok. W ilości tej uwzględniono węgiel spalany w kotłowniach indywidualnych, ogrzewaniach etażowych i piecach kaflowych w budownictwie mieszkaniowym. W paleniskach domowych węgiel jest ciągle spalany ze zbyt małą sprawnością, a niskie kominy (poniżej 40 metrów) są znacznymi źródłami zanieczyszczenia powietrza, określanego mianem niskiej emisji. Proces likwidacji niskiej emisji jest procesem wieloletnim i wymaga przygotowania programu uwzględniającego techniczne i ekonomiczne uwarunkowania podłączenia zasobów mieszkaniowych wielorodzinnych do systemu ciepłowniczego i gazowniczego. Odnosi się to głównie do budynków będących obecnie własnością gminy.

W zapotrzebowaniu mocy cieplnej miasta 71% stanowią potrzeby budownictwa mieszkaniowego, w tym jednorodzinne – 16% i wielorodzinne – 55%. Dla 58% potrzeb ciepłych budownictwa mieszkaniowego ciepło jest produkowane w indywidualnych kotłach węglowych o niskiej sprawności wytwarzania i piecach ceramicznych opalanych węglem – jak to zostało opisane wyżej.

Drugim co do wielkości sposobem pokrycia potrzeb ciepłych budynków mieszkalnych są ciepłownicze systemy sieciowe. Pokrywają one 27% mocy cieplnej. Zapotrzebowanie ciepła odbiorców wynosi 722 MW. Pokrycie zapotrzebowania ciepła zapewniają:

- system ciepłowniczy centralny (EC) – 206 MW,
- systemy ciepłownicze lokalne – 72 MW,
- kotłownie indywidualne – 78 MW,
- ogrzewania indywidualne – 366 MW.

W kotłowniach i ogrzewaniach indywidualnych partycypują:

- system gazowniczy – 96 MW,
- system elektroenergetyczny – 20 MW.

Największy udział w pokryciu, bo aż 45%, mają kotłownie i ogrzewania indywidualne na paliwo stałe. Jak wspomniano powyżej są to źródła tzw. niskiej emisji, wśród których zdecydowanie przeważają kotły o mocach $<0,1$ MW i piece kaflowe (Materiały...).

Działania mające na celu poprawę jakości powietrza są prowadzone w Zabrzu od ponad 10 lat:

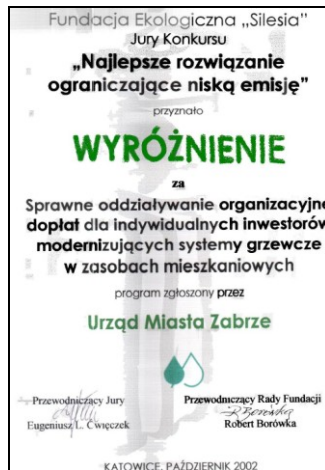
- w mieście zgazyfikowano wiele dzielnic,
- od grudnia 1994 roku obowiązuje uchwała intencyjna Rady Miejskiej w sprawie ograniczenia niskiej emisji poprzez zakaz tworzenia nowych i odtwarzania podczas remontów kapitalnych węglowych systemów grzewczych w lokalach mieszkaniowych, użytkowych i obiektach użyteczności publicznej stanowiącej własność gminy,
- zwrócono się również z apelem do wszystkich właścicieli, administratorów, użytkowników budynków i lokali mieszkalnych bądź użytkowych, w których są stosowane do ogrzewania paleniska węglowe, o zmianę tych systemów,
- od 1994 roku (powstanie Gminnych i Powiatowych Funduszy Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej) opracowano program częściowego dofinansowywania przez Urząd Miejski w Zabrzu – Wydział Ekologii zmiany systemu ogrzewania na proekologiczny; program ten jest przeznaczony dla osób fizycznych będących najemcami lub właścicielami mieszkań w domach jedno- lub wielorodzinnych, podmiotów gospodarczych oraz właścicieli lub użytkowników obiektów użyteczności publicznej (tabl. 10),
- Fundacja Ekologiczna „Silesia”, dostrzegając problem niskiej emisji, organizuje od kilku lat konkurs pt. „Najlepsze rozwiązanie ograniczające niską emisję”, aktywizując tym samym gminy do podejmowania działań ograniczających niską emisję.

Tablica 10. Liczba zrealizowanych wniosków z zakresu zmiany systemu ogrzewania z Gminnego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Rok	Zrealizowana liczba wniosków	Kwota refundacji, zł
1994	243	136 900,00
1995	252	278 240,00
1996	481	479 728,00
1997	392	375 614,00
1998	395	455 653,00
1999	446	540 039,00
2000	644	873 200,00
2001	627	799 138,00
2002	657	876 118,00
2003	783	993 070,00
2004	714	899 650,00
RAZEM	4920	6 707 350,00

Źródło: UM Zabrze, Wydział Ekologii.

W 2002 roku miasto Zabrze otrzymało wyróżnienie za sprawne oddziaływanie organizacyjne dopłat dla indywidualnych inwestorów modernizujących systemy grzewcze w zasobach mieszkaniowych. W październiku 2002 roku odbyła się uroczystość wręczenia nagród i wyróżnień w konkursie „Najlepsze rozwiązanie ograniczające niską emisję w okresie od 31 maja 2001 do 30 czerwca 2002 roku”. Komisja konkursowa postanowiła nagrodzić i wyróżnić te gminy, w których modernizacje wynikają z programów aktywnie redukujących niską emisję. Znaczący przy ocenie stosownych wniosków był także aspekt społeczny i edukacyjny przedsięwzięć oraz uwzględnienie czynnika ekonomicznego w odniesieniu do mieszkańców gminy.



Likwidacja niskiej emisji stanowi priorytetowe zadanie w realizacji polityki ekologicznej miasta. Zakładając, że w ciągu roku eliminuje się średnio około 1500 ton węgla o zawartości 7% popiołu i 0,66% siarki, uzyskuje się efekt ekologiczny w postaci:

- zmniejszenia emisji pyłu o 21 ton,
- zmniejszenia emisji SO_2 o 15,84 ton.

PODSUMOWANIE

Szczególnego znaczenia nabiera ograniczenie spalania węgla w piecach domowych w celu ogrzewania mieszkań i przygotowania posiłków. Udział źródeł przemysłowych sukcesywnie maleje w miarę procesu restrukturyzacji przemysłu. Wprowadzenie wymagań w zakresie najlepszych dostępnych technik redukcji emisji (BAT) przyczyni się do dalszego spadku udziału emisji z sektora przemysłowego w stężeniach pyłu PM_{10} . Rozwiązanie tego problemu natrafia na trudności z powodu sprzeczności między doraźnym interesem grupy obywateli użytkujących piece węglowe a regułami gospodarki rynkowej. Najprostszym rozwiązaniem niskiej emisji pochodzącej ze spalania węgla jest zastąpienie go olejem lub gazem opałowym. Jest to jednak zbyt kosztowne dla wielu obywateli, dla których węgiel pochodzący z różnych źródeł jest znacznie tańszy od gazu i oleju opałowego.

Zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza przez niską emisję to nie tylko zmiana paliwa węglowego na gaz czy olej lub instalacja filtrów, to także zmniejszenie strat ciepła, co w sposób oczywisty skutkuje zmniejszeniem emisji spalin. Doświadczenie pokazuje, że energia marnowana jest przede wszystkim tam, gdzie brakuje pieniędzy na to, by ją oszczędzać. Do zabiegów prostych i niekosztownych prowadzących do oszczędności należy zaliczyć przede wszystkim: naprawę i uszczelnianie stolarki okiennej, likwidację zbędnych przeszkleń, izolację stropów nad ostatnią kondygnacją, instalację ekranów zagrzejnikowych, instalację automatyki pogodowej czy też docieplenie ścian zewnętrznych.

W Zabrzu w celu ograniczenia niskiej emisji stale jest rozbudowywana sieć ciepłownicza, wiele obiektów (m.in. szkoły) otrzymało też lokalne kotłownie gazowe. Modernizacji poddano również same „źródła ciepła” eksploatowane przez Zabrzeńskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej. W niektórych kotłowniach węgiel został zastąpiony przez gaz i olej opałowy, inne wyposażono w nowoczesne instalacje filtracyjne.

Interwencja państwowa w postaci alokacji środków wnoszonych przez podatników powinna być racjonalna, a więc oparta na ocenie relacji nakład finansowy – efekt ekologiczny.

Literatura

1. Koniecznyński J. (2004): *Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami. Metody, aparatura i instalacje*. Gliwice, Politechnika Śląska.
2. Koniecznyński J., Pasoń-Koniecznyńska A. (2004): *Energetyczne spalanie węgla a emisja zanieczyszczeń powietrza*. W: Zarządzanie energią w miastach (R. Zarzycki red.) Łódź, Polska Akademia Nauk, Oddział w Łodzi, Komisja Ochrony Środowiska.
3. Materiały Urzędu Miejskiego w Zabrzu – sprawozdania z wydatkowania środków Gminnego Funduszu Ochrony Środowiska przez Wydział Ekologii.
4. Program ochrony środowiska dla miasta Zabrza na lata 2004–2015 – załącznik do Uchwały Nr XXVI/263/04 Rady Miejskiej w Zabrzu z dnia 17 maja 2004 r. – www.um.zabrze.pl.
5. Rozporządzenie nr 17/2004 Wojewody Śląskiego z dnia 24 marca 2004 r. w sprawie określenia programu ochrony powietrza dla strefy p/n Aglomeracja Górnośląska (Dz. Urz. Woj. Śl. Nr 23, poz. 793).
6. Śląska Wojewódzka Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna w Katowicach. Biuletyn: Zanieczyszczenie atmosfery w woj. śląskim w latach 1994–2004 (Roczniki).
7. Zejda J. (2003): *Pyły nadal groźne*. Ekoprofit nr 1(65), s. 7–9.

Recenzent: prof. dr hab. Jan Koniecznyński

Marek Rotkegel, Sławomir H. Bock, Marcin Skuplik

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH I ICH POŁĄCZEŃ. MOŻLIWOŚCI I SPOSOBY KORZYSTANIA Z BIBLIOTEKI TYPOWYCH ELEMENTÓW

Streszczenie

Biblioteka typowych elementów i symboli została wykonana w Zakładzie Technologii Eksploatacji i Obudów Górniczych w Pracowni Projektowania Obudowy Chodnikowej i Utrzymania Wyrobisk w ramach działalności statutowej GIG w 2004 roku. Zawiera ona przede wszystkim zestaw typowych elementów konstrukcyjnych – kształowników wykorzystywanych przy projektowaniu obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń. Zostały opracowane również szablony rysunków, tabliczki i style wydruków. Generalnie biblioteka działa w środowisku AutoCAD’a w wersji 2000 lub nowszej, możliwe jest jednak, po drobnych modyfikacjach, używanie jej w innych środowiskach przystosowanych do czytania plików typu dwg i dxf. W artykule przedstawiono sposób tworzenia biblioteki oraz jej strukturę i możliwości rozbudowy. Zaprezentowano także przykład jej wykorzystania przy tworzeniu dokumentacji. Niniejsze opracowanie może ponadto stanowić przewodnik po opracowanym systemie.

Computer-aided designing of road mine working supports and junctions. Possibilities and manners of profiting from a library of typical elements

Abstract

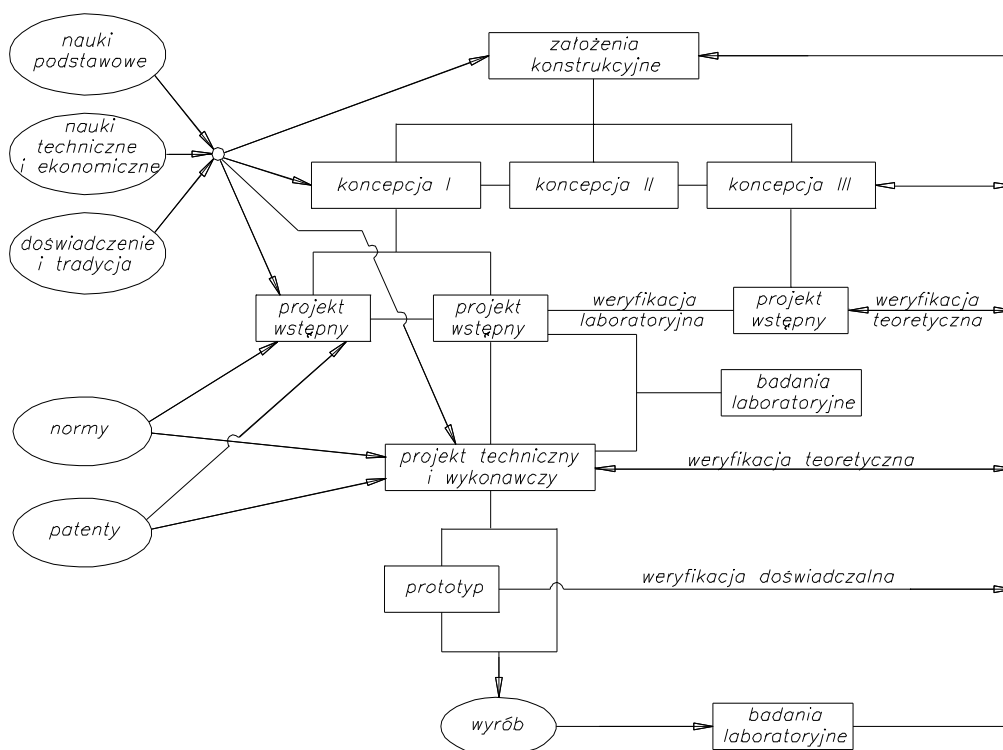
A library of typical elements and symbols has been developed in Laboratory of Road Support Design and Mine Workings Maintenance of Department of Extraction Technologies and Mining Support in the framework of statutory activity of CMI in 2004. It contains, first of all, a set of typical constructional elements – sections used at designing of road supports and junctions. There were developed also patterns of drawings, plates and styles of printouts. Generally, library acts in environment of AutoCAD ver. 2000 or newer. However, after slight modifications, it is possible to use it in other environments adapted to reading files of type dwg or dxf. In the paper, a manner of library creation, its structure and possibilities of extension were also presented. An example of its utilisation in production of documentation was also described. Furthermore, this paper may serve as a guideline to the system developed.

WPROWADZENIE

Proces wytwórczy, także obudowy chodnikowej, jest niczym innym, jak tworzeniem i przetwarzaniem informacji. Najpierw zostaje sformułowany problem techniczny, potem są tworzone koncepcje projektowe i rozwiązywane zadania konstrukcyjne, a na końcu są sporządzane rysunki, opisy i wykazy części (Podstawy konstrukcji maszyn 1995). Dalej, w oparciu o dokumentację, może powstać gotowy wyrób.

Celem konstruowania jest tworzenie nowych obiektów technicznych, wynikających z określonych potrzeb i możliwości ich realizacji. Konstruowanie jest procesem ciągłym, realizowanym etapowo, ponieważ po zaspokojeniu jednych potrzeb,

powstają kolejne. Pierwszym krokiem zawsze jest sprecyzowanie potrzeby. W dalszej części procesu należy rozstrzygnąć wiele problemów, wśród których najważniejsze są problemy techniczne i ekonomiczne. Ogólny schemat procesu konstruowania przedstawiono na rysunku 1 (Podstawy konstrukcji maszyn 1995).



Rys. 1. Przebieg procesu konstruowania (Podstawy konstrukcji maszyn 1995)

Fig. 1. Course of constructing process (Basics of machines construction 1995)

Wyborów oraz decyzji, na różnych etapach konstruowania, podejmuje się korzystając z różnych kryteriów, z których najważniejszymi są: kryterium bezpieczeństwa i kryterium funkcjonalności, rozumiane jako spełnianie wszystkich zadań stawianych nowej konstrukcji. Istotne są także kryteria masy, ekonomiki użytkowania oraz technologiczności (Dietrich 1974; Dziama 1985; Podstawy konstrukcji maszyn 1999; Osiński, Wróbel 1995). Obudowa wyrobisk powinna być tak zaprojektowana, aby mogła oprzeć się działaniom sił podczas wznoszenia i użytkowania w określonym czasie, właściwie zachowywać się w normalnych warunkach użytkowania, a także utrzymywać konstrukcyjną całość w przypadku sytuacji ekstremalnych.

Poważnym sprzymierzeńcem konstruktora w jego działaniach jest w dzisiejszych czasach technika komputerowa, z systemami CAD (*computer aided design*) i CAM (*computer aided manufacturing*) na czele (Osiński, Wróbel 1995). Bez tych systemów trudno sobie wyobrazić współczesny proces wytwarzania. Zalety tych systemów są oczywiste. Wynikają one, między innymi, z ciągle wzrastających możliwości

sprzętowych i programowych. Ponadto wraz z rozwojem profesjonalnego oprogramowania wspomagającego proces projektowy systemy te stają się coraz bardziej przystępne dla użytkownika, a ich obsługa w coraz większej mierze intuicyjna. Doświadczenia ostatnich kilkunastu lat, nabyte przez producentów oprogramowania, owocują coraz szerszą gamą specjalistycznych narzędzi w ramach każdego z programów.

Wysoka cena profesjonalnego oprogramowania, zwłaszcza pełnych wersji, sprawia, że dla wielu przedsiębiorstw jest ono trudno dostępne. Ponadto posiadanie samego oprogramowania bez specjalistycznych nakładek i bibliotek typowych elementów w wielu przypadkach nie wpływa znacząco na przyspieszenie prac projektowych. Proces projektowania odrzwi obudowy chodnikowej może być dobrym przykładem. Zaprojektowanie lub choćby narysowanie nawet pojedynczych odrzwi (nie tylko w programie CAD) jest procesem uciążliwym, sprowadzającym się w zasadzie do ciągłego przeliczania długości elementów łukowych i zakładek na kąty. W przypadkach tych rozwiązaniem są nakładki lub specjalistyczne oprogramowanie, na przykład napisana w pakiecie Delphi (Reisdorph 1999) aplikacja ODRZWIA (Rotkegel 2003a, b).

W innych przypadkach komputerowego projektowania niezastąpione są wspomniane wcześniej biblioteki typowych elementów. Oczywiście, w czasie normalnej pracy z systemami CAD, samoczynnie powstają zbiory danych, które często stanowią pokaźne biblioteki. Konieczne jest jednak ich uporządkowanie i wprowadzenie, przynajmniej w ramach pracowni, jednolitych zasad ich tworzenia. Właściwe ich skonstruowanie i zarządzanie nimi pozwala na znaczne skrócenie czasu projektowania nowego wytworu. Uzyskuje się to poprzez przywoływanie (wczytywanie) powtarzalnych elementów zamiast rysowania ich za każdym razem od nowa. Biblioteki typowych elementów i symboli nie są niczym nowym w dziedzinie komputerowego wspomagania projektowania. Można powiedzieć, że to właśnie one są podstawą sukcesu systemów CAD. Projektując jakikolwiek wyrób zawsze staramy się w maksymalnym stopniu wykorzystać elementy zaprojektowane wcześniej, opierając się na tradycji i doświadczeniu. W projektowaniu komputerowym sprowadza się to bardzo często do adaptacji istniejącej już dokumentacji rysunkowej w całości lub we fragmentach.

Oferta gotowych komercyjnych wersji bibliotek jest bardzo bogata. Część tych bibliotek jest dostępna w sieci (Szewczyk 2002a, b). Nie zawsze jednak tworzą one uporządkowane zbiory, a ponadto daje się dostrzec lukę w dziedzinie elementów wykorzystywanych przy projektowaniu obudowy wyrobisk korytarzowych, zwłaszcza rozwiązań nowych, oryginalnych. Dlatego też podjęto działania zmierzające do zbudowania takiej biblioteki oraz ujednolicenia formy dokumentacji rysunkowej tworzonej w Zakładzie Technologii Eksploatacji i Obudów Górniczych GIG, przeznaczonej na platformę AutoCAD.

1. SPOSOBY BUDOWY BIBLIOTEKI

Pomijając ingerencję w kod komercyjnego programu, zawsze związaną z niebezpieczeństwem utraty stabilności zarówno programu CAD, jak i całego systemu operacyjnego, generalnie istnieją dwa sposoby wprowadzania (budowy) elementów biblioteki. Jednym jest opracowanie całego szeregu nowych instrukcji powodujących rysowanie poszczególnych elementów za każdym razem od początku. Rozwiązanie takie jest dość zaawansowanym sposobem noszącym znamiona profesjonalnego narzędzia. Obarczone jest jednak pewnymi niedogodnościami, z których istotne jest działanie na jednej platformie programowej, np. pełnej wersji AutoCAD'a. Mankament ten może w wielu przypadkach zupełnie dyskwalifikować takie narzędzie. Ponadto dla sprawnego użytkowania takiej nakładki konieczne jest zapoznanie się z nowymi instrukcjami. Alternatywnym rozwiązaniem jest zbudowanie biblioteki w oparciu o odrębne pliki – gotowe rysunki poszczególnych elementów, które bez przeszkód mogą zostać wstawione do projektu jako bloki. Dzięki temu importowanie dowolnego elementu sprowadza się we wszystkich przypadkach do tej samej instrukcji i wskazania pliku z właściwym rysunkiem. Daje to także możliwość łatwiejszej edycji wstawianych elementów. Za taką budowę biblioteki przemawia także dostępne w Zakładzie Technologii Eksploatacji i Obudów Górniczych oprogramowanie. Dysponując głównie programem AutoCAD w wersji LT zainstalowanym na kilku komputerach, takie podejście do zagadnienia wydaje się być optymalne.

1.1. Przyjęta metodyka i zasady budowy elementów biblioteki

Przystępując do budowy biblioteki konieczne jest dokładne określenie zasad rysowania poszczególnych elementów. Zachowanie tych zasad i konsekwencja w tworzeniu elementów procentuje przy właściwym projektowaniu – niezależnie od typu elementu i jego kształtu pozwala na intuicyjne wprowadzanie do rysunku oraz w minimalnym stopniu wpływa na zwiększenie objętości plików.

W związku z powyższym przyjęto we wszystkich rysowanych kształtownikach początek układu współrzędnych (tzw. uchwyt wstawianego bloku) na dolnej półce (w przypadku kątownika ramieniu) lub na denku kształtowników korytkowych. Ponadto w zdecydowanej większości profili leży on na ich pionowej osi symetrii. Natomiast w przypadku odrzwi początek układu współrzędnych jest umiejscowiony w miejscu kontaktu lewego elementu ociosowego ze spągami. W przypadku śrub jest to punkt przecięcia osi z łbem, a w tabliczkach rysunkowych początek układu współrzędnych znajduje się w ich lewych dolnych rogach. Ułatwia to ich wstawianie do ramki rysunku. Wszystkie zarysy elementów są narysowane na warstwie podstawowej – „0”. Jedynie kreskowanie zostało umieszczone na łatwej do wyłączenia warstwie „7_Kreskowanie”, a linia gwintu na warstwie „2_Dim”.

1.2. Przykłady budowy elementów biblioteki

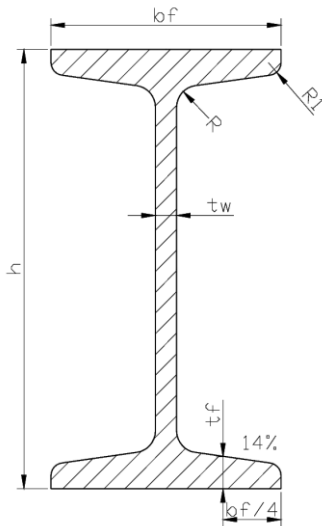
Tworzenie biblioteki typowych elementów, takich jak np. dwuteowniki, ceowniki, składa się z wielu powtarzających się czynności. Rysowanie poszczególnych elementów jest w związku z tym uciążliwe i monotonne, a przez to nieefektywne.

Wielką pomocą w takich przypadkach jest specjalistyczny język programowania – AutoLISP (Smith, Gesner 1995; Pikoń 2003). Pozwala on na automatyzację wielu czynności edycyjnych i umożliwia tworzenie nowych i modyfikację istniejących obiektów i programowanie AutoCAD'a. Możliwe jest również dodawanie własnych funkcji do rysowania i wykonywania obliczeń, czy dodawanie własnych komend. W efekcie możliwe jest stworzenie całej aplikacji działającej w środowisku AutoCAD'a, z własnym interfejsem graficznym.

Budowanie całych aplikacji za pomocą AutoLISP'u jest przedsięwzięciem trudnym, wymagającym czasu i doświadczenia. Z drugiej strony wystarcza kilka komend, by znacząco przyspieszyć proces tworzenia opisywanej biblioteki.

Aby zautomatyzować tworzenie podobnych elementów biblioteki wykorzystano proste skrypty.

Przykładowy skrypt generujący dwuteowniki normalne według PN-91/H-93407 przedstawiony jest na listingu 1. Po pobraniu charakterystycznych wymiarów, pokazanych na rysunku 2, skrypt wyrysowuje obiekt i zapisuje go pod nazwą I[wyróżnik].dxf, np. I80.dxf.



Rys. 2. Charakterystyczne wymiary dwuteownika normalnego

Fig. 2. Characteristic dimensions of normal double-tee bar

Listing 1

```
;;; Generator dwuteowników normalnych wg PN-91/H-93407

; utworzenie nowej warstwy "7_Kreskowanie", przypisanie jej koloru 3 (zielonego) z pomocą
; komendy layer (command "_layer" "_new" "7_Kreskowanie" "_color" "3" "7_Kreskowanie"
; "" "_set" "_osmode" "0")

; przypisanie zmiennej PATH ścieżki, gdzie będą zapisywane pliki dxf
(setq PATH "E:\\biblioteka\\")

; właściwa część skryptu – funkcja repeat n powtarza pętlę n-razy
```

```

(repeat 50
; przypisanie zmiennym określającym dany dwuteownik wartości odczytane z klawiatury
  (setq
    h (getreal "\n h: ")
    bf (getreal "\n bf: ")
    tw (getreal "\n tw: ")
    tf (getreal "\n tf: ")
    r (getreal "\n r: ")
    r1 (getreal "\n r1: ")

    ; obliczanie poszczególnych współrzędnych punktów, z których będzie
    ; składał się obiekt
    x1 0
    y1 0
    x2 (+ x1 (/ bf 2))
    y2 y1
    x3 (+ x1 (/ bf 4))
    y3 (+ y1 tf)
    x4 (+ x3 10)
    y4 (- y3 1.4)
    x5 (+ x1 (/ tw 2))
    y5 (+ y1 (/ h 2))
    y6 (- y5 3)
    y7 (+ y1 (/ tf 3))

    ; przypisanie punktom odpowiednich współrzędnych
    P1 (list x1 y1)
    P2 (list x2 y1)
    P3 (list x3 y3)
    P4 (list x4 y4)
    P5 (list x5 y5)
    P6 (list x5 y6)
    P7 (list x2 y7)
    P8 (list x1 y5)
    Z1 (list x2 y1)
    Z2 (list (- x1 x2) h)

  )
(command
  ; zmiana aktualnej warstwy na warstwę "0"
  " layer" " set" "0" ""
  ; powiększenie obszaru zawartego między Z1 i Z2
  ".zoom" "_window" Z1 Z2
  ; wyrysowanie szkieletu obiektu
  " .LINE" P1 P2 P7 ""
  " .LINE" P3 P4 ""
  " .LINE" P5 P6 ""
  ; zaokrąglenie wybranych rogów obiektu

```

```

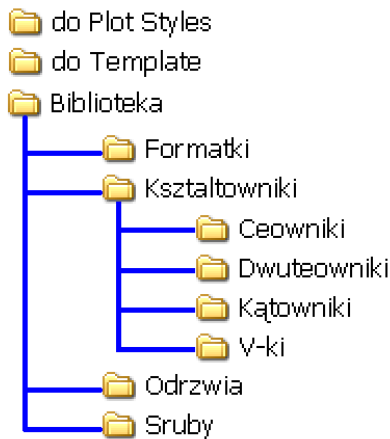
" _FILLET" " R" R " _FILLET" P7 P4
" _FILLET" " _R" R1 " _FILLET" P3 P6
)
; odbicie lustrzane, stworzenie regionu i zakreskowanie
(command " _mirror" (ssget "X") "" "0,0" "0,10" "N"
" _mirror" (ssget "X") "" P5 P8 "N"
" _region" (ssget "X") ""
" _layer" " _set" "7_Kreskowanie" ""
" _hatch" "ansi31" (/ bf 50) "0" P1 ""
)
; zapisanie gotowego obiektu w formacie dxf
(command " _dxfout" (strcat PATH "I" (itoa (fix h))) "6")
(command)

; zakończenie pętli – kasowanie obiektu i czyszczenie bazy danych rysunku
(getstring "Enter - następny, Esc - rezygnacja")
(command " _erase" (ssget "X") ""
" _purge" " _ALL" "*" "n")
)

```

2. OPIS STRUKTURY SYSTEMU

Opracowana biblioteka składa się z ponad pół tysiąca bloków – rysunków gotowych do wstawienia do aktualnego projektu. Wszystkie elementy są w pełni kompatybilne z podstawowym szablonem rysunku. Rozumie się przez to wykorzystanie tych samych warstw rysunkowych i stylów poszczególnych elementów, co prowadzi do minimalnego zwiększenia objętości rysunku. Elementy biblioteki zebrano w czterech grupach, przy czym jedna z grup (Kształtowniki) zawiera w sobie cztery podgrupy. W poszczególnych folderach zebrano elementy zbliżone kształtem lub zastosowaniem. I tak w folderze „Formatki” zebrano ramki najczęściej stosowanych formatów rysunkowych, tabliczki rysunkowe i zestawienie detali (Dobrzański 2004). W katalogu „Kształtowniki” zebrano najczęściej wykorzystywane profile opracowane w oparciu o PN i tablice wyrobów hutniczych (Bogucki, Żybertowicz 1996), są to ceowniki normalne (PN-86/H-93403), ceowniki ekonomiczne (PN-71/H-93451), dwuteowniki stalowe szerokostopowe HEB (IPB) walcowane na gorąco (PN-H/93452), dwuteowniki stalowe równoległoscienne IPE walcowane na gorąco (PN-91/H-93419), dwuteowniki normalne (PN-91/H-93407), kątowniki nierównoramienne (PN-81/H-93402), równoramienne (PN-84/H-93401) oraz podstawowe profile na obudowy chodnikowe – kształtowniki korytkowe KS21 i KO21 (PN-H-93441-2) jak również kształtowniki stalowe typu V (PN-H-93441-3). Odrębne grupy stanowią śruby z łbem sześciokątnym (PN-85/M-82101) oraz typowe odrzwia zgodne z normami PN-93/G-15000/02 i PN-93/G-15000/03. Dodatkowymi folderami są katalogi o nazwach „do Plot Styles” i „do Template” zawierające szablony odpowiednio wydruku i podstawowego rysunku, wczytywanego automatycznie przy uruchomieniu AutoCAD’a. Na rysunku 3 przedstawiono strukturę całej biblioteki.



Rys. 3. Struktura opracowanej biblioteki

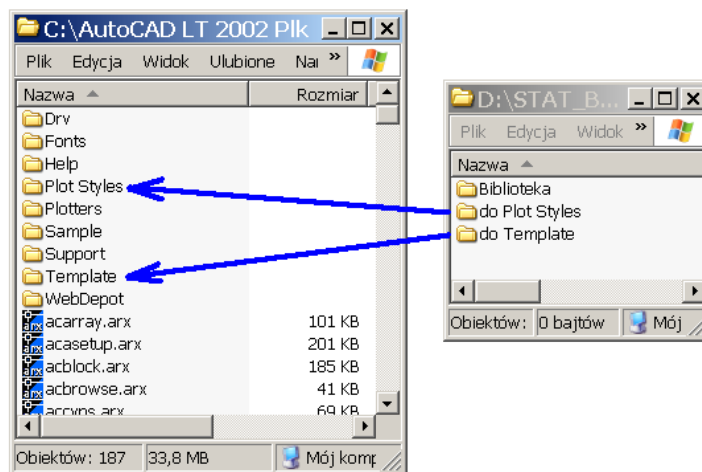
Fig. 3. Structure of worked out library

3. MOŻLIWOŚCI I SPOSOBY KORZYSTANIA

Do pełnego wykorzystania opracowanej biblioteki konieczne jest wprowadzenie jej do systemu komputerowego, a w przypadku szablonów „zagnieżdzenie” ich w katalogach programu AutoCAD.

3.1. Instalacja biblioteki

Instalacja biblioteki polega na skopiowaniu plików z katalogów „do Plot Styles” oraz „do Template” do odpowiadających im odpowiednio katalogów – „Plot Styles” i „Template”. Foldery te znajdują się w katalogu głównym programu AutoCAD, jak to pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Instalacja biblioteki elementów

Fig. 4. Installation of library of elements

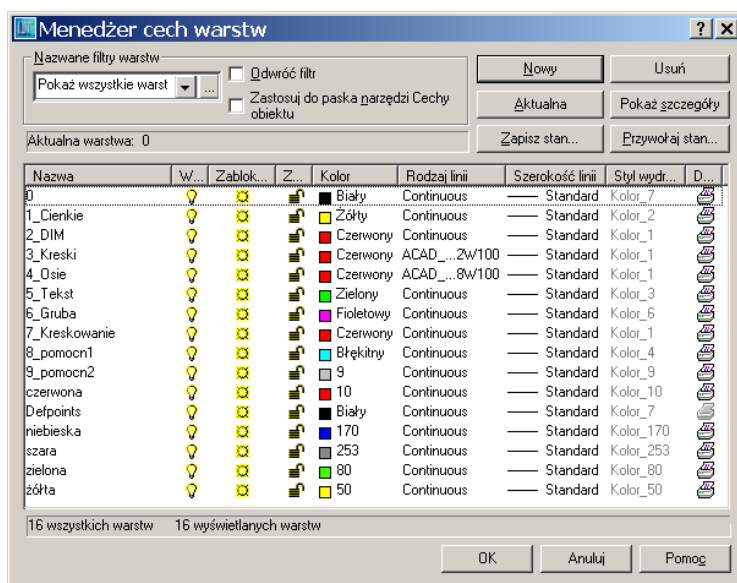
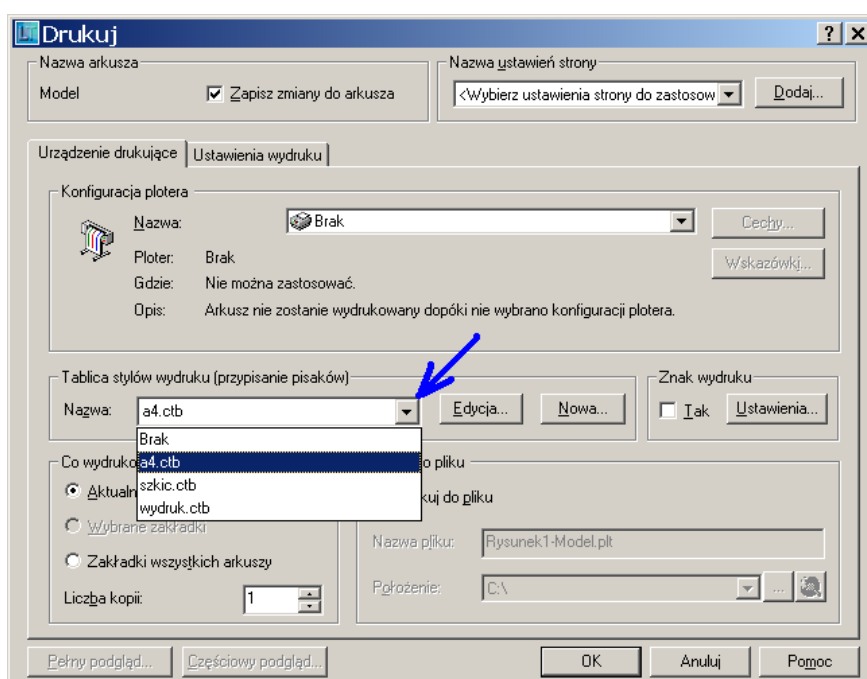


Fig. 5. Layers formed in basic pattern of drawing

Jak wcześniej wspomniano dla właściwej pracy z biblioteką konieczne jest przekopiowanie stylów wydruku (Plot Styles). W folderze znajdują się trzy podstawowe style wydruku, które można po zainstalowaniu wykorzystywać przy drukowaniu rysunków. Wyboru właściwego stylu dokonuje się w oknie **Drukuj** na zakładce **Urządzenie drukujące**, jak to pokazano na rysunku 6. Opracowane zostały trzy style wydruku. Najważniejszym jest styl **wydruk**. Wybranie tego stylu powoduje

wydrukowanie rysunku z zachowaniem grubości linii zgodnych z zasadami rysunku technicznego. Styl ten doskonale nadaje się do wydruków ostatecznych na pełnym formacie rysunkowym. W przypadku stylu **A4** grubości linii zostały proporcjonalnie zmniejszone. Styl ten jest przeznaczony przede wszystkim do wydruków próbnych, dużych rysunków na formacie A4 oraz rysunków koncepcyjnych. Trzecim stylem wydruków jest **szkic**. Wszystkie obiekty niezależnie od przypisanego im koloru są drukowane linią o jednakowej grubości. Szablon ten jest dedykowany przede wszystkim wydrukowi koncepcyjnym i szkicom.

Wszystkie elementy narysowane na warstwach podstawowych (0–9) są drukowane jako czarne. Elementy narysowane na pozostałych warstwach mają przypisane odpowiednie kolory, zgodne z wyświetlaniem na ekranie monitora. Ważne jest, że opisane wyżej style wydruku są dostępne po ich skopiowaniu do odpowiedniego katalogu, jak to przedstawiono wcześniej na rysunku 4.

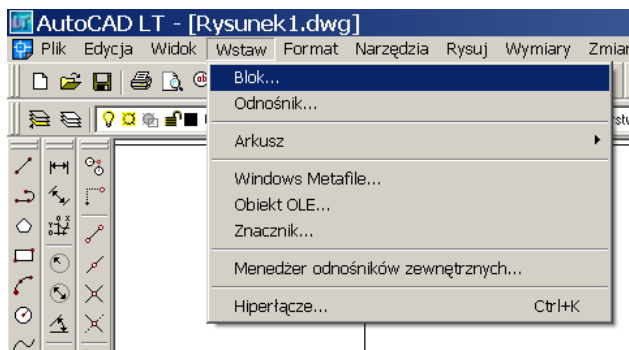


Rys. 6. Dostępne style wydruku

Fig. 6. Accessible styles of printout

3.2. Wczytywanie elementów z biblioteki

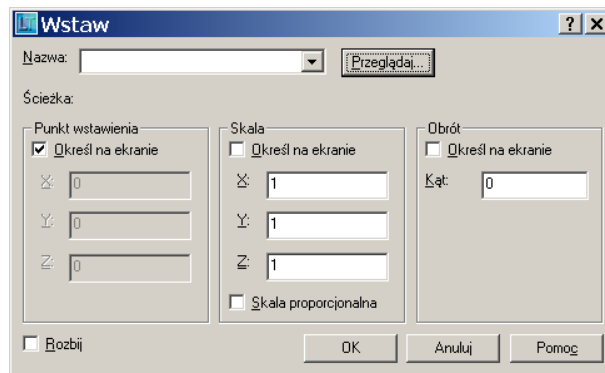
Proces importu elementów do podanego rysunku odbywa się za pomocą wczytywania odpowiedniego bloku (pliku). Pogrupowane są one w **Bibliotece** w podkatalogach, zgodnie z konwencją przedstawioną wcześniej na rysunku 3. Aby wczytać wymagany element należy z menu wybrać polecenie **Wstaw** → **Blok**, jak na rysunku 7.



Rys. 7. Podgląd wywołania wstawiania bloku

Fig. 7. View of block inserting call

Powoduje to wyświetlenie okna przedstawionego na rysunku 8, pozwalającego na wybór wstawianego elementu (przycisk **Przełączaj**) oraz na określenie parametrów importowanego obiektu. Parametry te można także zmieniać z dowolnym innym momencie procesu projektowania.



Rys. 8. Okno wstawiania bloku

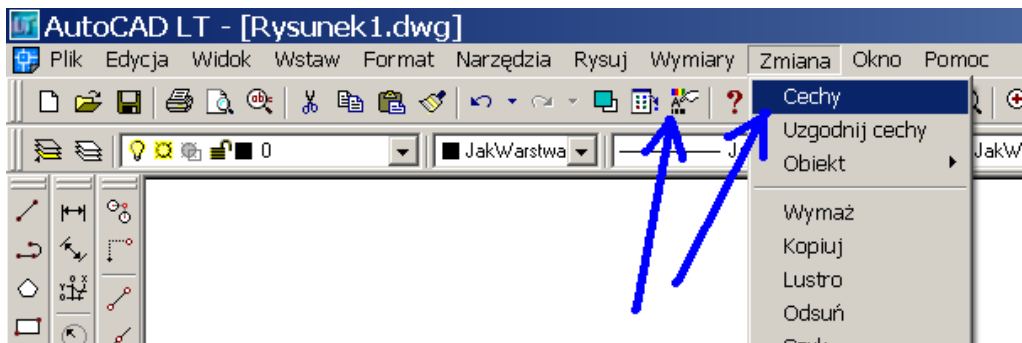
Fig. 8. Window of block inserting

W górnej części okna, w polu edycyjnym **Nazwa**, określa się nazwę bloku. Standardowo jest ona przyjmowana jako zgodna z nazwą pliku. W przypadku, gdy żądany element był wcześniej wczytany do rysunku zasadniczego można go wybrać z listy. W przeciwnym przypadku konieczne jest wyszukanie i wskazanie właściwego pliku za pomocą przycisku **Przełączaj**.

3.3. Modyfikacja elementów

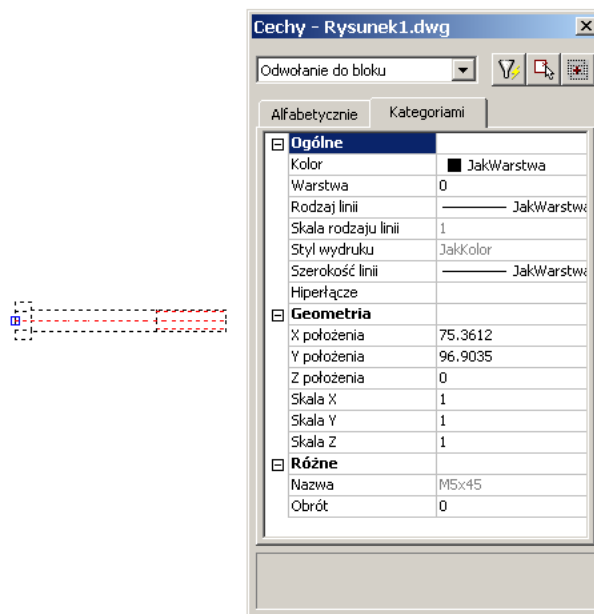
Wstawiony do rysunku element może być modyfikowany. W celu zmiany jego właściwości można skorzystać z menadżera właściwości w postaci listy, który umożliwia w łatwy sposób odczyt oraz zmianę właściwości obiektu. Wywołanie menadżera następuje przez wpisanie polecenia **Cechy**, naciśnięcie klawisza **CTRL+1**,

przycisku  lub wywołując z menu funkcję **Zmiana** → **Cechy**, jak na rysunku 9. Prowadzi to do otwarcia okna, przedstawionego na rysunku 10, w którym można zdefiniować parametry bloku jako zwartej całości.



Rys. 9. Wywołanie listy cech obiektu

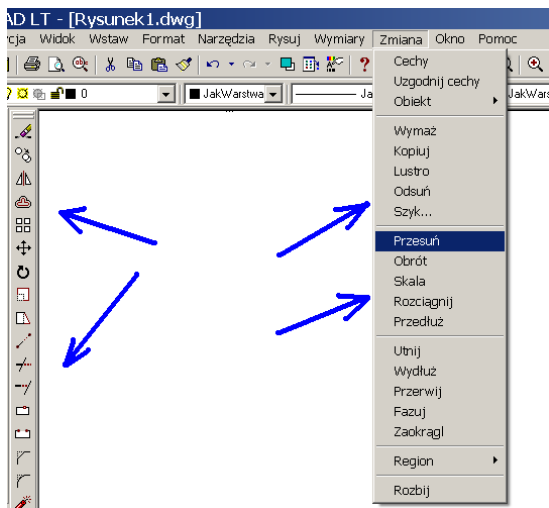
Fig. 9. Object's features list call



Rys. 10. Okno zmiany cech elementu

Fig. 10. Window of changes of element's features

Modyfikacji wstawionych elementów można także dokonywać za pomocą poleceń edycyjnych AutoCAD'a, takich jak: obrót, skala, przesun, kopiuł itp. Niektóre z poleceń odnoszą skutek dopiero po rozbiciu bloku. Na rysunku 11 przedstawiono narzędzia do edycji wprowadzonych elementów.

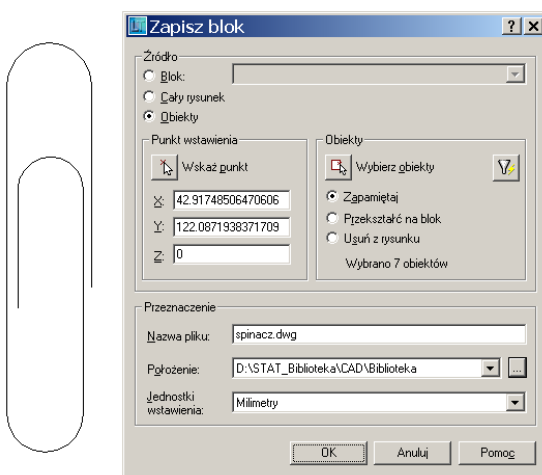


Rys. 11. Narzędzia do modyfikacji wstawionych elementów

Fig. 11. Tools for inserted elements' modification

3.4. Uzupełnianie i rozbudowa biblioteki

Opracowana biblioteka jest otwartym systemem. W dowolnym momencie może być ona rozbudowana o nowe elementy. Ważne jest przy tym zachowanie przedstawionych wcześniej zasad tworzenia obiektów. Najprostszym sposobem rozbudowywania biblioteki jest wykonanie rysunku nowo wprowadzonego elementu i zapisanie go w odpowiednim katalogu biblioteki. Często w czasie projektowania (tworzenia dokumentacji) istnieje możliwość zdefiniowania nowego elementu. Wydanie polecenia **piszblok** powoduje wyświetlenie okna tworzenia i zapisu nowego elementu biblioteki, przedstawionego na rysunku 12. W oknie tym określa się nazwę tworzonego pliku (**spinacz.dwg**), jego położenie w systemie plików oraz uchwyt – punkt wstawienia. Konieczne jest też wskazanie obiektów (części składowych przykładowego spinacza) z których ma być utworzony nowy plik.



Rys. 12. Tworzenie nowego elementu biblioteki rysunku w czasie projektowania

Fig. 12. Creation of new element of drawing library during designing

3.5. Przykład wykorzystania biblioteki przy tworzeniu dokumentacji

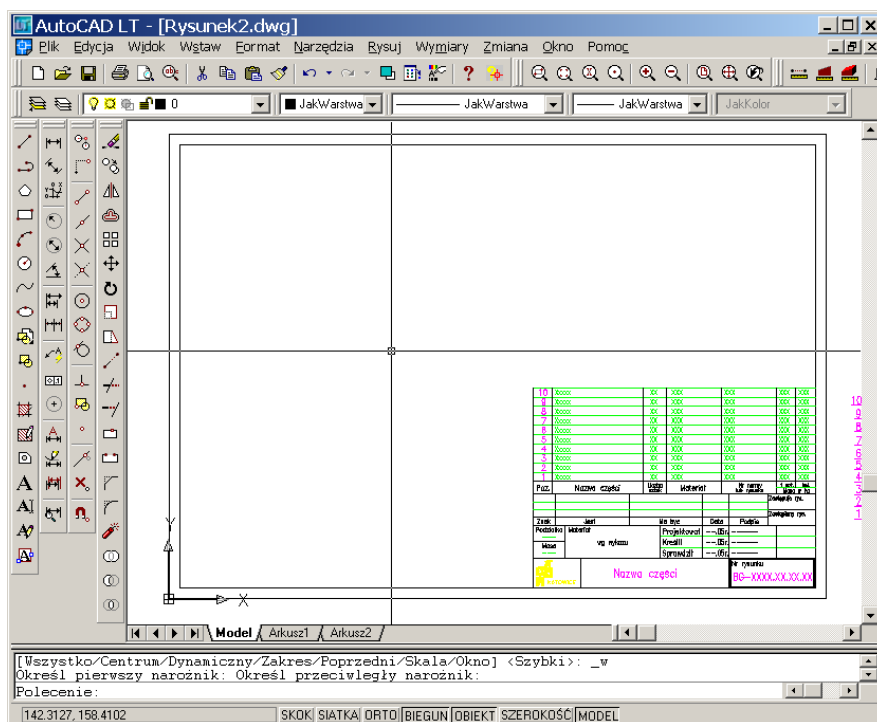


Fig. 13. An example of use of developed library to creation of technical documentation

PODSUMOWANIE

Jak pokazały dotychczasowe zastosowania, uzupełnienie komercyjnych programów komputerowego wspomagania projektowania (CAD) o biblioteki typowych elementów, prowadzi do wyraźnego usprawnienia prac projektowych, zwłaszcza w przypadku nowo projektowanej, oryginalnej konstrukcji. Najwyraźniej daje się to

odczuć na etapie koncipowania. Importowanie gotowych elementów przyspiesza i ułatwia wybór właściwego kształtownika na poszczególne fragmenty konstrukcji. Ponadto opracowana biblioteka, a zwłaszcza zawarte w niej szablony pozwalają na uporządkowanie formy – ujednolicenie dokumentacji rysunkowej tworzonej przez różnych projektantów w jednej pracowni. Istotną cechą całego systemu jest jego otwartość. W dowolnym momencie, bez specjalnych przedsięwzięć, możliwe jest wprowadzenie do istniejącego zbioru zupełnie nowego elementu.

Literatura

1. Bogucki W., Żybertowicz M. (1996): *Tablice do projektowania konstrukcji metalowych*. Warszawa, Arkady 1996.
2. Dietrich J. (1974): *Projektowanie i konstruowanie*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
3. Dobrzański T. (2004): *Rysunek techniczny maszynowy*, wyd. 24. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
4. Dziama A. (1985): *Metodyka konstruowania maszyn*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
5. Osiński Z., Wróbel J. (1995): *Teoria konstrukcji*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
6. Pikoń A. (2003): *AutoCAD 2004*. Gliwice, Helion 2003.
7. *Podstawy konstrukcji maszyn* (1995). Praca zbiorowa pod redakcją M. Dietricha. Tom 1. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
8. *Podstawy konstrukcji maszyn* (1999). Praca zbiorowa pod redakcją Z. Osińskiego. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
9. Reisdorph K. (1999): *Delphi 4 dla każdego*. Gliwice, Helion.
10. Rotkegel M. (2003a): *Komputerowe wspomaganie projektowania nietypowych odrzwi obudowy chodnikowej*. Przegląd Górniczy nr 12.
11. Rotkegel M. (2003b): *Specjalistyczny program do projektowania geometrii odrzwi łukowej obudowy wyrobisk korytarzowych*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 12.
12. Smith J., Gesner R. (1995): *AutoLISP czyli programowanie AutoCAD'a*. Gliwice, Helion.
13. Szewczyk J. (2002a): *Biblioteki DWG*. Warszawa, CAD/CAM Forum nr 2.
14. Szewczyk J. (2002b): *Kreskowania, symbole, czcionki i specyficzne formaty*. Warszawa, CAD/CAM Forum nr 3.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka

Grzegorz Mutke, Jacek Chodacki

ZASTOSOWANIE PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIĘĆ INŻYNIERSKICH I ŚRODOWISKOWYCH W PRZYPOWIERZCHNIOWYCH WARSTWACH PODŁOŻA

Streszczenie

Przedstawiono przykłady zastosowania profilowania elektromagnetycznego za pomocą konduktometru CM-031 w diagnostyce płytkiego podłoża – identyfikacja i lokalizacja podziemnej infrastruktury technicznej oraz zdeponowanych pod ziemią odpadów przemysłowych. Potwierdziły one, że badanie płytkiego podłoża nieinwazyjnymi metodami geofizycznymi jest korzystne zarówno ze względu na uzyskiwane informacje merytoryczne, jak i ze względów ekonomicznych. Dodatkową zaletą pomiarów konduktometrycznych jest krótki czas realizacji, mała pracochłonność, duża informatywność oraz technika pomiarowa niewymagająca bezpośredniego kontaktu urządzenia z podłożem. Wszystkie te elementy stanowią o dużej efektywności pomiarów konduktometrycznych, wykonywanych na dużych obszarach, w rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich i środowiskowych.

Use of shallow electromagnetic prospecting to solving engineer and environmental problems in subsoil layers

Abstract

Examples of use of electromagnetic prospecting by means of conductometer CM-031 in diagnostics of subsoil identification and location of underground technical infrastructures and industrial waste materials deposited underground were presented. They confirmed that subsoil investigation with non-invasive geophysical methods is profitable both regarding obtained essential information, as well as from economic reasons. Additional advantage of conductometric measurements is short time of realization, low labour consumption, high informativity and measuring technique without requirement of immediate device contact with a base. All these elements determine high effectivity of conductometric measurements executed on wide areas in resolving engineer and environmental problems.

WPROWADZENIE

Metody geofizyczne mogą być z powodzeniem stosowane do rozwiązywania wielu zagadnień środowiskowych i inżynierskich występujących w warstwach podłoża. Ich dużą zaletą jest bezinwazyjna technika pomiarowa, możliwość wykonywania badań ciągłych na dużych obszarach (w odróżnieniu od punktowych pomiarów wykonywanych *in situ* w otworach wiertniczych), niskie koszty badań. Wadą pomiarów geofizycznych jest natomiast wyrażanie informacji o strukturze lub skażeniu gruntów w sposób pośredni przez podanie informacji w jednostkach badanego pola fizycznego. Skalowanie jednostek pola fizycznego na informację o strukturze geologicznej, niejednorodnościach w podłożu, znajdujących się obiektach lub charakterystyce skażenia gruntów jest bardzo ważne i w tym zakresie jest

wymagana odpowiednia wiedza i doświadczenie w zakresie interpretacji zdjęć terenowych.

Istnieje kilka różnych metod geofizycznych do badania płytkiego podłoża i procesów w nim zachodzących. Spośród metod najczęściej stosowanych należy wyróżnić:

- metodę elektrooporową, stosowaną najczęściej w odmianie profilowania elektrooporowego, sondowania elektrooporowego lub tomografii elektrooporowej,
- metodę sejsmiczną, stosowaną w formie profilowania sejsmicznego, zdjęcia tomograficznego oraz badania fal powierzchniowych (technika MASW),
- metodę radarową,
- metodę elektromagnetyczną stosowaną w wersji profilowania lub sondowania,
- metodę grawimetryczną.

W niniejszym artykule przedstawiono metodę płytkiego profilowania elektromagnetycznego, z wykorzystaniem do pomiarów konduktometru CM-031. Taki konduktometr został zakupiony w GIG w 2004 roku. Każda z wymienionych wyżej metod geofizycznych charakteryzuje się własnymi preferencjami w rozwiązywaniu poszczególnych problemów. Metoda elektromagnetyczna w wersji płytkich profiliowań szczególnie dobre wyniki daje przy rozwiązywaniu następujących zagadnień:

- wykrywanie obiektów znajdujących się w ziemi (złom, kable, rurociągi, zbiorniki, amunicja itp.),
- badanie zagrożenia ekologicznego w miejscach składowania odpadów,
- lokalizacja niejednorodności i obiektów antropogenicznych w podłożu,
- badanie skażeń wód gruntowych i gleb substancjami chemicznymi oraz monitoring migracji tych zanieczyszczeń,
- wykrywanie uskoków i spękań w płytkim podłożu,
- badania dla celów archeologicznych.

Niektóre z wyżej wymienionych zagadnień mogą być i są rozwiązywane również innymi metodami geofizycznymi, jednak to właśnie metoda profilowania elektromagnetycznego posiada niezaprzeczalne zalety do wykonywania tych zadań. Zawiera w sobie informacje o dwóch polach geofizycznych (elektrycznym i magnetycznym), jest metodą bardzo wydajną i mało pracochłonną, a pomiary nie wymagają kontaktu aparatury z podłożem. Ten ostatni element w szczególności korzystnie odróżnia tę metodę od pozostałych. Ma on duże znaczenie w trudnym terenie i przy niekorzystnych warunkach pogodowych.

Badania geofizyczne są w Polsce stosunkowo mało popularne i mniej powszechnie stosowane niż w innych krajach europejskich, nie wspominając już o USA czy Kanadzie. Zmiana tego stanu wymaga przekonania potencjalnych odbiorców usług, o dużej użyteczności pomiarów geofizycznych i niskich nakładach na ich realizację. W przeciwieństwie do geologicznych badań inżynierskich i analiz geochemicznych w otworach, dostarczana informacja nie jest punktowa i pozwala na ciągłe rozpoznanie obszarów o dużej zmienności i niejednorodności.

Bardzo istotny jest problem współpracy i skalowania informacji geofizycznych z punktowymi informacjami z wierceń i oznaczeń geochemicznych. Nie zawsze ten oczywisty sposób łączenia informacji o podłożu jest stosowany przez geofizyków.

Z drugiej strony geolodzy niezbyt często sięgają do pomiarów geofizycznych jako narzędzia do rozwiązywania zagadnień inżynierskich i środowiskowych, mających miejsce w warstwach przypowierzchniowych. Dalszy rozwój obustronnej współpracy z pewnością mógłby przynieść bardzo pozytywne efekty i duże korzyści.

1. PODSTAWY MATEMATYCZNO-FIZYCZNE METODY ELEKTROMAGNETYCZNEJ I CHARAKTERYSTYKA URZĄDZENIA

Konduktometr elektromagnetyczny jest urządzeniem, którego zasada działania, jak zresztą wszystkich metod geoelektrycznych i elektromagnetycznych, bazuje na czterech równaniach Maxwella. Konduktometr składa się z dwóch cewek, między którymi odległość wynosi s . Jedna z cewek jest cewką nadawczą a druga odbiorczą. W cewce nadawczej jest wytwarzany prąd o niskiej częstotliwości, który generuje zmienne pole magnetyczne H_p . Tak wytworzone pierwotne pole magnetyczne wnika do ośrodka skalnego powodując w nim wtórną indukcję magnetyczną wytworzoną przez prądy wirowe. Wtórne pole magnetyczne wygenerowane w ośrodku zostaje zmierzone w cewce odbiorczej również na zasadzie indukcji magnetycznej, powodując płynięcie w niej prądu. Z konstrukcji konduktometru oraz z równań Maxwella wynika prosta zależność między przewodnością wzbudzonego magnetycznie ośrodka a natężeniami pola magnetycznego wytworzonego w cewce nadawczej H_p i pomierzonego w cewce odbiorczej wtórnego pola magnetycznego H_s

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \frac{H_s}{H_p} \quad (1)$$

gdzie:

- σ_a – pozorna przewodność właściwa ośrodka objętego badaniem,
- H_p – amplituda natężenia pola w cewce nadawczej,
- H_s – amplituda natężenia pola w cewce odbiorczej,
- ω – częstość kołowa prądu w cewce nadawczej,
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,
- s – odległość między środkiem cewki nadawczej i odbiorczej.

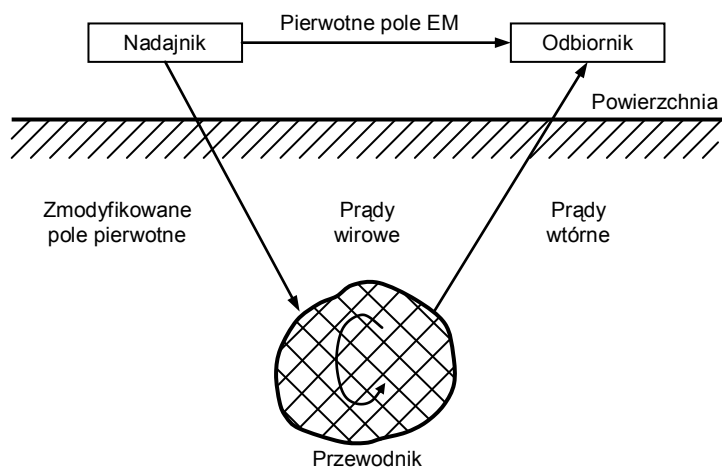
Konduktometr CM-031 (fot. 1) jest aparaturą służącą do wykonywania dipolowych płytkich profilowań elektromagnetycznych. Jest urządzeniem pracującym w domenie częstotliwości, tzn. prąd zmienny o określonej częstotliwości, płynący w cewce nadawczej, wzbudza wtórne pole magnetyczne w ośrodku. W omawianym przyrządzie częstotliwość prądu wynosi 9,766 kHz. Odległość między anteną nadawczą i odbiorczą wynosi 374 cm, co pozwala na wykonywanie profilowań do głębokości 6 m. Wielkościami mierzonymi są oporność (lub przewodność) elektryczna gruntu i składnik *inphase*. Oporność elektryczna określa odpowiedź ośrodka na płynący w nim prąd. Natomiast zdefiniowanie składnika *inphase* nie jest tak proste. Generalnie jest to wielkość względna, wykalibrowana w jednostkach bezwymiarowych. Jej wartość jest proporcjonalna do rzeczywistej części wtórnego pola magnetycznego, przy czym nie jest to relacja liniowa i zależy również od przenikalności

magnetycznej ośrodka. W wielu przypadkach jej pomiar jest bardzo użyteczny, gdyż jest to wskaźnik obecności podziemnych obiektów z metalu. Na rysunku 1 przedstawiono poglądowo zasadę funkcjonowania metody profilowania elektromagnetycznego przy użyciu konduktometru CM-031.



Fot. 1. Konduktometr CM-031

Foto. 1. Conductometer CM-031



Rys. 1. Ogólny schemat pomiarów elektromagnetycznych

Fig. 1. General layout of electromagnetic measurements

Dzięki swej konstrukcji konduktometr elektromagnetyczny CM-031 ma zdecydowaną przewagę nad innymi urządzeniami tego typu, gdyż w trakcie pomiaru nie jest wymagany bezpośredni kontakt z badanym ośrodkiem, a więc urządzenie może być stosowane w pewnej odległości od badanych obiektów.

Zakres pomiarowy aparatury dla przewodności pozornej gruntu wynosi od 0,1 do 1000 mS/m (oporności od 1 do 10 000 Ω m), natomiast dla składnika *inphase* od 1 do 4000 jednostek. Rozdzielczość pomiaru to odpowiednio 0,1 mS/m (0,1 Ω m) i 1. Kontrola pomiaru odbywa się poprzez wbudowany komputer PC Palmtop HP 200XL.

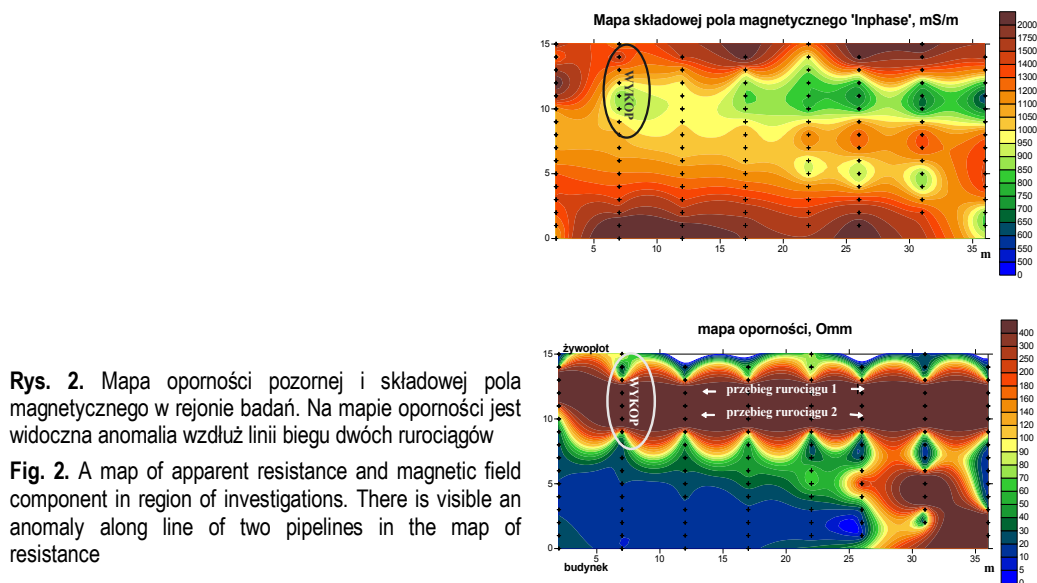
2. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO WYKRYWANIA OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY PODZIEMNEJ

Na terenach pogórnicznych i górniczych, a szerzej na terenach przemysłowych lub dawnych baz wojskowych, często spotykamy się z problemem zakopanych

w ziemi elementów złomu (np. zbiorniki, beczki z odpadami, kable, zużyty sprzęt itp.) lub starej liniowej infrastruktury technicznej, nie zawsze dobrze udokumentowanej na dostępnych mapach. Informacja o występowaniu i lokalizacji takich elementów znajdujących się w ziemi jest niezbędna przy planowaniu i wykonywaniu w terenie nowych inwestycji. Stare zbiorniki paliw, czy inny zakopany w ziemi złom, stanowią zagrożenie dla terenu, mogące się objawiać skażeniem gleby i wód przypowierzchniowych. Rozwój infrastruktury naziemnej i podziemnej miast (np. budowa parkingów) będzie wymagał szybkiej i precyzyjnej informacji o obiektach, kablach i rurociągach zakopanych w ziemi. Wspomniane zagadnienia mogą być badane metodami elektrooporowymi, radarowymi oraz elektromagnetycznymi. Jak już wspomniano wcześniej, bardzo dobre wyniki (przy małej czasochłonności prac w terenie) dla zakresu tego rodzaju badań, uzyskuje się stosując metodę elektromagnetyczną. Metoda ta w wersji profilowania elektromagnetycznego wykorzystuje informacje o pozornej przewodności lub oporności ośrodka i składowej proporcjonalnej do wtórnego pola magnetycznego, tzw. składnik *inphase*.

Pomiary wykonano metodą płytkiego profilowania elektromagnetycznego, np. w celu potwierdzenia rzeczywistej lokalizacji podziemnej sieci infrastruktury liniowej w terenie, w którym planowano wybudować parking. Informacja ta była potrzebna wykonawcy do odpowiedniej organizacji prac, niekolidujących z podziemnymi mediami.

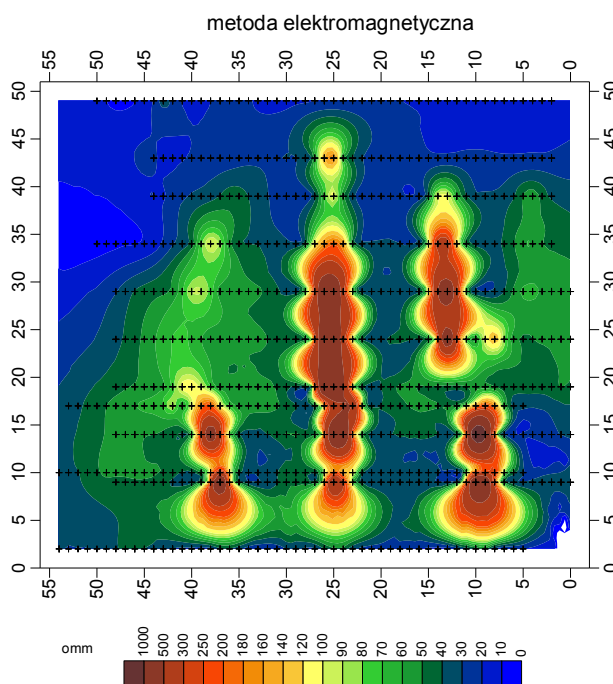
Wyniki badań konduktometrem wskazały na istnienie bardzo silnej i wyraźnej anomalii wysokooporowej w miejscu przebiegu dwóch rurociągów równoległych do siebie (rys. 2). Informacja o przebiegu tych rurociągów została potwierdzona po wykonaniu wykopu. Na zdjęciu (fot. 2) widoczne są dwa rurociągi. Pierwszy biegnie około 2 m od linii żywopłotu, a drugi nieco głębiej, posadowiony około 2 m za pierwszym. Ponieważ rurociągi biegną równolegle blisko siebie, to powstałe anomalie połączyły się w jeden pas rozciągający się wzdłuż badanego obszaru (pomiaru odczytywane były co 1 m). Niewielka anomalia niższych wartości składowej rzeczywistej wtórnego pola magnetycznego może wskazywać, że przynajmniej jeden z rurociągów jest żeliwny.



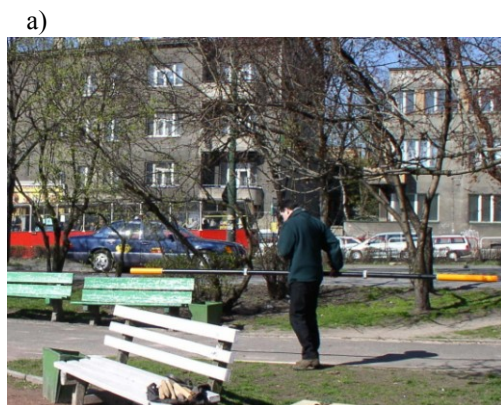
Fot. 2. Wykop wykonany od strony żywopłotu – dwie rury w miejscu występowania anomalii wysokooporowej

Photo. 2. Excavation executed from the side of hedgerow – two pipes in place of occurrence of high-resistance anomaly

Kolejny zweryfikowany obraz przebiegu liniowych obiektów infrastruktury podziemnej pokazano na rysunku 3. Poszukiwano w terenie przebiegu rurociągów. Prace wykonywano jesienią (fot. 3b). Zdjęcie wykonane zimą (fot. 3a) pokazuje, że środkowa, największa anomalia oporności pokrywa się z przebiegiem kanalizacji, widocznej na zdjęciu jako ślad wytopionego śniegu wzdłuż placu. Pozostałe dwie strefy wysokooporowe, wskazują swym kształtem na lokalizację kolejnych obiektów liniowych.



Rys. 3. Wyniki pomiarów elektromagnetycznych
Fig. 3. Results of electromagnetic measurements



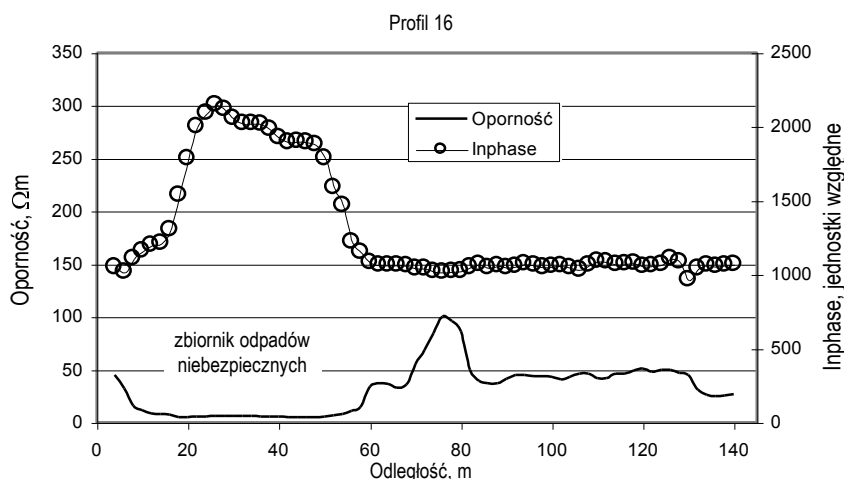
Fot. 3. Pomiary elektromagnetyczne za pomocą aparatury CM-03 przeprowadzane jesienią (a)
 i widok zimą największej anomalii oporności (b)

Foto. 3. Electromagnetic measurements by means of apparatus CM-03 conducted in autumn (a)
 and winter view of greatest resistance anomaly (b)

Zaprezentowane przykłady pomiarowe dowodzą, że metoda płytkich profilowań elektromagnetycznych bardzo dobrze zdaje egzamin przy ustalaniu lokalizacji i przebiegu podziemnych obiektów infrastruktury technicznej.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO WYKRYWANIA ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH SKŁADOWANYCH W ZIEMI

Testowe badania elektromagnetyczne zostały wykonane na terenie zakładu przemysłowego. Celem badań było przetestowanie czułości konduktometru przy badaniu identyfikacji składowanych odpadów i wyznaczeniu obszarów o płytkim poziomie wód gruntowych (do 5 m). Wytyczono profil, który przecinał zbiornik odpadów niebezpiecznych z lat 80. zeszłego wieku. Deponowano tam odpady w beczkach, innych pojemnikach lub luzem, w tym: szlam z elektrolizy rtęciowej, błoto z produkcji żelazocyjanku potasu, opakowania, osady z oczyszczalni ścieków, zestalony ściek glinowy, odpadowa krzemionka. Zbiorcza informacja z pomiarów konduktometrycznych obejmowała wzdłuż profilu głębokość 5–6 m. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Bezpośrednio nad zbiornikiem odpadów zarejestrowano najniższe wartości oporności pozornej (kilka Ωm). W tym samym miejscu wystąpiła dodatnia anomalia rzeczywistej części wtórnego pola magnetycznego *inphase* (wzrost o 100%). Wyniki te wskazują, że metoda płytkich profilowań elektromagnetycznych doskonale nadaje się do szybkiego wykrywania i okonturowania obszarów odpadów przemysłowych składowanych w ziemi. Oczywiście w przypadku, gdy chcemy dokładnie określić zasięg głębokościowy składowiska, należy w tym miejscu dodatkowo wykonać sondowania geofizyczne (np. elektromagnetyczne, geoelektryczne itp.).

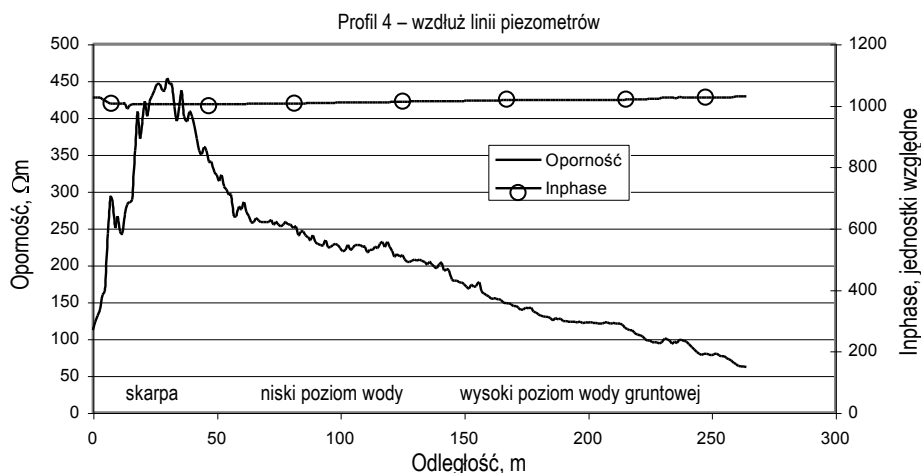


Rys. 4. Pomiary elektromagnetyczne wzdłuż profilu XVI nad zbiornikiem odpadów niebezpiecznych

Fig. 4. Electromagnetic measurements along logging XVI over reservoir of dangerous waste material

Przykład pomiarów konduktometrycznych, wskazujących na występowanie wody na głębokości do 6 m przedstawiono na rysunku 5. Pod koniec profilu IV (200–270 m) oporność pozorna wyraźnie maleje – do 50 Ωm , co ma związek z obecnością wody (piezometry wykazały w tym rejonie najniższe położenie wód gruntowych, 2,7–4,3 m). Początek profilu IV to schodzenie ze skarpy, gdzie zarejestrowano najwyższe wartości

oporności pozornej charakterystycznej dla suchych piasków – 450 Ωm . W środkowej części profilu IV (tj. część poza skarpą oraz przy głębokim poziomie wód gruntowych, powyżej 6 m), oporność pozorna oscyluje w granicach 150–250 Ωm . Natomiast wysoki poziom wód gruntowych obrazuje niskie wartości oporności pozornej (50–100 Ωm).



Rys. 5. Pomiary elektromagnetyczne na profilu IV wzdłuż linii piezometrów

Fig. 5. Electromagnetic measurements on logging IV along a line of piezometers

PODSUMOWANIE

Metody geofizyczne mogą być stosowane do rozwiązania bardzo wielu zagadnień środowiskowych. Ich zaletą jest możliwość wykonywania pomiarów bezinwazyjnych w warunkach *in situ* oraz niskie koszty badań w porównaniu z badaniami w otworach wiertniczych. Współpraca geologów i geofizyków prowadzi do uzyskania optymalnej informacji o terenie, przy rozpoznawaniu zagrożeń środowiskowych i zagadnień geotechnicznych. Wyniki oznaczeń z odwiertów oraz wyniki analiz geochemicznych mogą służyć do skalowania wskazań pola geofizycznego (np. elektrycznego lub magnetycznego) oraz do weryfikacji miejsc istotnych zagrożeń, zlokalizowanych w terenie za pomocą badań geofizycznych. Wydaje się, że taki kierunek rozwoju badań w terenie będzie dominował w przyszłości. Niestety, w porównaniu z krajami Europy Zachodniej oraz USA, w Polsce wykorzystanie metod geofizycznych do badań środowiskowych, geotechnicznych i inżynierskich jest bardzo małe.

Przedstawione przykłady zastosowania profilowania elektromagnetycznego konduktometrem CM-031 do diagnostyki płytkiego podłoża, w aspekcie identyfikacji i lokalizacji podziemnej infrastruktury technicznej oraz okonturowania zdeponowanych pod ziemią odpadów przemysłowych potwierdzają zalety tej techniki pomiarowej.

Poza przedstawionymi przykładami pomiarowymi, metoda konduktometryczna bardzo dobrze sprawdza się również w innej problematyce związanej z diagnostyką płytkiego podłoża. Oprócz typowego zastosowania do rozpoznawania płytkiej budowy

geologicznej, tj. określenia stref występowania utworów przepuszczalnych (piaski, żwiry) i nieprzepuszczalnych (iły, gliny), stref uskokowych, stref spękanych itp., posiada również możliwość detekcji podziemnych obiektów metalowych. Ze względu na swoją dużą wydajność, dobrze zdaje egzamin w badaniu stanu skarp i obwałowań przeciwpowodziowych. Ciekawe wyniki zastosowania pomiarów konduktometrycznych uzyskiwano również w badaniach archeologicznych.

Literatura

1. Dokumentacja GF-Instruments 2001: Conductivity Meter CM-031.
2. Geonics Limited Technical Note TN-5 (1980). Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Geonics Limited, #8, 1745 Meyerside Dr., Mississauga, Ont., L5T 1C6.
3. Geonics Limited Technical Note TN-6 (1980): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Geonics Limited, #8, 1745 Meyerside Dr., Mississauga, Ont., L5T 1C6.
4. Kauffman A.A., Keller G.V. (1983): *Frequency and transient soundings*. N.Y., Elsevier.
5. Kotyrba A. (2001): *Ocena i zrównoważone odzyskiwanie terenów górniczych do pogórniczego wykorzystania*. Projekt Badawczy Europejskiej Wspólnoty Węgla i Stali nr PR-095. Sprawozdanie z projektu. Bruksela, RFSC.
6. Mutke G. i inni (2004): *Identyfikacja obszarów zanieczyszczonych skażonymi wodami gruntowymi oraz płytko zalegającymi niejednorodnościami podłoża*. Dokumentacja pracy badawczej GIG nr 19300204-120.
7. Thiel K. (1980): *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. Warszawa, PKWN.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Eugeniusz Krause

PROFILAKTYKA W POKŁADACH METANOWYCH ZAGROŻONYCH SEJSMICZNIE

Streszczenie

Znaczący wzrost zagrożenia tapaniami oraz metanowego w związku z eksploatacją na coraz większych głębokościach jest przyczyną zdarzeń i wypadków związanych z ich współwystępowaniem.

Wzrastające, wraz z głębokością prowadzenia robót górniczych w kopalniach węgla, nasycenie złoża metanem oraz coraz większa aktywność sejsmiczna górotworu są czynnikami mogącymi powodować uwalnianie się dużych objętości metanu ze złoża po zaistniałym wstrząsie lub tąpnięciu. Koincydencja zagrożeń tapaniami i metanowego będzie w przyszłości stanowiła najbardziej katastroficzny czynnik podczas prowadzenia eksploatacji górniczej.

Analiza przyczynowo-skutkowa wpływów metanu po zaistniałych wstrząsach wysokoenergetycznych, o energii powyżej 10^5 J, pozwoliła na zajęcie stanowiska co do mechanizmów ich przebiegu (Krause 2004).

Ograniczenie niebezpiecznych wpływów metanu po wstrząsach powinno zostać uwzględnione przy opracowywaniu wyprzedzającej profilaktyki metanowej na etapie projektowania eksploatacji w złożu o dużej aktywności sejsmicznej, co zostało zasygnalizowane syntetycznie w niniejszej publikacji.

Coal seams methane protection in seismic hazardous conditions

Abstract

Significant increase of rock-bump hazard and methane hazard in relation to mining at more and more greater depths is reason of events and accidents connected with their jointly occurrence.

Increasing with depth of mining methane saturation of deposit in coal mines and more and more greater seismic activity of rockmass are factors being able to cause releasing large volumes of methane from the deposit after occurrence of shock or outburst. In future, coincidence of rock-bump hazards and methane hazards will constitute the most catastrophic factor in mining.

Cause-effect analysis of methane outflows after high-energetic shocks occurrence, with energy above 10^5 J, enabled to assume standpoint to a question of mechanisms of their course (Krause 2004).

Limitation of dangerous methane outflows after shocks should be taken into account at working-out outdistancing methane protection at the stage of projecting exploitation of deposit with large seismic activities, what was briefly signalled in the present publication.

WPROWADZENIE

Koncentracja wydobywania oraz prowadzenie eksploatacji na coraz większych głębokościach przyczynia się do wzrostu zagrożeń naturalnych, szczególnie zagrożenia tapaniami i metanowego. Wpływ koncentracji wydobywania na zagrożenia naturalne stanowi od wielu lat przedmiot badań i analiz wykonywanych w Głównym Instytucie Górnictwa. Ich wynikiem są opracowane zasady, kryteria oraz nowa metoda prognozowania wydzielania metanu do środowiska projektowanych ścian, zawarte w Instrukcjach nr 8, 9, 10, 14 i 17 Głównego Instytutu Górnictwa, sukcesywnie wydawanych od 1998 roku.

Instrukcje te są pomocne kierownictwu Zakładów Górniczych w podejmowaniu decyzji na etapie projektowania oraz w czasie prowadzenia robót górniczych w kopalniach węgla kamiennego.

Wzrost zagrożenia tapaniami, przy współwystępowaniu zagrożenia metanowego, spowodował, w ostatnich dziesięciu latach, niebezpieczne wypływy metanu do wyrobisk górniczych. Intensywne wypływy metanu po zaistniałych wstrząsach były powodem tworzenia się w wyrobiskach atmosfery niebezpiecznej z obowiązującymi przepisami, w tym niezdadnej do oddychania, ponadwybuchowej lub wybuchowej. Przykładem może być przerwanie ciągłości przewietrzania po zaistniałym wysokoenergetycznym wstrząsie i tąpnięciu w rejonie ściany 303 w pokładzie 507 w KWK Zabrze – Bielszowice w dniu 12.12.1996 r., które spowodowało uduszenie się dwóch górników, przechodzących chodnikiem podścianowym 7 bz do zniszczonego przez tąpnięcie odcinka wyrobiska.

Doświadczenia ruchowe kopalń potwierdzają, że intensywne niebezpieczne wypływy metanu do wyrobisk górniczych mogą wystąpić po wstrząsach wysokoenergetycznych o energii powyżej 10^5 J w otoczeniu złoża o metanonośności powyżej $2,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$.

W warunkach wstrząsów wysokoenergetycznych, przy nasyceniu złoża metanem poniżej $2,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$, następuje wzrost jego zawartości w powietrzu o około 0,2–0,4%, a bezwzględne wartości kształtują nieznaczny wzrost poziomu zagrożenia metanowego. Wstrząsy wysokoenergetyczne powodujące rozszczelinowanie górotworu wokół wyrobisk eksploatacyjnych, a tym samym zwiększenie jego przepuszczalności, wpływają na uintensywnienie migracji metanu z górotworu w kierunku wyrobisk lub zrobów. Metanonośność oraz stopień zniszczenia struktury złoża, po zaistniałym wstrząsie lub tąpnięciu, rzutują na stopień jego odgazowania i intensywność desorpcji metanu z węgla do wyrobisk górniczych.

Metan dopływający do wyrobisk, po zaistniałym wstrząsie, może pochodzić z pokładu eksploatowanego oraz pokładów podebranych i nadebranych, objętych zasięgiem oddziaływania fali sejsmicznej. Wpływ ten może mieć przebieg niekontrolowany, co stwarza duże zagrożenie dla zatrudnionej załogi.

Analiza przyczynowo-skutkowa zaistniałych wstrząsów wysokoenergetycznych w polskich kopalniach węgla kamiennego, których następstwem były wypływy metanu do wyrobisk, pozwoliła na zajęcie stanowiska co do ich mechanizmu w zależności od lokalizacji epicentrum wstrząsu w stosunku do położenia frontu eksploatacyjnego (Krause 2004).

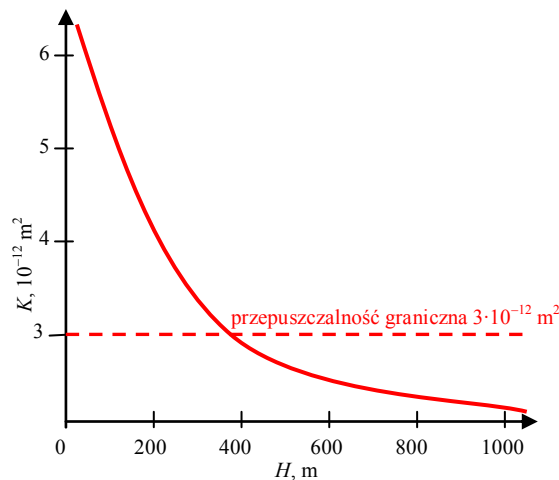
Jak wspomniano, ze wzrostem głębokości eksploatacji wzrasta stan zagrożenia spowodowany koincydencją niebezpiecznych zjawisk. W takiej sytuacji większego znaczenia nabierają rygory i zakres stosowania profilaktyki tapaniowo-metanowej. W szczególności dotyczy to kopalń GZW, takich jak: „Bielszowice”, „Halemba”, „Wujek” „Śląsk” i „Wesoła”, gdzie koincydencja zagrożeń jest znaczna.

Nadmienić należy, że chociaż zagrożenie tapaniami, jak i metanowe, są rozpoznawane w bardzo dużym stopniu, to jednak do tej pory nie opracowano syntetycznych metod rozpoznawania, prognozowania i profilaktyki współwystępujących zagrożeń, z uwzględnieniem współczesnych trendów eksploatacji górniczej.

1. MECHANIZM WYDZIELANIA SIĘ METANU PODCZAS EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ

Ruch gazu w węglu i otaczających go skałach zależy przede wszystkim od ich przepuszczalności. Na podstawie badań stwierdzono, że przepuszczalność węgla jest znacznie większa niż skał, ponadto jest większa w kierunku równoległym do uławicenia niż prostopadłym. Przepuszczalność węgla maleje ze wzrostem uwęglenia oraz ze wzrostem głębokości, a zatem i ze wzrostem ciśnienia. Uwalnianie się metanu z pokładów węgla, na skutek niewielkiej przepuszczalności skał, jest procesem powolnym i przebiega w ograniczonych ilościach. Czynnikiem powodującym intensywne uwalnianie się metanu z pokładów węgla jest ich odprężanie, na skutek eksploatacji górniczej. W pokładach odprężonych przepuszczalność węgla wzrasta sto-, a nawet tysiącrotnie. Z badań laboratoryjnych wynika, że może ona wzrosnąć na przykład od $1 \cdot 10^{-15}$ – $2,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ do $4,1 \cdot 10^{-12}$ – $32 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$. Duży wpływ na wzrost przepuszczalności pokładów mają naprężenia rozciągające. Na podstawie wyników badań oraz doświadczeń praktycznych przyjęto, że graniczna przepuszczalność, przy której może wystąpić przepływ metanu w pokładzie węgla, wynosi $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Zależność przepuszczalności pokładów węgla w Górnosląskim Zagłębiu Węglowym od głębokości przedstawiono na rysunku 1. Wynika z niego, że wspomniana graniczna przepuszczalność występuje na głębokości około 400 m.



Rys. 1. Zmiana przepuszczalności K pokładów węgla z głębokością zalegania H (Kozłowski, Grębski 1982); linią przerywaną zaznaczono przepuszczalność graniczną

Fig. 1. Change of permeability K of coal seams with bedding depth H (Kozłowski, Grębski 1982); terminal permeability was marked with dashed line

Potwierdzeniem powyższego jest fakt, że w warunkach naturalnych strefa zwiększonej przepuszczalności wokół otworu badawczego, wykonanego w węglu, ma promień od ułamka metra do maksymalnie 2 m. Przy częściowym, a tym bardziej przy

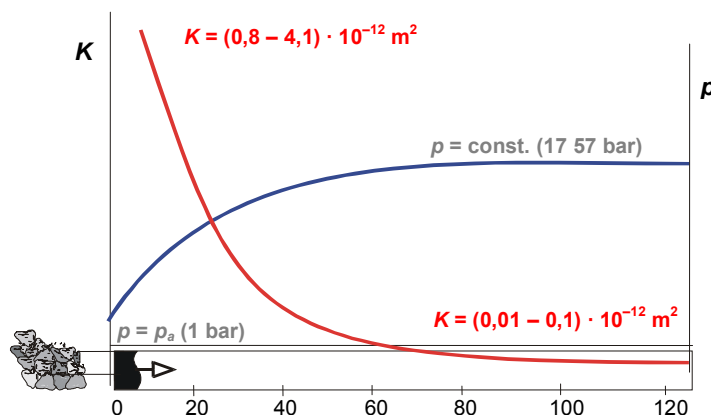
całkowitym odprężeniu pokładu podebranego promień drenującego wpływu otworu może osiągnąć dziesiątki metrów. W pokładach nadbieranych skuteczność drenowania jest mniejsza.

Wydzielanie się metanu podczas robót eksploatacyjnych należy odnieść do tzw. środowiska ściany, obejmującego obszar górotworu związany z prowadzoną eksploatacją, z którego wydziela się metan mogący wypływać do wyrobisk górniczych i zrobów ściany, stwarzając zagrożenie. Przez środowisko ściany należy rozumieć:

- pokład eksploatowany w parceli ściany wraz z wyrobiskami przyścianowymi,
- obszar desorpcji metanu w górotworze,
- zroby poeksploatacyjne mające połączenie z obszarem desorpcji,
- zroby poeksploatacyjne przylegające do pola ścianowego,
- wyrobiska korytarzowe przechodzące przez obszar desorpcji.

Rozkład ciśnienia i przepuszczalności w pokładzie wybieranym przed frontem eksploatowanej ściany przedstawiono na rysunku 2. Z badań wynika, że przepuszczalność pozwalająca na przepływ metanu w płaszczyźnie pokładu występuje w bardzo niewielkiej odległości przed ścianą, a wartość ciśnienia gazu w tym obszarze jest zbliżona do wartości ciśnienia atmosferycznego. Jednocześnie w odległości kilku – kilkunastu metrów przed frontem ściany wartość przepuszczalności pokładu jest zbliżona do wartości przepuszczalności występującej w warunkach naturalnych w złożu nienaruszonym.

Na skutek różnicy wytrzymałości skał, w których zalega wybierany pokład, nad i pod wybraną przestrzenią następuje rozwarstwienie i tworzenie się tak zwanych pustek Webera. Pustki te stanowią rezerwuary metanu.



Rys. 2. Rozkład ciśnienia p gazu i przepuszczalności K w pokładzie eksploatowanym (Kozłowski, Grębski 1982)

Fig. 2. Distribution of gas pressure p and permeability K in exploited seam (Kozłowski, Grębski 1982)

Strefy zwiększonej przepuszczalności, jak i pustki spowodowane rozwarstwieniem, rozciągają się nad i pod zrobami pokładu. W strefach odprężenia przepuszczalność gazowa jest tak duża, że praktycznie gaz może się przemieszczać na odległości przekraczające długość ścian.

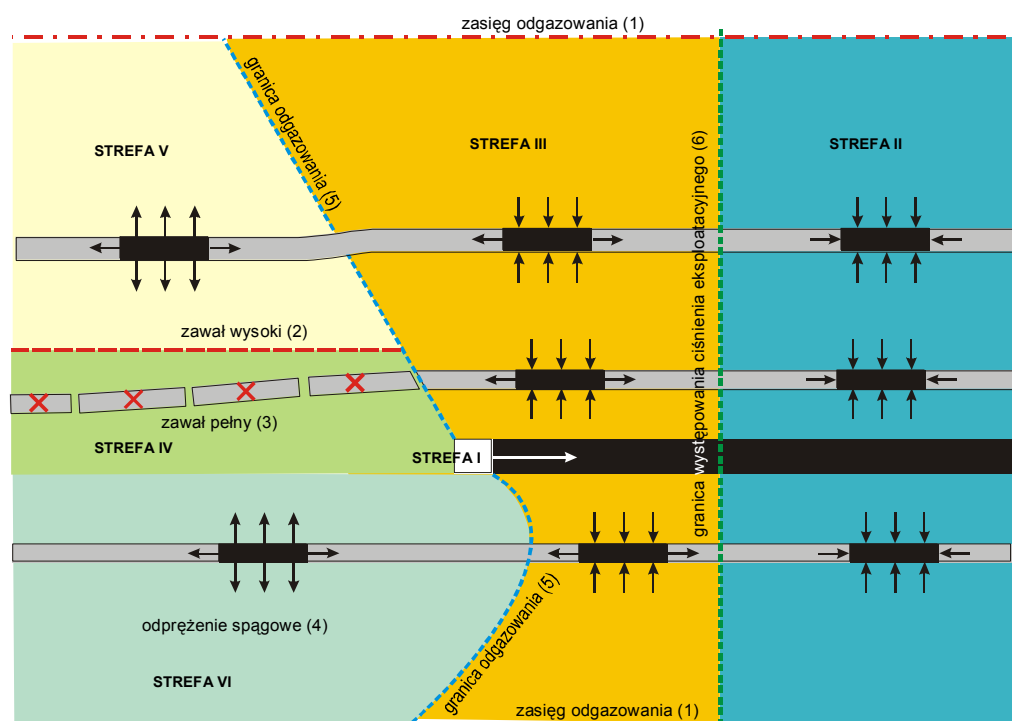
Wzdłuż osi pola ścianowego możliwości przepływu metanu są również ściśle związane z przepuszczalnością. Na skutek rozwarstwienia górotworu przepuszczalność w pokładach podbieranych i nadbieranych wzrasta do pewnej odległości od ściany, osiągając najwyższe wartości w odległości około 100 m, a nawet 200 m od ściany w warstwach podbieranych i około 30–50 m w warstwach nadbieranych. W miarę oddalania się od frontu ściany gruzowisko zawałowe ulega zagnieceniu i przepuszczalność ponownie zmniejsza się.

Gdy w górotworze odprężonym wytworzy się sieć spękań i szczelin oraz, na skutek intensywnej desorpcji, nastąpi spadek ciśnienia metanu do ciśnienia zbliżonego do atmosferycznego, a także zwiększy się wielokrotnie współczynnik przepuszczalności, to nawet niewielka zmiana ciśnienia atmosferycznego w sposób wyraźny może zmienić zarówno kierunek przepływu metanu w górotworze, jak i jego ilość. Metan z górotworu odprężonego będzie migrować zgodnie z rozkładem potencjału aerodynamicznego w środowisku ściany. Można przyjąć, że nawet niewielka zmiana ciśnienia w strefie górotworu odprężonego, wywołana wstrząsem sejsmicznym, może być przyczyną dużej zmiany objętości metanu wydzielonej do wyrobisk.

Rozkład stref odgazowania górotworu w środowisku ściany przedstawiono na rysunku 3:

- Strefa I – to przewietrzane powietrzem wentylacyjnym wyrobisko ścianowe, w którym występuje intensywne odgazowanie jego czoła oraz urobionego węgla. W czole ściany przepuszczalność węgla jest bardzo duża, a ciśnienie metanu zbliżone do atmosferycznego (rys. 2), dlatego wstrząs którego skutki będą widoczne w pobliżu czoła ściany może spowodować **wydzielenie się stosunkowo niewielkich ilości metanu**.
- Strefa II – obejmuje obszar górotworu przed strefą odgazowania i ciśnienia eksploatacyjnego. Wstrząs górotworu, którego skutkiem będzie wytworzenie szczelin i zniszczenie struktury węgla **spowoduje bardzo duże zagrożenie związane z wydzielaniem się metanu bezpośrednio do wyrobisk przyścianowych**, ponieważ spękania i szczeliny będą mieć kontakt z tymi wyrobiskami.
- Strefa III – to obszar górotworu w strefie odgazowania i ciśnienia eksploatacyjnego. W strefie tej występują naprężenia ściskające prostopadłe do uławicenia (zmniejszające przepuszczalność) oraz naprężenia rozciągające i ścinające równoległe do uławicenia (zwiększające przepuszczalność i częściowo niszczące strukturę węgla). Wystąpienie w tej strefie, już częściowo przygotowanej do odgazowania, wstrząsu wysokoenergetycznego, **może skutkować dużym wzrostem zagrożenia metanowego, przy czym wypływ metanu do wyrobisk będzie znacznie szybszy niż w strefie II**. Wytworzone szczeliny i spękania będą mieć kontakt zarówno z wyrobiskiem ścianowym, z wyrobiskami przyścianowymi, jak i ze zrobami ściany.
- Strefa IV – to obszar górotworu obejmujący tzw. zawał pełny, którego wysokość jest równa około 4–5-krotnej miąższości warstwy eksploatowanej. W strefie tej pokłady zalegające w stropie ulegają praktycznie całkowitej destrukcji i znacznemu odgazowaniu. Przepuszczalność jest duża, a pustki i szczeliny wypełnione są metanem pod ciśnieniem równym ciśnieniu atmosferycznemu. **Skutkiem wstrząsu górotworu może być wypchnięcie metanu ze zrobów do wyrobisk („zjawisko tłoka”), przy czym poziom zagrożenia metanowego będzie zależny od systemu przewietrzania.**

- Strefa V – to obszar górotworu obejmujący odprężone pokłady stropowe powyżej zawału pełnego. W strefie tej występują naprężenia rozciągające, przepuszczalność jest bardzo duża, a w odprężonych pokładach następuje długotrwała desorpcja metanu. **Skutkiem wstrząsu wysokoenergetycznego będzie dodatkowe zniszczenie struktury węgla w tych pokładach, wzrost desorpcji metanu, a co za tym idzie – wzrost wydzielania do zrobów ściany. Zagrożenie metanowe będą powodować wyłącznie zroby.**
- Strefa VI – to obszar górotworu obejmujący odprężone pokłady zalegające w spągu. Zjawiska wstrząsów zachodzące w tej strefie będą, co do mechanizmu przebiegu wydzielania metanu, podobne jak w strefie V, lecz zasięg występowania zwiększonej przepuszczalności pokładów będzie znacznie mniejszy niż w przypadku pokładów występujących w warstwach stropowych. **Zagrożenie metanowe będą powodować wyłącznie zroby.**



Rys. 3. Rozkład stref (I–VI) odgazowania górotworu w środowisku ściany: 1 – zasięg odgazowania, 2 – zawał wysoki, 3 – zawał pełny, 4 – odprężenie spagowe, 5 – granica odgazowania, 6 – granica występowania ciśnienia eksploatacyjnego

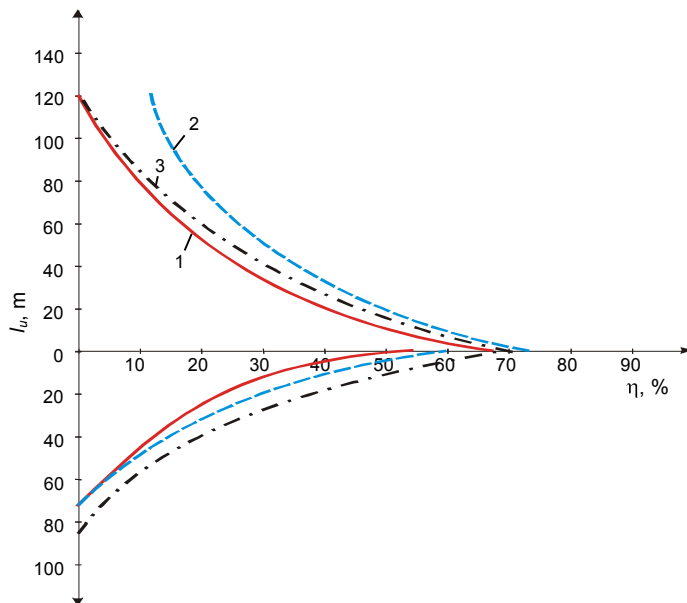
Fig. 3. Layout of rock mass degasification zones (I–VI) in the longwall environment: 1 – degasification range, 2 – high partial roof caving, 3 – roof caving, 4 – floor relaxation, 5 – degasification border, 6 – border of occurrence of abutment pressure

Występowanie wstrząsów, w zależności od ich lokalizacji, odpowiednio zwiększa w czasie stopień odgazowania pokładów, a tym samym wpływa na wzrost wydzielania metanu w środowisku ściany.

Strumień metanu dopływającego do środowiska ściany, po zaistniałym wstrząsie górotworu, może pochodzić z pokładu eksploatowanego oraz pokładów podebranych i nadebranych, objętych strefą przepuszczalności gazowej w zasięgu oddziaływania energii fali sejsmicznej. W warunkach lokalizacji epicentrum wstrząsu w parceli ściany przed jej frontem należy liczyć się przede wszystkim z dopływem metanu do wyrobisk, głównie z pokładu eksploatowanego, w mniejszym stopniu z pokładów niżej i wyżej zalegających. Pokład eksploatowany przed frontem ściany jest nasycony metanem w ilości odpowiadającej jego metanonośności pierwotnej. Z eksploatowanego pokładu, zniszczonego na skutek wstrząsu lub tąpnięcia, są uwalniane desorbowalne zasoby metanu do wyrobisk przyścianowych.

Reasumując, zniszczenie struktury pokładu eksploatowanego przed frontem ściany, na skutek wstrząsu, stwarza bardzo duże zagrożenie wypływu metanu do wyrobisk przyścianowych, zależne od stopnia i objętości zniszczenia oraz metanonośności pokładu.

W wyniku występowania wstrząsów nad lub pod pokładem eksploatowanym w strefie odprężenia eksploatacyjnego wzrasta stopień odgazowania pokładów w stosunku do odgazowania pokładów w warunkach niewystępowania aktywności sejsmicznej górotworu. Na rysunku 4 przedstawiono szacunkowy wpływ wstrząsów górotworu w rejonie ścian na zwiększenie zasięgu i stopnia odgazowania pokładów podebranych oraz nadebranych w obszarze odprężenia eksploatacyjnego.



Rys. 4. Stopień odgazowania η pokładów stropowych i spagowych w środowisku ściany w warunkach występowania wstrząsów (Krause 2004): l_u – odległość umowna, 1 – stopień odgazowania (bez aktywności sejsmicznej), 2 – stopień odgazowania (wstrząs w stropie), 3 – stopień odgazowania (wstrząs w spagu)

Fig. 4. Degasification degree η of roof and floor seams in longwall environment in conditions of shocks occurrence (Krause 2004): l_u – conventional distance, 1 – degasification degree (without seismic activities), 2 – degasification degree (shock in roof), 3 – degasification degree (shock in floor)

W przypadku lokalizacji epicentrum wstrząsów nad pokładem eksploatowanym należy liczyć się ze znaczącym zwiększeniem się zasięgu i wielkości strefy odgazowania pokładów podebranych (linia przerywana), przy jednocześnie mniejszym zasięgu strefy odgazowania pokładów nadebranych. W sytuacji, gdy epicentrum wstrząsu znajduje się pod pokładem eksploatowanym wystąpi sytuacja odwrotna (linia przerywana z kropkami). **Zwiększenie stopnia odgazowania pokładów podebranych i nadebranych w środowisku ścian, na skutek aktywności sejsmicznej, przyczynia się do zwiększenia wielkości strumienia metanu dopływającego do wyrobisk rejonów eksploatacyjnych, tym samym okresowego wzrostu ich metanowości bezwzględnej**

2. WPLYW PROFILAKTYKI TAPANIOWEJ NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ ZAGROŻENIA METANOWEGO

Doświadczenia uzyskane podczas eksploatacji pokładów węgla zalegających w górotworze skłonnym do tapani pozwalają na sformułowanie wielu zaleceń, których uwzględnienie, na etapie projektowania robót górniczych, w istotny sposób wpływa na zmniejszenie zagrożenia tapaniami. Profilaktykę tapaniową, obejmującą metody oceny stanu zagrożenia tapaniami oraz metody zwalczania tapani, opisano w publikacji (Konopko 2005). Metody zwalczania tapani zostały podzielone na długofalowe i doraźne (aktywne). W metodach długofalowych istniejące zagrożenia uwzględnia się już na etapie dokumentowania złoża i odpowiednio wykorzystuje informacje w projektowaniu udostępniania i rozcinania złoża oraz maksymalnego wykorzystania efektu eksploatacyjnego odprężenia pokładu. Zastosowanie metod długofalowych w zasadniczy sposób rzutuje na wyprzedzające częściowe odgazowanie, tym samym zmniejszenie metanonośności pierwotnej pokładów, przez ich odprężenie. Częściowe odprężenie, w wyniku którego następuje odgazowanie pokładów zagrożonych tapaniami, przewidzianych w okresie późniejszym do eksploatacji, z uwagi na zagrożenie metanowe jest najskuteczniejsze. Eksploatacja pokładów tąpiących, które zostały wcześniej częściowo odprężone i odgazowane, zmniejsza w zasadniczy sposób możliwość niekontrolowanych wpływów metanu ze złoża w wyniku wstrząsów lub tąpiń. Aktywne metody zwalczania tapani w wyniku destrukcji pokładu lub górotworu (MW, wodą, otworami odprężającymi) powodują zmniejszenie poziomu zagrożenia tapaniami i metanowego.

Analizując zagrożenie metanowe oraz wpływ na nie stosowanych metod profilaktyki tapaniowej, w dalszej części artykułu odniesiono się do tych, które wzajemnie się uzupełniają i mogą powodować zmniejszenie zagrożenia tapaniami i metanowego w warunkach ich współwystępowania.

Profilaktykę tapaniową należy rozpatrywać w odniesieniu do stref odgazowania górotworu (rys. 3), ponieważ zastosowane środki mogą implikować różne skutki w różnych obszarach górotworu. Analizą objęto wspomniane metody profilaktyki tapaniowej, które rzutują na poziom występującego zagrożenia metanowego, a mianowicie:

- odprężanie pokładów tąpniętych za pomocą wybierania pokładów odprężających (metoda długofalowa),
- destrukcja skał zwięzłych za pomocą strzelań torpedujących oraz szczelinowanie skał techniką hydrauliczną lub strzelniczą (metody aktywne).

3. WYBIERANIE POKŁADÓW ODPRĘŻAJĄCYCH I ODPRĘŻONYCH

Wybieranie pokładów metanowych odprężających w dwojaki sposób wpływa na stan zagrożenia metanowego:

- W czasie wybierania pokładu odprężającego (podczas eksploatacji którego występowanie wstrząsów wysokoenergetycznych jest możliwe) stan zagrożenia metanowego najczęściej odpowiada pierwotnym warunkom geologiczno-gazowym. Jeżeli zatem pokłady (odprężany i odprężający) znajdują się w niewielkiej odległości, a ich metanonośności pierwotne M_0 są duże – powyżej $4,5 \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{csw}}$ – to zagrożenie metanowe w czasie prowadzenia eksploatacji pokładu odprężającego będzie znaczące.
- W czasie wybierania wcześniej odprężonego pokładu ma się do czynienia z jego metanonośnością w znacznym stopniu zmniejszoną (metanonośnością wtórną M_w), a zatem również ze zmniejszonym wydzielaniem metanu do środowiska ściany, przy jednoczesnym zmniejszonym zagrożeniu tąpnięciami. Sposób ten uznać należy za najbardziej skuteczny i celowy.

Metanonośność pokładu odprężonego zmienia się następująco

$$M_w = M_0(1 - \eta), \text{ m}^3/\text{Mg}_{\text{csw}} \quad (1)$$

gdzie:

M_w – metanonośność wtórna (po odgazowaniu), $\text{m}^3/\text{Mg}_{\text{csw}}$;

M_0 – metanonośność pierwotna, $\text{m}^3/\text{Mg}_{\text{csw}}$;

η – stopień odgazowania, %.

Stopień odgazowania pokładu odprężanego określa się na podstawie krzywych odgazowania (linie ciągłe – rys. 4), wyznaczonych zależnościami (Krause, Łukowicz 2000):

- jeżeli pokład odprężający jest wybierany powyżej pokładu odprężanego

$$\eta = 0,5414e^{-0,037l_u} \quad (2)$$

- jeżeli pokład odprężający wybierany jest poniżej pokładu odprężanego

$$\eta = 0,6771e^{-0,04l_u} \quad (3)$$

gdzie l_u – odległość umowna pokładu odprężającego od odprężanego; oblicza się ją ze wzoru

$$l_u = \frac{l}{m_e \alpha} \quad (5)$$

gdzie:

l – rzeczywista odległość pokładu nadebranego lub podebranego od pokładu eksploatowanego, m;

m_e – miąższość eksploatacyjna pokładu odprężającego, m.

α – współczynnik zależny od sposobu wypełnienia zrobów, który wynosi:

- 1 – dla eksploatacji z zawałem stropu,
- 0,3–0,5 – dla eksploatacji z podsadzką suchą,
- 0,2–0,4 – dla podsadzki płynnej ze skał płonnych,
- 0,05–0,15 – dla podsadzki płynnej z piasku.

Podczas wybierania pokładu odprężającego zwiększa się również przepuszczalność górotworu, co ułatwia odgazowanie złoża w zasięgu środowiska ścian, eksploatowanych po pewnym czasie w pokładach odprężonych.

Zaznaczyć jednakże należy, że w przypadku wystąpienia wstrząsu wysokoenergetycznego, w czasie wybierania pokładu odprężonego, wpływ metanu do wyrobisk na skutek większej przepuszczalności będzie następował z większą kinetyką niż z górotworu nieodprężonego, jednakże przy mniejszej bezwzględnej objętości strumienia metanu dopływającego do środowiska ściany.

Reasumując, podczas prowadzenia eksploatacji w pokładzie odprężonym poziom zagrożenia metanowego na skutek aktywności sejsmicznej będzie wielokrotnie niższy niż w otoczeniu złoża nieodprężonego.

4. DESTRUKCJA GÓROTWORU ZA POMOCĄ STRZELAŃ TORPEDUJĄCYCH

Metoda strzelań torpedujących polega na wykonywaniu otworów wiertniczych (o średnicy najczęściej 75 mm) w skałach zwięzłych i jednoczesnym odpalaniu w nich ładunków materiału wybuchowego w ilości 200–500 kg. W sąsiedztwie otworu powstaje wtedy sieć spękań i szczelin, która powoduje zmniejszenie wytrzymałości warstwy zwięzłej, czego wynikiem jest łatwiejsze załamywanie się skał stropowych. Ponadto, strzelaniami torpedującymi są prowokowane wstrząsy górotworu zarówno nisko-, jak i wysokoenergetyczne. Metoda strzelań torpedujących nie może mieć większego wpływu na profilaktykę metanową z powodu niewielkiego zwiększenia zasięgu przepuszczalności skał. Jednakże, gdyby w pobliżu sieci takich otworów lub zeszczelinowania górotworu zostało zlokalizowane epicentrum wstrząsu, to należy się liczyć z ułatwionym wypływem metanu do wyrobisk, ponieważ sieć spękań i szczelin z reguły ma połączenie z wyrobiskami lub zrobami środowiska ściany.

5. SZCZELINOWANIE SKAŁ ZWIĘZŁYCH (HYDRAULICZNE LUB STRZELNICZE)

Szczelinowanie skał zwięzłych może powodować pękanie górotworu w żądanych kierunkach. Zasięg szczelin zależy od własności skał (wytrzymałości, porowatości, budowy i struktury, uławicenia itd.), a także od wytwarzanego w otworze ciśnienia.

Metodą tą uzyskuje się znaczny zasięg rozwarstwienia skał. Wyniki badań i obserwacji potwierdzają, że jeżeli szczelinowanie przebiega zgodnie z kierunkiem uwarstwienia, zasięg szczelin wynosi 30–70 m od otworu. Jeżeli szczelinowanie jest ukierunkowane w poprzek uwarstwienia, to uzyskuje się zasięg szczelin do grubości warstwy (nawet około 20 m). Otwory wiertnicze są wykonywane z wyrobisk przyścianowych oraz ze ściany. Powoduje to, że zasięg hydroszczelinowania jest niewielki w porównaniu do szerokości pola ścianowego. Jeżeli warstwy, w których jest wykonywane szczelinowanie znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie pokładu eksploatowanego, to będzie istnieć kontakt tych szczelin z wyrobiskami przyścianowymi, a więc wypływ metanu z górotworu do tych wyrobisk będzie ułatwiony. W przypadku wystąpienia wstrząsu w strefie II lub III (rys. 3) może dojść do zwiększonego wydzielania metanu w rejonie ściany i zwiększenia zawartości metanu w wyrobiskach środowiska ściany. Jeżeli epicentrum wstrząsu wystąpi w strefie V lub VI, wydzielający się metan spowoduje zwiększenie metanowości zrobów ścianowych i tym samym zwiększenie ilości wypływającego z nich metanu do wyrobisk rejonu ściany, w wydłużonym czasie.

Wpływ wymienionych metod profilaktyki tapaniowej na kształtowanie się zagrożenia metanowego w poszczególnych strefach środowiska ściany, przedstawionych na rysunku 3, zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Oddziaływanie poszczególnych środków profilaktyki tapaniowej na strefy odgazowania i jej skutki dla zagrożenia metanowego

Metoda profilaktyki	Oddziaływanie w strefach odgazowania					
	Strefa I	Strefa II	Strefa III	Strefa IV	Strefa V	Strefa VI
	wyrobisko ścianowe	górotwór przed granicą ciśnienia eksploatacyjnego	górotwór między granicą ciśnienia eksploatacyjnego a granicą odgazowania	zawał pełny	zawał wysoki	warstwy nadbierane pod zawałem
Wybieranie pokładów odprężających	znacznie mniejsze wydzielanie metanu z urobku i ociosu na skutek zmniejszenia metanonośności w pokładach odprężonych wybraniem pokładu odprężającego	zmniejszona metanonośność lecz zwiększona przepuszczalność; ułatwiona migracja metanu do wyrobisk przyścianowych	zmniejszona metanonośność lecz zwiększona przepuszczalność; ułatwiona migracja metanu do ściany i do zrobów ścianowych przy zmniejszonym wydzielaniu	znacząco zmniejszona metanonośność otoczenia środowiska ściany, tym samym metanowość zrobów w ścianach w pokładzie odprężonym	zmniejszona metanonośność otoczenia środowiska ściany; zmniejszenie metanowości zrobów	zmniejszona metanonośność i zwiększona przepuszczalność; wzrost zagrożenia metanowego ze strony pokładów spagowych – w przypadku znacznego wydzielania metanu możliwość dopływu metanu wolnego wprost do wyrobiska ścianowego
Strzelanie torpedujące	w niewielkim stopniu zwiększona przepuszczalność, niewielki wpływ na zagrożenie metanowe	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych, ułatwiających migrację metanu do wyrobisk przyścianowych	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych ułatwiających migrację metanu do wyrobisk przyścianowych i zrobów ściany	praktycznie brak wpływów zarówno pozytywnych, jak i negatywnych	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych ułatwiających migrację metanu do zrobów ściany	praktycznie brak wpływów zarówno pozytywnych, jak i negatywnych
Szczelinowanie	jeżeli szczelinowanie jest wykonywane ze ściany – zwiększenie przepuszczalności i możliwość wpływu metanu do ściany	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych, ułatwiających migrację metanu do wyrobisk przyścianowych	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych ułatwiających migrację metanu do wyrobisk przyścianowych i zrobów ściany	praktycznie brak wpływów zarówno pozytywnych, jak i negatywnych	możliwość wytworzenia połączeń szczelinowych ułatwiających migrację metanu do zrobów ściany	praktycznie brak wpływów zarówno pozytywnych, jak i negatywnych

6. CHODNIKI DRENAŻOWE JAKO ŚRODEK PROFILAKTYKI TĄPANIOWO-METANOWEJ

W warunkach bardzo dużego zagrożenia metanowego jako skuteczny środek zwalczania zagrożenia metanowego sporadycznie jest stosowany drenaż nadległy. Metoda ta polega na ujmowaniu metanu, wydzielającego się w czasie eksploatacji, zza tam izolujących chodniki; specjalnie wykonane nad polem ściany. Efektywność odmetanowania górotworu w środowisku ściany metodą drenażu nadległego wynosi 70–80%, a więc jest bardzo duża. Spośród kopalń GZW metoda ta jest stosowana od kilku lat z dużym powodzeniem w kopalni „Brzeszcze”, ponadto w kopalniach „Wesoła” i „Sośnica”, a ostatnio projektuje się odmetanowanie tym sposobem w kopalni „Szczygłowice”.

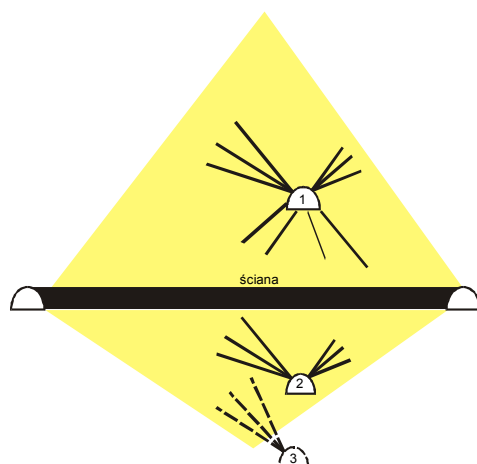
W kopalni „Wesoła” chodniki drenażowe są wykonywane w pokładzie 418, w celu ułatwienia odmetanowania pokładu 501, odprężającego pokład 510. W kopalni „Sośnica” dla eksploatowanego silnie metanowego pokładu 413/1 został wykonany chodnik drenażowy w pokładzie 412/1, który warunkuje prowadzenie bezpiecznej eksploatacji. W projektowanej ścianie 13 w pokładzie 405/1 z przecznicy II poz. 850 m w kopalni „Szczygłowice” o prognozowanej metanowości około 100 m³ CH₄/min, przewiduje się wykonanie chodnika drenażowego w pokładzie 404/4. Jedynie wykonanie takiego chodnika stworzy możliwość prowadzenia eksploatacji przy istniejących uwarunkowaniach wentylacyjnych.

Nadmienić należy, że w przypadku eksploatacji podpoziomowej w kopalniach węgla kamiennego zwiększy się znaczenie odmetanowania z wyrobisk wykonanych powyżej prowadzonej eksploatacji lub z istniejących zrobów poeksploatacyjnych. Ograniczone możliwości wentylacyjne oddziałów podpoziomowych wymuszają potrzebę poszukiwania rozwiązań, pozwalających na zczyrywanie desorbowlanych ilości metanu, uwalnianych podczas eksploatacji, do wyrobisk nadległych (istniejących) lub wykonanych specjalnie w celu prowadzenia bezpiecznej eksploatacji.

Chodnik drenażowy jest wykonywany w celu odprowadzenia metanu z jak największej objętości górotworu odprężanego podczas eksploatacji. Korzystne jest wykonywanie otworów wiertniczych z tego chodnika do skał otaczających, w tym do warstw zwięzłych. Wykonanie szczelinowania takich otworów, zwiększające stopień zdrenowania górotworu, jest celowe, a w warunkach występowania zagrożenia tapaniami wręcz niezbędne. Zwiększenie przepuszczalności górotworu wokół chodnika drenażowego nie powoduje osłabienia „izolacyjności” górotworu na kontakcie z wyrobiskami przyścianowymi, a więc nie stanowi ułatwienia w migracji metanu do tych wyrobisk. Cechą drenażu nadległego jest również wytworzenie dodatkowej wolnej przestrzeni w górotworze, która samoczynnie kompensuje wzrost ciśnienia gazu spowodowanego dodatkowym wpływem metanu na skutek wstrząsu sejsmicznego.

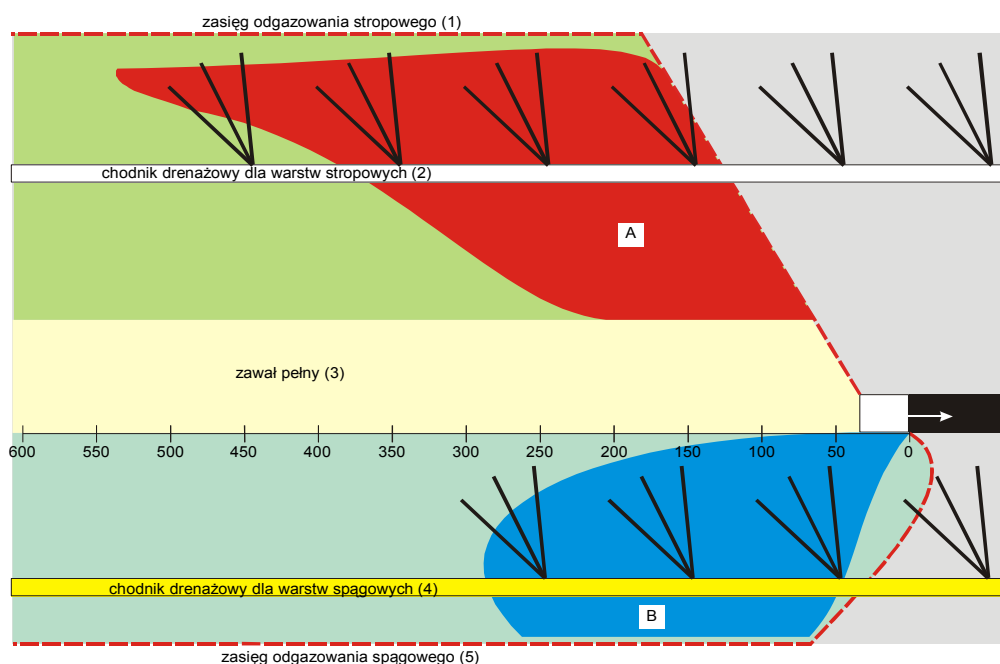
Podobne jest działanie tzw. drenażu podległego, wykorzystywanego obecnie sporadycznie. Odmetanowanie z wyrobisk wykonanych w niżej zalegającym pokładzie było stosowane w kopalni „Sośnica” – dotyczyło eksploatacji pokładu 404/5 z C9R i było prowadzone z wyrobisk w pokładzie 405/1.

Możliwe usytuowanie drenażu nadległego i podległego jako efektywnego środka profilaktyki tapaniowo-metanowej pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Usytuowanie chodników drenażowych w stosunku do ściany: 1 – chodnik drenażowy dla warstw stropowych, 2 i 3 – dla warstw spagowych

Fig. 5. Location of gas-drainage galleries in relation to longwall: 1 – gas-drainage gallery for roof layers, 2 and 3 – for floor layers



Rys. 6. Usytuowanie chodników drenażowych w stropie i spagu ściany oraz obszary intensywnego ujęcia metanu: A – obszar intensywnego odgazowania warstw stropowych, B – obszar intensywnego odgazowania warstw spagowych

Fig. 6. Gas-drainage galleries location at longwall roof and floor, and areas of intensive methane removal: A – area of intensive degasification of roof layers, B – area of intensive degasification of floor layers; 1 – range of roof degasification, 2 – gas-drainage gallery for roof layers, 3 – roof caving, 4 – gas-drainage gallery for floor layers, 5 – range of floor degasification

Lokalizacja otworów odmetanowania, ich długość i kierunek z chodników drenażowych są zależne od usytuowania pokładów zalegających w strefie odprężenia eksploatacyjnego oraz usytuowania parceli eksploatacyjnej w sieci wentylacyjnej kopalni i są objęte zakresem projektu odmetanowania opracowanego dla danej ściany.

Można mieć nadzieję, że w profilaktyce tapaniowo-metanowej, metoda drenowania górotworu odprężanego eksploatacją za pomocą specjalnie wykonanych wyrobisk nabierać będzie coraz większego znaczenia, w miarę eksploataowania złożeń na coraz większych głębokościach.

Oprócz opisanych metod można stosować hydroszczelinowanie w tzw. otworach kierunkowych, wykonywanych z chodników drenażowych w celu odmetanowania (nad lub pod pokładem eksploatowanym równolegle do wybiegu ściany). Zagadnienie to nie jest jednak rozwiązane w górnictwie światowym, a niniejszą propozycję należy potraktować jako wstępną, wymagającą oceny możliwości jej zastosowania i ewentualnego ukierunkowania, i podjęcia dalszych badań.

PODSUMOWANIE

Niebezpieczne wypływy metanu po zaistniałych, w polskich kopalniach węgla kamiennego, wstrząsach wysokoenergetycznych o energii powyżej 10^5 J oraz ich syntetyczna analiza pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Doświadczenia ruchowe kopalń w ostatnich dziesięciu latach potwierdziły, że podczas eksploatacji silnie metanowego złoża wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu, o energii powyżej 10^5 J, mogą przyczynić się do wystąpienia niekontrolowanych niebezpiecznych wpływów metanu i powstania w wyrobiskach atmosfery niezgodnej z obowiązującymi przepisami, wybuchowej, ponadwybuchowej oraz niezdatnej do oddychania.
2. Metanonośność złoża, lokalizacja epicentrum wstrząsu, usytuowanie pokładów podebranych i nadebranych, stosowany układ przewietrzania ściany są czynnikami wpływającymi na kinetykę oraz wielkość strumienia metanu dopływającego do wyrobisk środowiska ściany po zaistniałym wstrząsie.
3. Współwystępowanie zagrożeń tapaniami i metanowego wymaga opracowania wyprzedzającej profilaktyki tapaniowo-metanowej, ograniczającej ewentualny poziom zagrożenia wpływami metanu. Na obecnym etapie badań każdy przypadek eksploatacji powinien być rozważany i oceniany indywidualnie.
4. Wybieranie pokładów odprężających, pomimo zwiększenia przepuszczalności złoża, jest bardzo korzystne z uwagi na znaczące zmniejszenie się metanonośności pierwotnej do wtórnej w pokładach odprężonych na skutek ich częściowego odgazowania.
5. Metody destrukcji górotworu zarówno z zastosowaniem strzelań torpedujących, jak i metod szczelinowania, z uwagi na zagrożenie metanowe, powinny być stosowane rozważnie, ponieważ w wyniku wstrząsu wcześniejsze zeszczelinowanie ułatwia wypływ metanu do wyrobisk przyścianowych.

6. Zastosowanie chodników drenażowych zarówno w warstwach stropowych, jak i spągowych, jest skutecznym środkiem profilaktyki tapaniowo-metanowej. Wykonywane z tych chodników otwory drenażowe powinny być poddane szczelinowaniu, co wpłynie pozytywnie na redukcję zarówno zagrożenia metanowego, jak i tapaniami.

Literatura

1. Drzewiecki J. (2004): *Optymalizacja koncentracji wydobywania w warunkach zagrożenia tapaniami i metanem*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Tapania 2004. Katowice, GIG.
2. Dubiński J., Konopko W. (2000): *Tapania – ocena – prognoza – zwalczanie*. Katowice, GIG.
3. Konopko W., Myszkowski J. (1994): *Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopnia zagrożenia tapaniami*. Prace Naukowe GIG. Nr 795.
4. Konopko W. (2005): *Wyprzedzająca profilaktyka tapaniowa*. Przegląd Górniczy Nr 9.
5. Krause E. (2004): *Kształtowanie się zagrożenia metanowego i wybuchowego w rejonach eksploatacyjnych ścian o wysokiej aktywności sejsmicznej*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Tapania 2004. Katowice, GIG.
6. Krause E., Łukowicz K. (2004): *Odmetanowanie w polskich kopalniach węgla kamiennego – osiągnięcia i perspektywy*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Tapania 2004. Katowice, GIG.
7. Krause E., Łukowicz K. (2000): *Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian*. Instrukcja nr 14. Katowice, GIG.
8. Kozłowski B., Grębski Z. (1982): *Odmetanowanie górotworu w kopalniach*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Konopko

*Leokadia Róg***PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ NATURALNA WĘGLI KAMIENNYCH
I FRAKCJI GĘSTOŚCIOWYCH WĘGLA O ZRÓŻNICOWANEJ
BUDOWIE PETROGRAFICZNEJ I CHEMICZNEJ****Streszczenie**

Węgiel kamienny, jak każdy surowiec mineralny, charakteryzuje się pewną zawartością naturalnych izotopów promieniotwórczych. Ich ilość zależy od ilości i rodzaju zanieczyszczeń zawartych w węglu. Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w stałych odpadach ze spalania węgla kamiennego jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o możliwościach ich wykorzystania. Wymagania stawiane przez ochronę środowiska i odbiorców węgla kamiennego zmuszają do produkcji sortymentów o ściśle określonych parametrach jakościowych. Spełnienie tych wszystkich wymagań jest możliwe jedynie przy dobrej znajomości parametrów jakościowych węgla stanowiącego nadawę do procesów wzbogacania. Optymalizacja procesu wzbogacania w cieczach ciężkich na podstawie znajomości składu petrograficznego nadawy, a także zależności między składem petrograficznym węgla i składem chemicznym popiołu a interesującą nas właściwością czy składnikiem, daje możliwość uzyskania koncentratów węglowych o właściwościach wymaganych lub zbliżonych do wymaganych przez odbiorców.

Zależności między składnikami petrograficznymi węgla i współwystępującą z nimi substancją mineralną (charakteryzowaną składem chemicznym popiołu) a zawartością naturalnych izotopów promieniotwórczych są słabo rozpoznane. Znajomość tych zależności daje możliwość produkcji węgla energetycznych, przyjaznych dla środowiska nie tylko z uwagi na konieczność ograniczania emisji, ale również dzięki temu, że powstające podczas ich spalania odpady, mogą być wykorzystywane do produkcji materiałów budowlanych lub bezpiecznie składowane.

Badania wykazały, że zawartość radionuklidów różnicuje się w zależności od klasy ziarnowej węgla (sortymentu). Maksymalne zawartości poszczególnych izotopów są znacznie większe w mialach niż w sortymentach grubych i średnich. W sortymentach grubych i średnich wrasta stężenie radionuklidów wraz ze wzrostem sumarycznej ilości macerałów grupy wityritu i karbargilitu, w którym substancja mineralna współwystępuje z wityritem. W sortymentach grubych i średnich stwierdzono regularny wzrost zawartości wszystkich izotopów w miarę wzrostu zawartości popiołu. W przypadku mialów taka korelacja jest wyraźnie widoczna dla izotopu ^{40}K .

Zawartość radionuklidów zmienia się również wraz ze wzrostem gęstości węgla. W miarę wzrostu gęstości wydzielonych frakcji zwiększa się zawartość popiołu i stężenia izotopów promieniotwórczych. Maleje zawartość czystych, niezmineralizowanych mikrolitotypów wityritowych: wityritu, klarytu wityritowego oraz duroklarytu. Wzrasta natomiast wyraźnie zawartość karbominerytu, głównie karbargilitu (połączenia substancji węglowej z substancją ilastą). Najczęściej są to ziarna wityritowe i klarytowe przesycone substancją ilastą (zmineralizowany wityrit). Wraz ze wzrostem ilości popiołu, karbominerytu i izotopów promieniotwórczych we frakcjach zwiększa się zawartość SiO_2 i K_2O . Maleje natomiast zawartość: Fe_2O_3 i CaO , Na_2O , SO_3 i P_2O_5 . Wzrasta również zawartość: As i Rb, a obniża się zawartość Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sr i V.

Natural radioactivity of hard coals and coal density fractions of differentiated petrographical and chemical construction

Abstract

For hard coal, as for any other raw mineral material, some content of natural radioactive isotopes is characteristic. Their quantity depends of quantity and kind of contaminants contained in coal. Content of natural radioactive isotopes in solid waste materials from hard coal combustion is one of basic decisive parameters about possibilities of their utilisation. The demands put up by environmental protection and requirements of hard coal receivers force production of assortments with rigorously defined quality parameters. Fulfilment of all these requirements is possible only under the condition of good knowledge concerning qualitative parameters of coal constituting material fed mechanically for enriching processes. An optimisation of enriching process in heavy liquids on the ground of knowledge concerning fed material petrographical composition, as well as relations between petrographical composition of coal and ash chemical composition and the property or component we are interested in, gives us the possibility of obtaining of coal-extracts with required properties or closed to the properties required by receivers.

Relations between petrographical components of coal and coincidental mineral matter (characterised by chemical composition of ash) and content of natural radioactive isotopes are only weakly recognised. The knowledge of these dependencies gives possibility of production of steaming coals, environmentally friendly not only because of necessity of its issue limiting, but also owing to the fact that arising during their combustion waste materials can be used in production of building materials or may be safely dumped.

Investigations demonstrated that the content of specific radionuclides differentiates depending of coal grain-size categories. Maximal contents for each of isotopes are considerably greater in fines than in large and average coal sizes. For large and average size grades, concentration of radionuclides increases together with increase of total maceral quantities of group vitrinite and carbargilite, in which mineral matter coincides with vitrinite. For large and average size grades, regular increase of content of all isotopes was ascertained together with increase of ash content. In the case of fines such a correlation is clearly visible for isotope ^{40}K .

Radionuclides content also changes together with increase of coal density. As the density of extracted fractions grows larger, the content of ash and concentrations of radioactive isotopes increases. Decreases the content of clear, non-mineralised vitrinite microlitotypes: vitrite, vitrinite clarite and hardening clarite. However, clearly increases significantly content of carbominerite, mostly carbargilite (connections of coal-matter with silty matter). Most often these are the grains of vitrinite and clarite permeated with silty matter (mineralised vitrite). Together with growing quantity of ash, carbominerite and radioactive isotopes, the content of SiO_2 and K_2O in fractions increases. However, decreases content: Fe_2O_3 and CaO , Na_2O , SO_3 and P_2O_5 . Increases also content As and Rb, and drops content Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sr and V.

WPROWADZENIE

Węgiel kamienny jako paliwo energetyczne utrzymuje się cały czas na wysokiej pozycji, a liczne prognozy opracowywane przez krajowe i międzynarodowe instytucje wykazują, że zapotrzebowanie na to paliwo będzie nadal duże, pomimo wdrażania energooszczędnych technologii. Aby węgiel mógł być paliwem atrakcyjnym dla użytkownika, powinien być przede wszystkim paliwem przyjaznym dla środowiska. Wszystkie działania prowadzone w tym celu koncentrują się na produkcji wysokojaściowych węgla i ekologicznych paliw węglowych oraz wprowadzaniu nowych technologii spalania, redukujących negatywne oddziaływanie procesu spalania węgla na środowisko.

Węgiel kamienny, jak każdy surowiec mineralny, charakteryzuje się pewną zawartością naturalnych izotopów promieniotwórczych. Ich stężenie zależy od ilości

i rodzaju zanieczyszczeń mineralnych zawartych w węglu (Michalik, Chałupnik, Skowronek 1986; Jeżowska-Trzebiatowska, Kopacz, Mikulski 1990).

Stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych w skałach przywęglowych są nawet kilkakrotnie większe od stężeń stwierdzonych w węglu. Są one również większe od średnich zawartości w występujących w glebie. W rezultacie, na obszarach składowania odpadów skalnych pochodzących z eksploatacji węgla kamiennego obserwuje się wzrost mocy dawki promieniowania gamma w porównaniu do lokalnego tła (Michalik 2000). Źródłem promieniotwórczości węgla kamiennego oraz skał przywęglowych są między innymi skupienia wtórnych fosforanów, detrytyczny monacyt, cyrkon, ksenotym i uranotoryt występujące w postaci rozproszonych centrów radiacyjnych (Pindel 2000).

W czasie spalania węgla utlenianiu do postaci gazowej praktycznie ulega jedynie substancja organiczna węgla. Znaczna większość zanieczyszczeń, w tym także duża część izotopów promieniotwórczych, pozostaje w stałych produktach spalania. W związku z tym zostają one załączone w stosunku odwrotnie proporcjonalnym do zawartości popiołu. W raporcie UNSCEAR (Sources and Effects of Ionising Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000) energetyka konwencjonalna, której podstawę stanowi spalanie surowców kopalnych, jest wymieniona jako jedno z najistotniejszych, a na pewno, najbardziej rozpowszechnionych źródeł odpadów zawierających znacznie podwyższone zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych.

Wymagania stawiane przez ochronę środowiska i użytkowników węgla energetycznego zmuszają do produkcji sortymentów o ściśle określonych parametrach jakościowych (Róg 2003, 2004). Spełnienie tych wszystkich wymagań jest możliwe jedynie przy dobrej znajomości parametrów jakościowych eksploatowanych węgli oraz odpowiednim składzie nadawy do procesu wzbogacania. Celem wzbogacania jest uzyskanie z węgla surowego koncentratów o określonych właściwościach. Cechy określające jakość węgla i jego koncentratów można usystematyzować. Pierwsza grupa parametrów jakościowych obejmuje charakterystyki o najbardziej ogólnym znaczeniu, określające podstawowe właściwości węgla. Najczęściej jest to zawartość popiołu, wilgoci, siarki całkowitej. Druga grupa obejmuje parametry charakteryzujące dokładniej właściwości paliwa przydatnego do konkretnej technologii. W przypadku energetyki mogą to być: zawartość części lotnych, zdolność spiekania, podatność przemiałowa czy temperatura topliwości popiołu (Lorenz, Blaschke, Grudziński 2002; Blaschke Z., Blaschke W. 2003; Sztaba, Blaschke Z. 1996). Wymagania dotyczące ochrony środowiska zmierzają dodatkowo do kontrolowania w węglach energetycznych zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych. Ponieważ wszystkie te właściwości związane są z budową petrograficzną i chemiczną węgla oraz rodzajem występującej w nim substancji mineralnej (Róg 1998, 1999), istotne staje się rozpoznanie zależności między budową petrograficzną i chemiczną węgla a jego naturalną promieniotwórczością.

1. PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ NATURALNA WĘGLI

Zawartość uranu i toru w litosferze jest zróżnicowana w zależności od stopnia skupienia w niej minerałów zawierających te pierwiastki lub ich związki. Na etapie magmowym tor i uran koncentrowały się w płynnych roztworach resztkowych, zawierających dużo krzemionki, potasu i sodu. Stąd obserwuje się znacznie zróżnicowane zawartości tych pierwiastków w kwaśnych skałach magmowych i leukogranitach. Warunki sprzyjające tworzeniu własnych minerałów toru i uranu zaistniały dopiero na etapie pomagmowym (Pindel 2000).

W węglach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego występują przede wszystkim naturalne radionuklidy dwóch szeregów promieniotwórczych: uranowego z izotopem macierzystym ^{238}U i torowego z izotopem macierzystym ^{232}Th . W skład obydwu szeregów wchodzi między innymi izotopy radu ^{226}Ra z rodziny uranowej i ^{228}Ra z rodziny torowej. Średnia ich zawartość w węglach w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym wynosi odpowiednio dla pierwszego izotopu 18 Bq/kg, a dla drugiego 11 Bq/kg. Rozkład stężeń ^{226}Ra i ^{228}Ra nie jest równomierny na całym obszarze GZW. W niektórych częściach Zagłębia stężenia izotopów radu znacznie przewyższają wartości średnie (Pindel 2000).

Izotopy promieniotwórcze są zawarte w domieszkach mineralnych węgla. Substancja mineralna znajdująca się w węglu kamiennym jest niejednorodną mieszaniną związków chemicznych, z których niewielka tylko ilość jest chemicznie związana z substancją węglową, tworząc jednorodną mieszaninę (tzw. substancję mineralną wewnętrzną). Przeważająca część substancji mineralnej tworzy w węglu osobne skupienia różnej wielkości, od dostrzegalnych tylko pod mikroskopem do pasm kilkucentymetrowych i większej grubości (substancja mineralna zewnętrzna). Występuje ona najczęściej w postaci warstw poziomych różnej grubości, czasem wypełnia też pionowe szczeliny, a rzadko występuje nieregularnie. Pasma poziome powstały równocześnie z tworzeniem się warstw materiału roślinnego, substancja mineralna w szczelinach i pęknięciach, tworząca tam zwykle cienkie warstewki, osadziła się później już podczas procesu uwęglenia (Roga 1954).

Zawartość substancji mineralnej jest zróżnicowana w poszczególnych składnikach petrograficznych. Witryty zawierają najczęściej od 0,5 do 2% domieszek mineralnych i jest to przeważnie substancja mineralna wewnętrzna. Zawartość ta jest więc nawet czasem mniejsza od zawartości substancji mineralnej w pierwotnym materiale roślinnym. Na przykład liście brzozy zawierają 5,8%, liście dębu 4,5%, a szpilki sosny 2,8% składników mineralnych. Tłumaczy się to pochłanianiem pierwiastków nieorganicznych przez roślinność wyrastającą na pokładach szczątków roślinnych, a także wypłukiwaniem ich przez wodę przeciekającą przez pokłady torfu czy węgla. Witryty z większą zawartością substancji mineralnej zawdzięczają ją drobnym szczelinom wypełnionym substancją mineralną zewnętrzną. Liptyt – podobnie jak witryt – wykazuje małą zawartość substancji mineralnej. Najczęściej zawartość popiołu A^d (pozostałość po spaleniu), mieści się w granicach od 0,8 do 1,2%. Popiół ten pochodzi głównie z bardzo

drobnodispersyjnych siarczków. Zawartość substancji mineralnej w inertycie jest zmienna w szerokim zakresie i zależna od stopnia mineralizacji komórek fuzynitu i semifuzynitu.

Rodzaj substancji mineralnej i sposób jej występowania wpływają na zróżnicowanie właściwości mechanicznych poszczególnych macerałów, a to z kolei jest przyczyną gromadzenia się macerałów w różnych klasach ziarnowych. I tak: witryt wykazuje tendencję do koncentrowania się w najdrobniejszych klasach ziarnowych. Jest więc głównym składnikiem miałow węglowych. Liptyt z uwagi na dużą wytrzymałość mechaniczną zapobiega tworzeniu się spekań w węglu. W urobku gromadzi się w grubszych klasach ziarnowych. Pustokomórkowy fuzynit i semifuzynit z grupy inertytnitu, z uwagi na znaczną kruchość, wykazują tendencje do koncentrowania się w najdrobniejszych klasach ziarnowych. Oprócz witrytu macerały te są głównymi składnikami miałow węglowych. Zmineralizowany inertyt występuje w różnych klasach ziarnowych w zależności od grubości soczewek, jakie tworzy (Gabzdyl 1989; Laskowski, Panuś 1951). W związku z powyższym zasadne było oddzielne analizowanie wyników uzyskanych dla sortymentów grubych i średnich oraz miałow.

Pierwiastki śladowe, jeśli nie tworzą w węglu minerałów własnych, wchodzą w skład minerałów zawierających pierwiastki o zbliżonym powinowactwie krystalochemicznym. Tak więc minerały siarczkowe, głównie piryt, najczęściej są nośnikami: cynku, ołowiu, miedzi i kobaltu, węglany: baru, manganu; minerały ilaste zaś: głównie wanadu boru, skandu, chromu, itru, miedzi, berylu (Parzentny, Rózkowska, Róg 1999; Parzentny 1995).

Według Sałdana (Sałdan 1965) najczęstszym nośnikiem uranu w pokładach węgla są piaskowce silnie zanieczyszczone pirytem i kalcytem. W składnikach węgla z Zagłębia Dolno i Górnosląskiego o gęstości ponad $1,8 \text{ g/cm}^3$ J. Koniecznyński (Koniecznyński 1970) stwierdził duże zawartości ołowiu, cynku, niklu, kobaltu i germanu, a A. Jęczalik (Jęczalik 1970) odnotował dużą ilość uranu we frakcjach węgla o gęstości $1,7\text{--}2,0 \text{ g/cm}^3$. Wskazał ponadto na dużą rolę substancji organicznej w kumulowaniu wanadu, germanu i fosforu w węglu.

Materiały, surowce lub odpady charakteryzuje się na podstawie aktywności właściwej poszczególnych, zawartych w nich, izotopów promieniotwórczych. W przypadku izotopów tworzących naturalne szeregi promieniotwórcze zazwyczaj podaje się aktywność właściwą izotopów macierzystych czyli ^{238}U i ^{232}Th (Michalik 2000). W ochronie radiologicznej najczęściej wykorzystuje się jednak informacje o zaliczanych do najwyższej grupy radiotoksyczności izotopach radu. Dla szeregu uranowego jest to izotop ^{226}Ra , a dla szeregu torowego ^{228}Ra . W przypadku większości substancji, które nie zostały poddane żadnym procesom fizykochemicznym, można założyć, że wszystkie izotopy promieniotwórcze, powstające wskutek rozpadu izotopu macierzystego, są w tzw. stanie równowagi promieniotwórczej, co oznacza, że w danym momencie, aktywności właściwe wszystkich izotopów są sobie równe. Wszystkie limity aktywności właściwej oraz współczynniki przeliczeniowe stosowane w ochronie radiologicznej dla izotopów radu, jeżeli nie zaznaczono inaczej, uwzględniają również zagrożenie pochodzące od produktów jego rozpadu będących z nimi w stanie równowagi promieniotwórczej.

2. CEL BADAŃ

Działalność człowieka prowadzi często do zwiększenia zagrożenia radiacyjnego, pochodzącego od naturalnych izotopów promieniotwórczych, skumulowanych zwłaszcza w powstających odpadach. Powstawanie takich odpadów jest związane między innymi z wytwarzaniem energii z paliw stałych. Węgiel kamienny charakteryzuje się pewną zawartością naturalnych izotopów promieniotwórczych związanych z substancją mineralną węgla. W czasie spalania izotopy te przechodzą do stałych produktów spalania, przy czym w produktach tych znacznie wzrasta ich zawartość, czasem kilkukrotnie.

Zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w odpadach ze spalania węgla jest podstawowym parametrem decydującym o możliwościach ich gospodarczego wykorzystania oraz stanowi zasadniczy problem w przypadku ich lokowania na powierzchniowych składowiskach odpadów. Produkcja paliwa odpowiedniego do stosowania w kotłach energetycznych oraz generującego odpady nadające się do zagospodarowania jest możliwa przy dostosowaniu technologii wzbogacania do charakterystyk wzbogacanego węgla.

Jednym ze sposobów wzbogacania węgla kamiennego jest metoda grawitacyjna. Własności technologiczne węgla wzbogaconego grawitacyjnie są jednoznacznie określone przez jego skład densymetryczny. Jakość koncentratów węglowych energetycznych jest określana najczęściej na podstawie zawartości popiołu i siarki, i na podstawie zawartości tych dwóch parametrów kontrolowany jest najczęściej przebieg procesu wzbogacania. Wszystkie pozostałe parametry jakościowe są przypadkowe. Są one uzależnione między innymi od budowy petrograficznej i chemicznej węgla oraz składu chemicznego popiołu. Ważne są również uwarunkowania wynikające z własności technologicznych węgli surowych, a zwłaszcza rozkładu interesujących nas składników w klasach ziarnowych węgla surowego, a także jego frakcjach gęstościowych lub innych frakcjach wydzielanych według innych cech rozdziału. W ocenie tego rozkładu oraz przebiegu procesu wzbogacania istotne znaczenie mogą mieć wyniki analizy petrograficznej. Odpowiednio przeprowadzona analiza petrograficzna pozwala między innymi na ocenę rozmieszczenia interesującego nas składnika w ziarnach węgla surowego kierowanego do wzbogacania. Optymalizacja procesu wzbogacania w cieczach ciężkich, przy znajomości składu petrograficznego nadawy i równoczesnej znajomości powiązań między składem petrograficznym węgla i składem chemicznym popiołu a interesującą nas właściwością czy składnikiem, daje możliwość uzyskania koncentratów węglowych o wymaganych lub zbliżonych do wymaganych przez odbiorców, właściwościach.

Zależność budowy petrograficznej i chemicznej węgla oraz wydzielonych z niego frakcji gęstościowych a zawartością naturalnych izotopów promieniotwórczych, jest słabo rozpoznana. Staje się ona jednak bardzo istotna z powodu wymagań stawianych przez ochronę środowiska. Wiedza na ten temat może być pomocna przy optymalizacji procesu produkcji ekologicznych węgli energetycznych, generujących odpady, które mogą być wykorzystywane do produkcji materiałów budowlanych lub bezpiecznie składowane.

3. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

W badaniach wykorzystano próbki handlowych sortymentów węgla analizowane w ramach kontroli jakości węgla przez Zakład Oceny Jakości Paliw Stałych GIG. Próbki te pochodziły z siedmiu kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego; było to 12 próbek sortymentów grubych i średnich (orzech i groszek) oraz 39 próbek miałów. W celu określenia właściwości badanych węgli, w aspekcie postawionego wcześniej celu badań, istotne było poznanie zarówno podstawowych parametrów jakościowych, mogących mieć wpływ na analizowane zależności, jak i określenie ich naturalnej promieniotwórczości, budowy petrograficznej oraz analizy składu chemicznego popiołu z tych węgli. W badaniach wykorzystano metody fizykochemiczne, mikroskopowe rentgenograficzne i spektrometryczne. W próbkach węgla oznaczono: podstawowe parametry jakościowe (wilgoć, popiół), parametry określające typ węgla (części lotne, refleksyjność witrynu), skład petrograficzny (maceralny) oraz zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych, a w popiołach otrzymanych z badanych węgli wyznaczono: skład tlenkowy oraz zawartość pierwiastków śladowych.

W celu dokładniejszego przeanalizowania związków między budową petrograficzną węgla a jego naturalną promieniotwórczością z jednego z badanych miałów surowych, po odsianiu klasy ziarnowej poniżej 1 mm, wydzielono w skali półtechnicznej osiem frakcji gęstościowych w cieczach ciężkich: 1,30 g/cm³, 1,35 g/cm³, 1,40 g/cm³, 1,45 g/cm³, 1,50 g/cm³, 1,60 g/cm³, 2,00 g/cm³. Otrzymano w ten sposób osiem próbek węgla, różniących się budową petrograficzną, zawartością popiołu i właściwościami fizykochemicznymi. Gęstość cieczy dobrano na podstawie wcześniej wykonanych badań własnych (Róg 1998, 1999, 2003). We wszystkich wydzielonych frakcjach gęstościowych oznaczono zawartość popiołu i radionuklidów oraz wykonano analizę petrograficzną tzw. „mikrolitotypową analizę ziarnową”, a dla popiołów otrzymanych z frakcji węglowych wyznaczono skład tlenkowy oraz zawartość pierwiastków śladowych.

Wszystkie analizy fizykochemiczne wykonano zgodnie z obowiązującymi polskimi normami przy użyciu specjalistycznej aparatury, w którą wyposażony jest Zakład Oceny Jakości Paliw Stałych Głównego Instytutu Górnictwa mający system jakości zgodny z PN – EN ISO 17025:2001 i ISO 9001:2000 potwierdzony akredytacją Polskiego Centrum Akredytacji i certyfikatem Lloyd's Register Quality Assurance. Badania promieniotwórczości naturalnej wykonano metodą wysokorozdzielczej spektrometrii promieniowania gamma, stosowaną w Laboratorium Radiometrii GIG, zgodnie z wymaganiami normy PN – EN ISO 17025:2001, co zostało potwierdzone akredytacją PCA.

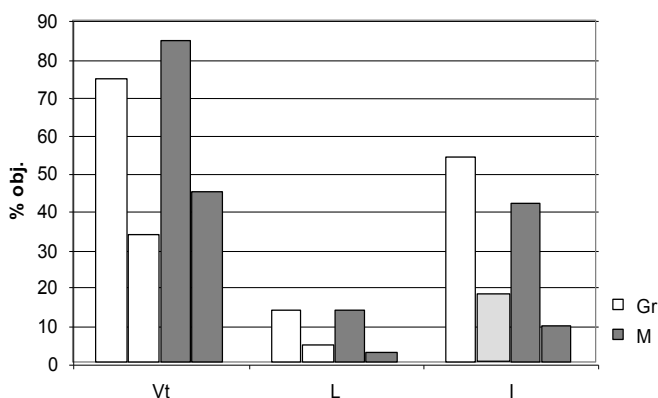
Oznaczanie zawartości macerałów i substancji mineralnej dla węgla wykonano metodą punktową zgodnie z PN-ISO 7404-3: 2001 [23]. „Mikrolitotypową analizę ziarnową” przeprowadzono zgodnie z metodą własną, opracowaną na podstawie norm PN-ISO 7404-3: 2001 oraz PN-93/G-04564 [24] i opisaną w rozdziale 4.4.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Właściwości fizykochemiczne i budowa petrograficzna badanych węgli

Badaniom poddano 51 próbek węgla energetycznych (12 próbek sortymentów grubych i średnich oraz 39 próbek miałów węglowych). Węgla te były zróżnicowane pod względem zawartości popiołu, która zmieniała się od 2,74 do 11,09% w sortymentach grubych i średnich oraz od 8,14 do 33,3% w miałach. Zróżnicowana była w nich również zawartość części lotnych V^{daf} , która zmieniała się od 32 do 42% w sortymentach grubych i średnich oraz od 31 do 40% w próbkach miałowych. Wskaźnik refleksyjności wityrynu R_o , charakteryzujący stopień uwęglenia substancji organicznej węgla, w obu grupach próbek mieścił się w przedziale od 0,51 (0,53% w miałach) do 0,92%, co odpowiada węglom energetycznym typu 31 i 32 oraz węglom typu 33 i 34 służącym do produkcji mieszanek energetycznych.

Skład petrograficzny badanych węgli był zróżnicowany (rys. 1). Zawartość macerałów grupy wityrynu była większa w miałach, w których zmieniała się od 45 do 85% obj. W sortymentach grubych i średnich wahała się natomiast od 34 do 75% obj. Zawartość macerałów grupy inertynytu mieściła się w przedziale od 10 do 42% obj. w miałach oraz od 18 do 54% obj. w sortymentach grubych i średnich.



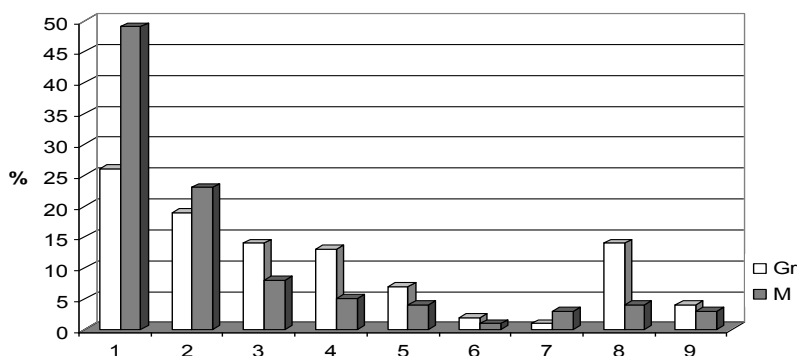
Rys. 1. Największe i najmniejsze zawartości grup macerałów: wityrynu (Vt), liptynitu (L) i inertynytu (I) w sortymentach grubych i średnich (Gr) oraz miałach (M)

Fig. 1. Highest and least contents of maceral groups: vitrinite (Vt), liptinite (L) and inertinite (I) in large and average size grades (Gr) and fines (M)

4.2. Skład chemiczny popiołów otrzymanych z badanych węgli

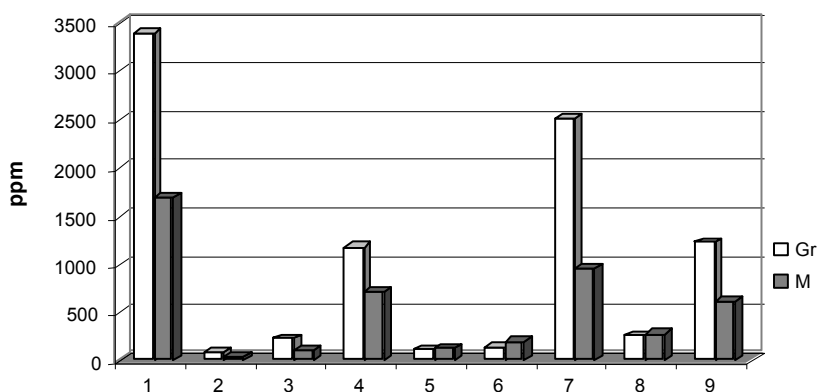
Zróżnicowanie składu chemicznego oraz zawartości pierwiastków śladowych w popiołach otrzymanych z badanych węgli przedstawiono w tablicach 1–4. Wynika z nich, że zakresy zawartości Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , SO_3 , P_2O_5 , BaO , Mn_3O_4 , SrO , ZnO w popiołach sortymentów średnich i grubych były przesunięte w kierunku większych wartości. W składzie chemicznym popiołów otrzymanych z miałów było natomiast zdecydowanie więcej SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O i SO_3 . Widać to na rysunku 2, przedstawiającym średnie udziały poszczególnych tlenków w składzie chemicznym

popiołów otrzymanych z badanych węgli. Równocześnie popioły otrzymane z mialów wykazywały znacznie mniej takich pierwiastków śladowych, jak: Ba, Cu, Mn, Sr, Zn (rys. 3).



Rys. 2. Średni skład chemiczny popiołów otrzymanych z sortymentów grubych i średnich (Gr) oraz mialów (M): 1 – SiO₂, 2 – Al₂O₃, 3 – Fe₂O₃, 4 – CaO, 5 – MgO, 6 – Na₂O, 7 – K₂O, 8 – SO₃, 9 – suma TiO₂, P₂O₅, BaO, Mn₃O₄, SrO, ZnO

Fig. 2. An average chemical composition of ashes received from large and average size grades (Gr) and of fines (M): 1 – SiO₂, 2 – Al₂O₃, 3 – Fe₂O₃, 4 – CaO, 5 – MgO, 6 – Na₂O, 7 – K₂O, 8 – SO₃, 9 – total TiO₂, P₂O₅, BaO, Mn₃O₄, SrO, ZnO



Rys. 3. Średnie zawartości pierwiastków śladowych w popiołach otrzymanych z sortymentów grubych i średnich (Gr) oraz mialów (M): 1 – Ba, 2 – Co, 3 – Cu, 4 – Mn, 5 – Pb, 6 – Rb, 7 – Sr, 8 – V, 9 – Zn

Fig. 3. Average contents of vestigial elements in ashes received from large and average size grades (Gr) and of fines (M): 1 – Ba, 2 – Co, 3 – Cu, 4 – Mn, 5 – Pb, 6 – Rb, 7 – Sr, 8 – V, 9 – Zn

Tablica 1. Skład chemiczny popiołów z sortymentów grubych i średnich

Zawartość	A ^d %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	SO ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	BaO %	Mn ₃ O ₄ %	SrO %	ZnO %
Minimalna	2,74	12,02	10,60	7,77	5,24	2,77	1,15	0,50	4,12	0,28	0,03	0,12	0,09	0,10	0,23
Maksymalna	11,09	40,6	31,02	20,78	21,65	12,48	5,67	2,18	24,54	1,54	4,55	0,65	0,32	0,62	0,55
Średnia	5,40	25,15	19,45	14,41	12,72	6,94	2,52	1,03	14,43	0,84	1,17	0,38	0,18	0,30	0,40

Tablica 2. Skład chemiczny popiołów z mialów

Zawartość	A ^d %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	SO ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	BaO %	Mn ₃ O ₄ %	SrO %	ZnO %
Minimalna	8,14	28,03	6,00	5,00	1,97	1,90	0,44	0,80	1,48	0,34	0,11	0,09	0,05	0,08	0,10
Maksymalna	33,30	57,98	31,60	27,90	17,38	10,51	3,20	3,48	15,62	5,48	1,36	0,89	1,12	0,20	0,25
Średnia	22,18	49,00	23,00	8,40	4,70	3,60	1,08	2,50	4,40	1,14	0,45	0,24	0,15	0,13	0,14

Tablica 3. Zawartość pierwiastków śladowych w popiołach z sortymentów grubych i średnich

Zawartość	Ag ppm	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mn ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	V ppm	Zn ppm
Minimalna	<1	<2	266	<2	25	<6	81	439	<2	10	48	22	<2	<2	866	71	294
Maksymalna	<2	59	8151	<4	164	121	529	2285	<4	216	204	135	<3	<4	5278	525	4387
Średnia			3386		81		217	1166		108	125	63			2501	245	1220

Tablica 4. Zawartość pierwiastków śladowych w popiołach z mialów

Zawartość	Ag ppm	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mn ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sn ppm	Sr ppm	V ppm	Zn ppm
Minimalna	<1	<2	422	<2	10	<6	5	313	<2	<2	48	44	<2	<2	296	81	234
Maksymalna	<2	37	6451	<4	107	165	276	1877	<4	979	251	272	<3	<4	2766	469	2035
Średnia			1684		34		98	708			124	183			941	270	605

4.3. Stężenie naturalnych izotopów promieniotwórczych w badanych węglach

Promieniotwórczość naturalną badanych węgli scharakteryzowano na podstawie zawartości izotopów promieniotwórczych: ^{226}Ra , ^{228}Ra i ^{40}K . W tablicach 5 i 6 przedstawiono zróżnicowanie zawartości tych izotopów w sortymentach grubych i średnich oraz w miałach. Maksymalne i średnie zawartości poszczególnych izotopów promieniotwórczych były znacznie większe w miałach niż w sortymentach grubych i średnich.

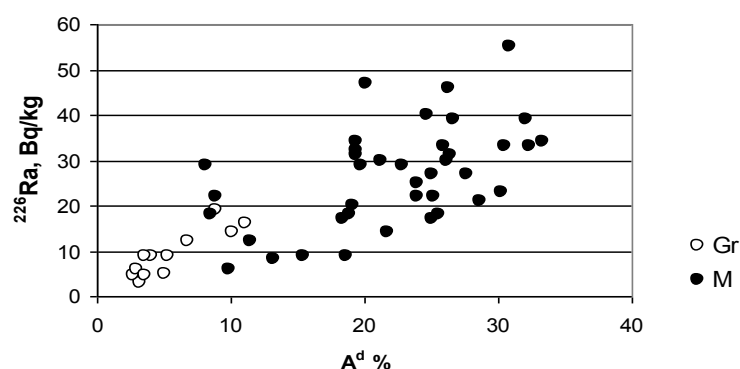
Tablica 5. Zawartość izotopów promieniotwórczych w sortymentach grubych i średnich

Zawartość	^{226}Ra Bq/kg	^{228}Ra Bq/kg	^{40}K Bq/kg
Minimalna	3	1	4
Maksymalna	19	18	53
Średnia	9	6	18

Tablica 6. Zawartość izotopów promieniotwórczych w miałach

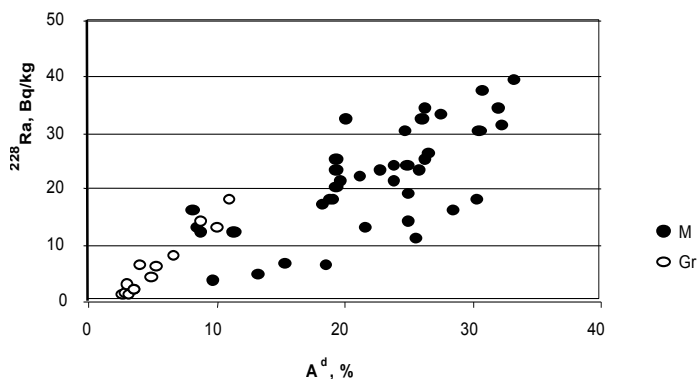
Zawartość	^{226}Ra Bq/kg	^{228}Ra Bq/kg	^{40}K Bq/kg
Minimalna	6	4	10
Maksymalna	55	39	319
Średnia	26	21	150

Na rysunkach 4–6 przedstawiono zmiany zawartości poszczególnych izotopów promieniotwórczych w zależności od zawartości popiołu. W sortymentach grubych i średnich stwierdzono regularny wzrost zawartości wszystkich izotopów w miarę wzrostu zawartości popiołu. Dla miałów taka korelacja uwidaczniała się wyraźnie jedynie w przypadku izotopu ^{40}K . Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił $R = 0,88$ (rys. 6).



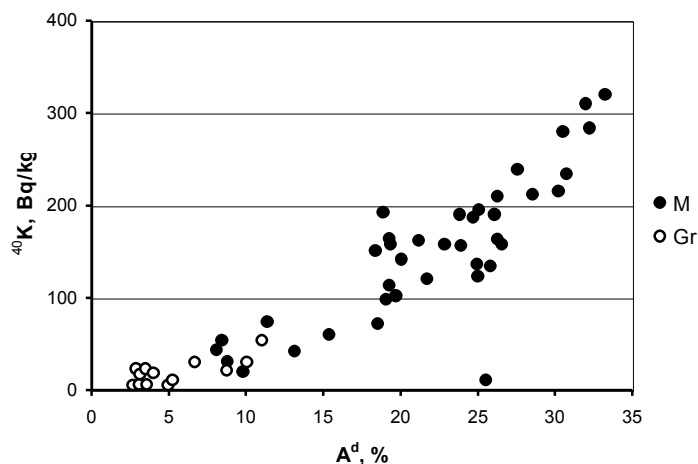
Rys. 4. Stężenie izotopu promieniotwórczego ^{226}Ra w węglach o zróżnicowanej zawartości popiołu w stanie suchym
 A^d : Gr – w sortymentach grubych i średnich, M – w miałach

Fig. 4. Concentration of radioactive isotope ^{226}Ra in coals with diversified contents of ash in dry state A^d :
 Gr – in large and average size grades, M – in fines



Rys. 5. Stężenie izotopu promieniotwórczego ^{228}Ra w węglach o zróżnicowanej zawartości popiołu w stanie suchym A^d : Gr – w sortymentach grubych i średnich, M – w mialach

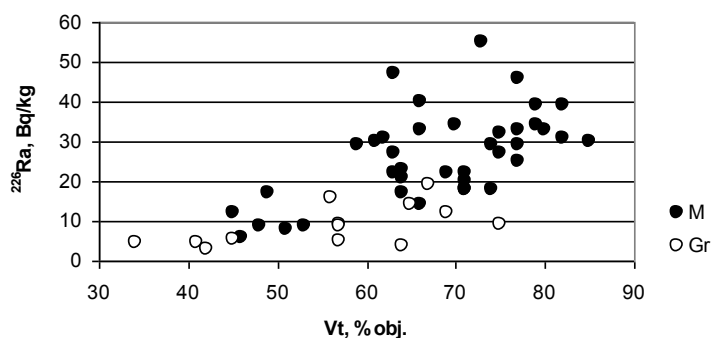
Fig. 5. Concentration of radioactive isotope ^{228}Ra in coals with diversified contents of ash in dry state A^d : Gr – in large and average size grades, M – in fines



Rys. 6. Stężenie izotopu promieniotwórczego ^{40}K w węglach o zróżnicowanej zawartości popiołu w stanie suchym A^d : Gr – w sortymentach grubych i średnich, M – w mialach

Fig. 6. Concentration of radioactive isotope ^{40}K in coals with diversified contents of ash in dry state A^d : Gr – in large and average size grades, M – in fines

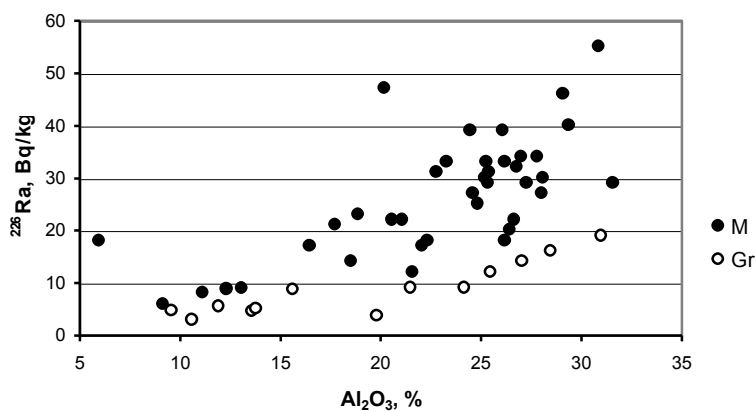
W czasie badań stwierdzono, że w sortymentach grubych i średnich wraz ze wzrostem zawartości macerałów grupy wityrytu zwiększa się stężenie izotopów promieniotwórczych. Zależność ta jest najbardziej wyraźna w przypadku izotopu ^{226}Ra . Z rysunku 7 natomiast wynika, że we wszystkich analizowanych węglach, w których zawartość macerałów grupy wityrytu była większa od 78% obj., stężenie izotopu promieniotwórczego ^{226}Ra przekracza 20 Bq/kg.



Rys. 7. Stężenie izotopu promieniotwórczego ^{226}Ra w węglach o zróżnicowanej zawartości macerałów grupy wityritu (Vt): Gr – w sortymentach grubych i średnich, M – w mialach

Fig. 7. Concentration of radioactive isotope ^{226}Ra in coals with diversified contents of macerals of vitrinite group (Vt): Gr – in large and average size grades, M – in fines

Wystąpiła również zależność między naturalną promieniotwórczością węgla a składem chemicznym substancji mineralnej, ocenianej na podstawie składu chemicznego otrzymanego z niej popiołu. W miarę wzrostu zawartości SiO_2 w popiele wzrastała zawartość poszczególnych radionuklidów w węglu. Wzrastała również zawartość izotopów promieniotwórczych wraz ze wzrostem zawartości Al_2O_3 w popiele. Wykres tej zależności dla ^{226}Ra przedstawia rysunek 8. Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosił $R = 0,95$. Korelacja ta jest również istotna dla izotopu ^{228}Ra , dla której współczynnik $R = 0,91$.



Rys. 8. Stężenie izotopu promieniotwórczego ^{226}Ra w popiołach o zróżnicowanej zawartości Al_2O_3 : Gr – w sortymentach grubych i średnich, M – w mialach

Fig. 8. Concentration of radioactive isotope ^{226}Ra in ashes with diversified contents Al_2O_3 : Gr – in large and average size grades, M – in fines

Zupełnie odwrotną zależność stwierdzono dla Fe_2O_3 , CaO i MgO . W miarę wzrostu zawartości tych składników w popiele malała zawartość izotopów promieniotwórczych w węglu. Tendencje te były widoczne dla wszystkich badanych węgli, ale szczególnie wyraźnie w przypadku sortymentów grubych i średnich. Potwierdzają to wyznaczone dla tych zależności współczynniki korelacji, przedstawione w tablicy 7. Najniższe współczynniki korelacji wykazuje izotop ^{40}K .

Tablica 7. Współczynniki korelacji R dla zależności między zawartością izotopów promieniotwórczych a zawartością składników tlenkowych w popiele sortymentów grubych i średnich

Składnik popiołu	^{226}Ra	^{228}Ra	^{224}Ra	^{40}K
	Współczynnik korelacji R			
Fe_2O_3	-0,88	-0,95	-0,95	-0,87
CaO	-0,90	-0,84	-0,87	-0,56
MgO	-0,96	-0,90	-0,90	-0,51

Nie stwierdzono istotnych zależności między pozostałymi składnikami tlenkowymi popiołów a zawartością izotopów promieniotwórczych w węglach, z których te popioły powstały.

4.4. Stężenie naturalnych izotopów promieniotwórczych we frakcjach gęstościowych wydzielonych z węgla kamiennego

Jak wspomniano we wszystkich węglach, a zwłaszcza w sortymentach grubych i średnich, zwiększało się stężenie izotopów promieniotwórczych wraz ze wzrostem zawartości macerałów grupy wityrytu. Zależność ta była najbardziej widoczna w przypadku izotopu ^{226}Ra , co potwierdza rysunek 7. Było to podstawą wytypowania do dalszych badań mialu surowego, w którego budowie petrograficznej przeważały macerały grupy wityrytu i równocześnie węgiel ten wykazał dużą zawartość popiołu. W celu dokładniejszego przeanalizowania związków między budową petrograficzną węgla i składem chemicznym jego popiołu a promieniotwórczością naturalną wydzielono z tego mialu, metodą wzbogacania w skali półtechnicznej, osiem frakcji gęstościowych w cieczach ciężkich: $1,30 \text{ g/cm}^3$, $1,35 \text{ g/cm}^3$, $1,40 \text{ g/cm}^3$, $1,45 \text{ g/cm}^3$, $1,50 \text{ g/cm}^3$, $1,60 \text{ g/cm}^3$, $2,00 \text{ g/cm}^3$. We wszystkich frakcjach oznaczono zawartość popiołu, radionuklidów oraz przeprowadzono „mikrolitotypową analizę ziarnową” a w popiołach, otrzymanych z frakcji węglowych, wyznaczono skład tlenkowy oraz zawartość pierwiastków śladowych.

Oznaczanie zawartości macerałów i substancji mineralnej, metodą punktową zgodnie z PN-ISO 7404-3:2001, polega na mikroskopowej identyfikacji macerału (grupy liptynytu, wityrytu czy inertynytu), na który pada przecięcie nitek krzyża w okularze. W metodzie tej nie uwzględnia się jednak informacji, jaką część obserwowanego ziarna stanowi ten macerał: czy jest nim całe ziarno, czy stanowi on jedynie małe wtrącenie w ziarnie. Możliwość takiej oceny daje tzw. „mikrolitotypowa analiza ziarnowa”, zgodnie z którą w każdym punkcie pomiarowym rozpatruje się całe ziarno, na które pada przecięcie krzyża nitek, a jeśli powierzchnia ziarna jest duża i przy skokowym przesuwie brykietu przecięcie krzyża pada dwukrotnie na to samo ziarno, każdorazowo jest rozpatrywana cała powierzchnia ziarna widoczna w obiektywie. Metoda ta pozwala

na scharakteryzowanie w sposób szczegółowy budowy petrograficznej węgla z uwzględnieniem ilościowego udziału macerału w ziarnie węglowym oraz ilościowego udziału poszczególnych macerałów w węglu, czy produktach jego wzbogacania.

Wyróżniane podczas analizy składniki petrograficzne mogą być różnie pogrupowane w zależności od tego do czego ma służyć analiza. Wyróżniono następujące grupy mikrolitotypów:

Mikrolitotypy wityrynitowe:

1. Wityryt (V) – czyste ziarno wityrynit;
2. Klaryt wityrynitowy (KV) – ziarno z wityrynitem i liptynitem z przewagą wityrynit;
3. 50% Klarytu wityrynitowo-liptynitowego (KVL) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i wityrynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
4. Wityrynertyt wityrynitowy (VnV) – ziarno z wityrynitem i inertynitem z przewagą wityrynit;
5. 50% Wityrynertytu wityrynitowo-semifuzynitowego (VnVS) – ziarno, na powierzchni którego wityrynit i semifuzynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
6. 50% Wityrynertytu wityrynitowo-inertynitowego (VnVI) – ziarno, na powierzchni którego wityrynit i pozostałe macerały inertynitowe występują w takiej samej ilości (wizualnie);
7. Duroklaryt (DK) – ziarno z trzema grupami macerałów z przewagą wityrynit;

Mikrolitotypy liptynitowe:

8. Liptyt (L) – czyste ziarno liptynit;
9. Klaryt liptynitowy (KL) – ziarno z wityrynitem i liptynitem z przewagą liptynit;
10. 50% Klarytu wityrynitowo-liptynitowego (KVL) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i wityrynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
11. Duryt liptynitowy (DL) – ziarno z liptynitem i inertynitem z przewagą liptynit;
12. 50% Durytu liptynitowo-semifuzynitowego (DLS) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i semifuzynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
13. 50% Durytu liptynitowo-inertynitowego (DLI) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i pozostałe macerały inertynitowe występują w takiej samej ilości (wizualnie);
14. Wityrynertolityt (VL) – ziarno z trzema grupami macerałów z przewagą liptynit;

Mikrolitotypy inertynitowe:

15. Semifuzyt (S) – czyste ziarno semifuzynitu (S);
16. Inertyt (I) – czyste ziarno pozostałych macerałów inertynitowych;
17. Wityrynertyt semifuzynitowy (VnS) – ziarno z wityrynitem i inertynitem z przewagą semifuzynitu;
18. Wityrynertyt inertynitowy (VnI) – ziarno z wityrynitem i inertynitem z przewagą pozostałych macerałów inertynitowych;
19. 50% Wityrynertytu wityrynitowo-semifuzynitowego (VnVS) – ziarno, na powierzchni którego wityrynit i semifuzynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
20. 50% Wityrynertytu wityrynitowo-inertynitowego (VnVI) – ziarno, na powierzchni którego wityrynit i pozostałe macerały inertynitowe występują w takiej samej ilości (wizualnie);

21. Duryt semifuzynitowy (DS) – ziarno z liptynitem i inertynitem z przewagą semifuzynitu;
22. Duryt inertynitowy (DI) – ziarno z liptynitem i inertynitem z przewagą pozostałych maceratów inertynitowych;
23. 50% Durytu liptynitowo-semifuzynitowego (DLS) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i semifuzynit występują w takiej samej ilości (wizualnie);
24. 50% Durytu liptynitowo-inertynitowego (DLI) – ziarno, na powierzchni którego liptynit i pozostałe maceraty inertynitowe występują w takiej samej ilości (wizualnie);
25. Klaroduryt semifuzynitowy (KDS) – ziarno z trzema grupami macerałów z przewagą semifuzynitu;
26. Klaroduryt inertynitowy (KDI) – ziarno z trzema grupami macerałów z przewagą pozostałych maceratów inertynitowych;

Karbomineryty:

27. Karbargilit (ilasta z mikrolitotypem);
28. Karbopiryt (piryt z mikrolitotypem);
29. Karbankeryt (węglany z mikrolitotypem);
30. Karbosilicyt (krzemionka z mikrolitotypem);
31. Karbopolimineryt (różne składniki mineralne z mikrolitotypem).
32. Skała płonna (W przypadku pirytu wystąpienie więcej niż jednego olitycznego wtrącenia, natomiast w przypadku innej substancji mineralnej – połowa i więcej powierzchni ziarna).

Frakcje gęstościowe wydzielono z mialu węglowego typu 32 o zawartości popiołu (A^d) 26,59%. Mikrolitotypowa analiza ziarnowa wykazała w nim przewagę mikrolitotypów witrytowych, których zawartość wynosi 75% obj. Wśród nich dominował witryt, duroklaryt i klaryt witrynitowy. W składzie karbominerytu, który informuje o rodzaju substancji mineralnej, powiązanej z macerałami, dominował karbargilit (ilasta), występujący najczęściej jako przesycenia witrynit i klarytu.

Skład chemiczny popiołu z węgla wyjściowego zamieszczono w tablicy 8, a stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych w węglu wyjściowym w tablicy 9.

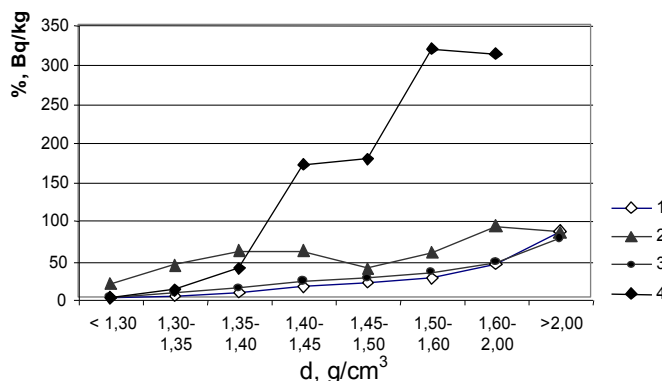
Tablica 8. Skład chemiczny popiołu z frakcji gęstościowych

Frakcje g/cm ³	Wychód	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	SO ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %
<1,30	39,5	26,64	26,60	15,33	8,32	3,57	2,59	1,05	8,02	0,98	1,93
1,30–1,35	20	29,23	23,21	16,06	9,57	4,10	1,67	1,17	8,90	0,81	2,25
1,35–1,40	5	35,45	22,21	13,95	8,72	4,19	1,20	1,70	7,15	0,77	1,49
1,40–1,45	1,5	37,01	21,26	14,65	8,84	4,56	0,92	1,97	6,59	0,76	1,06
1,45–1,50	1	40,29	22,16	12,44	8,30	4,63	0,74	2,16	5,73	0,80	0,82
1,50–1,60	1	40,81	20,71	12,71	9,35	5,17	0,75	2,11	5,08	0,75	0,62
1,60–2,00	9	45,85	21,23	11,35	8,20	5,29	0,69	2,44	2,20	0,76	0,32
>2,00	23	60,25	22,84	7,09	0,90	2,41	0,75	3,45	0,25	0,96	0,11
Próbka wyjściowa	100	57,73	22,53	7,33	2,40	2,69	1,00	3,09	1,42	0,92	0,26

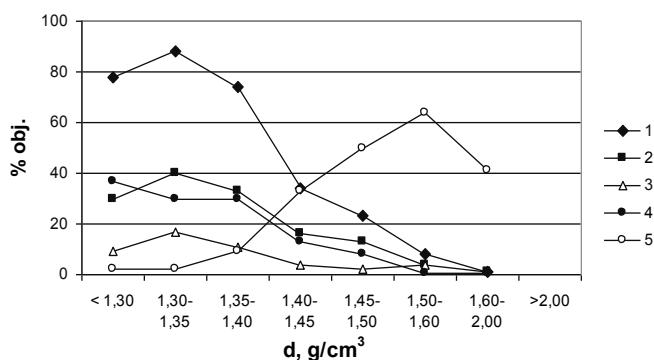
Tablica 9. Stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych we frakcjach gęstościowych

Frakcje g/cm ³	Popiół %	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	⁴⁰ K
		Bq/kg		
<1,30	2,09	21	3	3
1,30–1,35	4,68	43	9	13
1,35–1,40	9,34	63	14	41
1,40–1,45	16,42	61	23	172
1,45–1,50	21,58	40	27	179
1,50–1,60	27,47	60	34	319
1,60–2,00	46,66	94	47	314
>2,00	87,22	87	78	826
Próbka wyjściowa	26,59	50	26	223

Wraz ze wzrostem gęstości frakcji wzrastała zawartość popiołu (rys. 9). We frakcjach o gęstości poniżej 1,40 g/cm³ zawartość popiołu nie przekraczała 10%. Wyniki mikrolitotypowej analizy ziarnowej uwidaczniają zmiany w budowie petrograficznej wraz ze wzrostem gęstości frakcji (tabl. 10). Malą zawartość niezmineralizowanych ziaren, w budowie których przeważały macerały grupy witrynit (rys. 10). W pierwszej frakcji o gęstości poniżej 1,30 g/cm³ było ich trochę mniej na korzyść ziaren zbudowanych głównie z liptynit. Wśród mikrolitotypów witrynitowych najlepiej widać tendencję do obniżania zawartości w przypadku: witrytu, klarytu witrynitowego oraz duroklarytu. W miarę wzrostu gęstości frakcji wzrastała nieznacznie zawartość ziaren zbudowanych z macerałów grupy inertynitu, osiągając największe zawartości we frakcji o gęstości 1,40–1,45 g/cm³. Wzrastała natomiast wyraźnie zawartość karbominerytu – głównie karbargilitu (połączenia substancji węglowej z substancją ilastą). Były to głównie zmineralizowane ziarna witrynitowe i klarytowe przesycane najczęściej substancją ilastą (karbargilit witrynitowy).

Rys. 9. Zróżnicowanie właściwości frakcji gęstościowych: 1 – zawartość popiołu A^d, 2 – ²²⁶Ra, 3 – ²²⁸Ra, 4 – ⁴⁰KFig. 9. Diversification of properties of density fractions: 1 – content of ash A^d, 2 – ²²⁶Ra, 3 – ²²⁸Ra, 4 – ⁴⁰K

Skład tlenkowy popiołów otrzymanych z frakcji węglowych zestawiono w tablicy 8. Wraz ze wzrostem gęstości frakcji zwiększała się zawartość SiO₂ i K₂O. Malą natomiast zawartość: Fe₂O₃ i CaO, Na₂O, SO₃ i P₂O₅. Najwyższe zawartości tych tlenków wystąpiły we frakcjach najlżejszych, w których jest najmniej popiołu, który pochodzi najczęściej ze substancji mineralnej przesycającej witrynit.



Rys. 10. Zróznicowanie właściwości frakcji gęstościowych: 1 – mikrolitotypy wityrinitowe, 2 – wityrinit, 3 – klaryt wityrinitowy, 4 – duroklaryt, 5 – karbargilit wityrinitowy

Fig. 10. Diversification of properties of density fractions: 1 – vitrinite microlitotypes, 2 – vitrinite, 3 – vitrinite clarite, 4 – hardening clarite, 5 – vitrinite carbargilite

Tabela 10. Skład mikrolitotypowy frakcji gęstościowych, % obj.

SKŁADNIK	Próbka wyjściowa	Frakcje									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
WITRYT (V)	24	30	40	33	16	13	4	1			
KLARYT wityrinitowy (KV)	36	9	17	11	4	2	4				
50 % KLARYT wityrinitowo-liptynitowy (KVL)											
WITRYNERTYT wityrinitowy (VnV)	1	2	1	śl	1	śl		śl			
50% WITRYNERTYT wityrinitowo-semifuzynitowy (VnVS)											
50% WITRYNERTYT wityrinitowo-inertynitowy (VnVI)											
DUROKLARYT (DK)	14	37	30	30	13	8	śl	śl			
Mikrolitotypy wityrinitowe	75	78	88	74	34	23	8	1	0		
LIPTYT (L)	1										
KLARYT liptynitowy (KL)		1	2								
50% KLARYT wityrinitowo-liptynitowy (KVL)											
DURYT liptynitowy (DL)		1	1			śl					
50% DURYT liptynitowo-semifuzynitowy (DLS)											
50% DURYT liptynitowo-inertynitowy (DLI)											
WITRYNERTOLIPTYT (VL)	śl	6			1		śl	2			
Mikrolitotypy liptynitowe	1	8	2	0	1	śl	śl	2	0		
SEMIFUZYT (S)					1		1				
INERTYT (I)	7	2	4	6	16	6	śl	1			
WITRYNERTYT semifuzynitowy (VnS)			śl		1						
WITRYNERTYT inertynitowy (VnI)				1	śl	śl					
50% WITRYNERTYT wityrinitowo-semifuzynitowy (VnVS)		śl									
50% WITRYNERTYT wityrinitowo-inertynitowy (VnVI)											
DURYT semifuzynitowy (DS)			1		śl						
DURYT inertynitowy (DI)		1		śl	1	2					
50% DURYT liptynitowo-semifuzynitowy (DLS)											
50% DURYT liptynitowo-inertynitowy (DLI)											
KLARODURYT semifuzynitowy (KDS)	1	1	2					1			
KLARODURYT inertynitowy (KDI)		8	śl	4	3	2					
Mikrolitotypy inertytowe	8	12	7	11	22	10	1	2	0		
KARBARGILIT	8 (7 Vt)	2 (2 Vt)	2 (2 Vt)	10 (9 Vt)	35 (33 Vt)	60 (50 Vt)	71 (64 Vt)	46 (41 Vt)			
KARBOPIRYT					śl	śl	1 (1 Vt)	1 (1 Vt)			
KARBANKERYT			śl	2 (2 I)	3 (3 I)	2 (2 I)	8 (1 Vt)		1 (1 Vt)		
KARBOSILICYT											
KARBOPOLIMINERYT			1 (1 I)	2 (2 Vt)	1 (Vt)	2 (1Vt)	2 (1 Vt)	3 (1 Vt)			
Karbomineryt	8	2	3	14	39	64	82	50	1		
SKAŁA PŁONNA	8 (1% Vt)		śl	1	4 (2 Vt)	3	9 (4 Vt)	45 (28 Vt)	99 (3 Vt)		

Uwaga: śl – zawartość poniżej 0,5% obj.

Powyżej opisano zmiany, jakie wystąpiły w budowie i właściwościach frakcji węglowych w miarę wzrostu ich gęstości. Jak zmieniała się na ich tle aktywność izotopów promieniotwórczych przedstawiono w tablicy 9 i na rysunku 9. Stężenia większości izotopów oznaczonych dla badanych węgla wzrastały regularnie w miarę wzrostu gęstości frakcji. Jedynie w przypadku ^{226}Ra zmiany te były nieregularne.

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zawartość radionuklidów różnicuje się w zależności od klasy ziarnowej węgla (sortymentu). Maksymalne zawartości poszczególnych izotopów są znacznie większe w mialach niż w sortymentach grubych i średnich. Związane jest to najprawdopodobniej z większą zawartością popiołu w mialach.
2. Wzrasta stężenie radionuklidów w węglu wraz ze wzrostem sumarycznej ilości macerałów grupy wityrytu i karbargilitu, w którym substancja mineralna współwystępuje z wityrytem. Zależność ta jest lepiej widoczna w przypadku sortymentów grubych i średnich.
3. W sortymentach grubych i średnich stwierdzono regularny wzrost zawartości wszystkich izotopów w miarę wzrostu zawartości popiołu. W przypadku mialów taka korelacja jest wyraźnie widoczna dla izotopu ^{40}K . Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosi $R = 0,88$. Wzrasta zawartość radionuklidów w węglu ze wzrostem zawartości SiO_2 w popiele. Zwiększa się również zawartość izotopów promieniotwórczych w sortymentach grubych i średnich w miarę wzrostu zawartości Al_2O_3 w popiele. Korelacja ta jest istotna również dla izotopu ^{228}Ra . Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosi odpowiednio $R = 0,91$.
4. Różnicuje się również zawartość radionuklidów wraz ze wzrostem gęstości węgla. W miarę zwiększania się gęstości wydzielonych frakcji, regularnie wzrastają stężenia izotopów promieniotwórczych. Wzrasta także zawartość popiołu. We frakcjach o gęstości poniżej $1,40 \text{ g/cm}^3$ zawartość popiołu nie przekracza 10%.
5. Wraz ze wzrostem gęstości frakcji maleje zawartość mikrolitotypów wityrytowych: wityrytu, klarytu wityrynitowego oraz duroklarytu (ziaren niezmineralizowanych). Wzrasta natomiast wyraźnie zawartość karbominerytu – głównie karbargilitu (połączenia substancji węglowej z substancją ilastą). Najczęściej są to ziarna wityrynitowe i klarytowe przesycone substancją ilastą (zmineralizowany wityryt).
6. Wraz ze wzrostem ilości popiołu, karbominerytu i izotopów promieniotwórczych we frakcjach wzrasta zawartość SiO_2 i K_2O . Maleje natomiast zawartość: Fe_2O_3 i CaO , Na_2O , SO_3 i P_2O_5 .

Literatura

1. Michalik B., Chałupnik S., Skowronek J. (1986): *Występowanie naturalnych izotopów promieniotwórczych w węglach GZW – metodyka i wstępne wyniki badań*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 149, s. 501–509.
2. Jeżowska-Trzebiatowska B., Kopacz S., Mikulski T. (1990): *Występowanie i technologia pierwiastków rzadkich*. Warszawa, PWN.
3. Michalik B. (2000): *Kompleksowa metoda oceny zagrożenia promieniowaniem jonizującym powodowanego przez powierzchniowe składowiska odpadów górniczych*. Katowice, GIG (Praca doktorska).
4. Pindel T. (2000): *Źródła promieniotwórczości naturalnej w wybranych kopalniach węgla kamiennego GZW*. Katowice, Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, (Praca doktorska).
5. *Sources and Effects of Ionising Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. UN sales publication E.00.IX.3. UN, New York.
6. Róg L. (2003): *Wpływ budowy petrograficznej i chemicznej węgla kamiennego na temperaturę topliwości popiołu*. Prace naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, kwartalnik nr 1, s. 73–96.
7. Róg L. (2004): *Wpływ parametrów jakościowych na efektywność jego spalania*. Materiały z Konferencji na temat „Z węglem kamiennym ekologicznie i oszczędnie”, Katowice, GIG s. 5–15.
8. Lorenz U., Blaschke W., Grudziński Z. (2002): *Propozycja nowej formuły sprzedażnej węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej*. Studia Rozprawy Monografie, nr 112. Kraków, Wydaw. IGSMiE PAN.
9. Blaschke Z., Blaschke W. (2003): *Ocena celowości wzbogacania węgla na potrzeby energetyki w samodzielnych zakładach przeróbczych*. Studia, Rozprawy, Monografie, nr 116, Kraków, Wydaw. IGSMiE PAN.
10. Sztaba K., Blaschke Z. (1996): *O podstawowych uwarunkowaniach podnoszenia jakości koncentratów węglowych*. Materiały z Konferencji Naukowo-Technicznej: Poprawa jakości węgla w programie dostosowania górnictwa węglowego do warunków gospodarki rynkowej. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje nr 12.
11. Róg L. (1998): *Budowa petrograficzna oraz własności frakcji gęstościowych wydzielonych z węgla kamiennych i antracytu*. Prace Naukowe GIG nr 830.
12. Róg L. (1999): *Ocena wpływu zmienności składu petrograficznego na właściwości chemiczno-fizyczne frakcji o różnej gęstości wydzielonych z węgla typów 31.1, 32.2, 33, 34.2, 35.1 i 36*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Górnictwo z. 243, s. 111–126.
13. Roga B. (1954): *Węgiel kamienny przeróbka i użytkowanie*. Stalinogród, PWT.
14. Gabzdyl W. (1989): *Petrografia węgla*. Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej nr 1184.
15. Laskowski T., Panuś M. (1951): *Petrografia węgla*. Katowice, PWT.
16. Parzentny H., Rózkowska A., Róg L. (1999): *Relationship between bed thickness, average ash content and Zn and Pb content in coal in the Upper Silesian Coal Basin*. Geological Quarterly 43 (3), s. 365–374.
17. Parzentny H. (1995): *Wpływ nieorganicznej substancji mineralnej na zawartość niektórych pierwiastków śladowych w węglu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego nr 1460.
18. Sałdan M. (1965): *Metalogeneza uranu w utworach karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Biuletyn Instytutu Geologicznego 193, z badań złóż kruszców 5, s. 111–163.

19. Koniecznyński J. (1970): *Badania nad występowaniem boru w węglach kamiennych*. Prace GIG, Komunikat 484.
20. Jęczalik A. (1970): *Geochemia uranu w uranonośnych węglach kamiennych w Polsce*. Biuletyn Instytutu Geologicznego 224, s. 103–195.
21. PN EN-ISO17025:2001 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorujących.
22. ISO 9001:2000 Quality management systems-Requirements.
23. PN-ISO 7404-3:2001 Metody analizy petrograficznej węgla kamiennego (bitumicznego) i antracytu. Metoda oznaczania składu grup macerałów.
24. PN-93/G – 04564 Węgiel kamienny. Analiza petrograficzna. Oznaczanie zawartości mikrolitotypów, karbominerytu i skały płonnej.

Recenzent: dr inż. Stanisław Chałupnik

Krzysztof Stańczyk, Krzysztof Gogola, Andrzej Bajerski

ANALIZA MOŻLIWOŚCI UPRAW ROŚLIN ENERGETYCZNYCH NA TERENACH ZDEGRADOWANYCH NA PRZYKŁADZIE WIERZBY WICIOWEJ

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie możliwości upraw roślin energetycznych na terenach zdegradowanych, na przykładzie wierzby wiciowej. Pracę zrealizowano badając możliwość uprawy wierzby na terenie zrehabilitowanego składowiska kamienia „Wschód I” KWK Mysłowice. Zakres pracy obejmował wykonanie badań zagęszczenia oraz badań chemicznych gruntu, następnie wykonanie poletek doświadczalnych pod uprawę wierzby oraz nasadzenie i obserwację wzrostu roślin.

Nasadzono ponad 900 sadzonek wierzby *Salix viminalis* w dwóch turach: jesienią oraz wiosną. Przyjęta technika nasadzeń obejmowała nasadzenia bezpośrednie w materialewałdowym, w dołkach zaprawionych ustabilizowanymi osadami ściekowymi oraz w tzw. warstwie uzdatnionej (wymieszana wierzchnia warstwa materiałuwałdowego z osadami ściekowymi).

Stwierdzono, że znacznie lepsze wyniki dają nasadzenia jesienne w porównaniu z nasadzeniami wiosennymi, o czym świadczyła zarówno liczba sadzonek, które się przyjęły, jak i szybkość ich wzrostu. Jednak niedostateczna wilgotność gruntu wykluczała odpowiedni przyrost masy (porównywalny z przyrostem na terenach rolnych) – zapewniający opłacalność ekonomiczną plantacji. Polepszenie wielkości plonów upraw lokalizowanych na obszarach lokowania odpadów powęglowych może być zapewnione przez wybór terenu zapewniającego odpowiednią retencję wód, a także stworzenie „warstwy urodzajnej”, na przykład przez zastosowanie komunalnych osadów ściekowych.

Plantation of energy willow on demoted post coalmine area

Abstract

The purpose of the work was testing of the plantation of energy willow on the demoted post coalmine ground of Mysłowice colliery. In the scope of the work density and chemistry of ground were investigated, the experimental patches were prepared and the willow was planted and its growth observed.

Over 900 of the willow cuttings were planted in two periods, in autumn and in spring. The plantation was performed in three ways: directly in the ground not specially prepared, in the soil prepared by adding a stabilised sewage fertiliser and in the special prepared soil which was the mixture of original soil and stabilised sewage fertiliser.

The results show that the much better season for plantation is autumn when enough moisture in soil is available for the first period of vegetation. In the autumn plantation successfully have grown more cuttings to compare with the spring plantation. However not enough moisture content in the ground made that the vegetation is much slower to compare with arable grounds and is not economical. Better results may be achieved by choosing the ground with proper water retention and by preparing the soil for example by using stabilised sewage fertiliser.

WPROWADZENIE

Uprawy roślin energetycznych w celu uzyskania biomasy, mogą być jednym ze sposobów zagospodarowywania nieużytków rolnych czy terenów zdegradowanych przez przemysł (Dubas 2003, Olejniczak 2000, Ruszkowski 1999, Szwałek 2003, Weber 2000). Zaletami wykorzystania roślin energetycznych są niewysokie koszty pozyskania biomasy, zadawalająca wartość opałowa, wynosząca około 10–12 GJ/t, i niska emisja zanieczyszczeń gazowych powstających w procesie ich spalania. Najbardziej popularnym gatunkiem roślin energetycznych w Polsce jest wierzba krzewiasta – *Salix viminalis*.

Rośliny energetyczne, w zależności od gatunku, wymagają odpowiednich warunków glebowych, a najistotniejszymi parametrami decydującymi o jakości i wydajności plantacji energetycznej są nawodnienie oraz odczyn gleby. Istotną zaletą roślin energetycznych jest ich łatwa zdolność adaptacyjna, przede wszystkim na terenach zanieczyszczonych i zdewastowanych przemysłowo. Na terenach zniszczonych przez przemysł, rośliny energetyczne mogą spełniać podwójną rolę: energetyczną i rekultywacyjną. Zdolność rekultywacyjna jest wynikiem akumulowania, w systemie korzeniowym roślin, zanieczyszczeń z gleby, dzięki czemu mogą być uprawiane na glebach wyłączonych spod użytkowania rolniczego.

Zalety upraw roślin energetycznych powinny być wykorzystywane przede wszystkim na terenach ekologicznie zagrożonych takich, jak teren województwa śląskiego, co mogłoby przyczynić się do rozwoju tego regionu.

Celem prezentowanej pracy była analiza możliwości upraw roślin energetycznych na terenach zdegradowanych na przykładzie wierzby wiciowej. Do badań wytypowano zrehabilitowany teren składowiska kamienia „Wschód I” KWK Mysłowice. Zakres prac obejmował badania zagęszczenia gruntu oraz jego własności chemicznych, wykonanie poletek doświadczalnych pod uprawę wierzby oraz nasadzenie i obserwację wzrostu roślin.

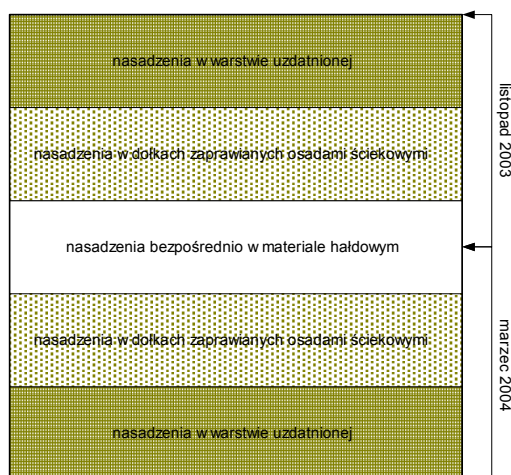
1. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU WYTYPOWANEGO DO BADAŃ I METODYKA BADAŃ

Do wykonania poletek doświadczalnych wytypowano obszar zrehabilitowanego składowiska kamienia „Wschód I” KWK Mysłowice (Broda i inni 1993). Teren ten jest usytuowany w Mysłowicach między ulicami Świerczyny, Obrzeżną Północną i torami PKP. Stanowi on antropogeniczny nasyp (o znacznej miąższości), wykonany z odpadów powęglowych KWK Mysłowice, lokowanych w byłym wyrobisku popiaskowym. Na obszarze tym były również składowane odpady komunalne (przykryte później warstwą odpadów powęglowych).

Zrehabilitowane składowisko charakteryzuje się dość ubogą szatą roślinną, w której dominują trawy i nieliczne drzewa i krzewy. Niedogodne warunki dla wzrostu roślinności (podobnie jak na innych tego typu terenach) są spowodowane, w głównej mierze, charakterem zdeponowanego materiału oraz bardzo małą retencją wód opadowych. Nie zaobserwowano również jakiegokolwiek anomalii termicznej. Przygotowane poletko doświadczalne miało powierzchnię 500 m².

Do badań wytypowano najbardziej popularną w naszym kraju roślinę energetyczną: wierzbę wiciową *Salix viminalis* (Stolarski 2003; Wyżgolik, Brząkałik 1994; Brząkałik 1994, Uprawa wierzby krzewiastej *Salix viminalis* na cele energetyczne. Materiały promocyjne Jero S.C., 2002). Sadzonki (zrzezy, sztroby) wierzby umieszczano w rozluźnionym materiale hałdowym, w warstwie uzdatnionej (wzbogaconymi ustabilizowanymi komunalnymi osadami ściekowymi) oraz w dołkach zaprawionych osadami ściekowymi. Plan nasadzeń przedstawiono na rysunku 1.

W celach porównawczych zaplanowano nasadzenia wierzby zarówno w okresie późnojesiennym (listopad 2003), jak również wiosennym (marzec 2004). W okresie wzrostu i rozwoju sadzonek prowadzono również ciągły nadzór i pielęgnowano teren poletka, a po zakończeniu okresu wegetacji została dokonana ocena poszczególnych części plantacji.



Rys. 1. Organizacja plantacji doświadczalnej

Fig. 1. Organization of experimental plantation

1.1. Badania stopnia zagęszczenia gruntu

Badania stopnia zagęszczenia gruntu wykonano metodą sondowania z wykorzystaniem sondy wbijanej lekkiej (SL). Wyniki badań zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki sondowania sondą lekką (SL) na składowisku kamienia „Wschód I”

Głębokość, m ppt	Liczba uderzeń bijaka na 10 cm wpędu sondy (N_{10})		
	S-1	S-2	S-3
0,1–0,2	50	37	13
0,2–0,3	59	38	15
0,3–0,4	82	68	18
0,4–0,5	–	79	34
0,5–0,6	–	–	75
0,6–0,7	–	–	–
0,7–0,8	–	–	–
0,8–0,9	–	–	–
0,9–1,0	–	–	–

Na ich podstawie – zgodnie z normą PN-86 B-02480 – określono średni stopień zagęszczenia gruntów dla poszczególnych sondowań. Wynosiły one odpowiednio: $I_{d(S-1)} = 0,85$, $I_{d(S-2)} = 0,83$, $I_{d(S-3)} = 0,76$. Wyniki te w zakresie 0,76–0,85 świadczą o bardzo dobrym zagęszczeniu rekultywowanego terenu.

1.2. Badania chemiczne gruntu

Zamiar wykorzystania ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych jako nawozu na plantacji doświadczalnej wymusił konieczność wykonania badań chemicznych wierzchniej warstwy zdeponowanego materiału (tabl. 2 i 3). Zakres badań oraz metodykę przyjęto zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. Nr 134, poz. 1140, sprostowanie: Dz. U. Nr 155, poz. 1299).

Tablica 2. Metody referencyjne badań gruntów, na których mają być stosowane komunalne osady ściekowe

Wskaźnik	Metoda
Odczyn pH	oznaczenie elektrometryczne w roztworze wodnym
Zawartość metali ciężkich: ołowiu, kadmu, rtęci, niklu, cynku, miedzi i chromu	spektrometria absorpcji atomowej po mineralizacji mocnymi kwasami
Zawartość fosforu przyswajalnego w przeliczeniu na P_2O_5 (pięciotlenek fosforu)	ekstrakcja mleczanem wapnia i oznaczenie spektrofotometryczne metodą Engera-Rhiema

Tablica 3. Analiza chemiczna próbki gruntu

Oznaczenie	Zawartość
Wilgoć analityczna	2,15% wag.
pH wyciągu wodnego	7,8
Ołów, Pb	59 ppm
Kadm, Cd	2 ppm
Rtęć, Hg	<1 ppm
Nikiel, Ni	31 ppm
Cynk, Zn	408 ppm
Miedź, Cu	57 ppm
Chrom, Cr	59 ppm
Fosfor przyswajalny, P_2O_5	18 ppm

Uzyskane wyniki badań zostały porównane z zawartymi w wymienionym Rozporządzeniu dotyczącymi parametrów gruntów, na których mogą być stosowane osady ściekowe jako nawóz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz. Jedynie zawartość cynku w badanej próbce przekroczyła nieznacznie wartość dopuszczalną. Uwzględniając jednak fakt, że *Salix viminalis* charakteryzuje się znaczną zdolnością pochłaniania metali ciężkich z gruntu, stwierdzono, że teren rekultywowanego składowiska „Wschód I” może być wykorzystywany do uprawy roślin energetycznych.

1.3. Przygotowanie terenu do nasadzenia

Ze względu na wysoki stopień zagęszczenia gruntu, podstawowym zabiegiem umożliwiającym nasadzenia sadzonek wierzb było rozluźnienie warstwy powierzchniowej (ok. 30 cm), do którego zastosowano ładowarkę kołową. Następnie część terenu plantacji została nawieziona materiałem wspomagającym w postaci ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych, spełniających wszelkie normy prawne w zakresie wykorzystania ich do produkcji roślin nieprzeznaczonych do spożycia. Część dowiezionych osadów została wykorzystana również przy nasadzeniach w zaprawionych dołkach.

1.4. Nasadzenia roślin

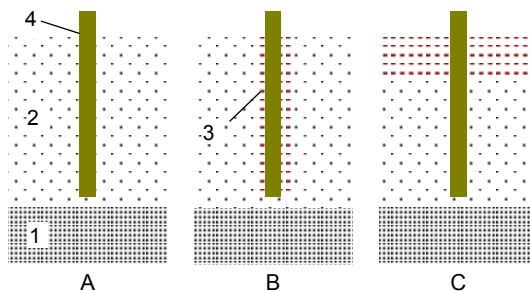
Do nasadzeń, jak wspomniano, wytypowano najbardziej popularną w naszym kraju roślinę energetyczną: wierzbę wiciową *Salix viminalis* (zwana także wierzbą konopianką), której podstawowymi zaletami są:

- rozmnażanie wegetatywne,
- szybki wzrost,
- odporność na choroby i szkodniki,
- wysoka mrozoodporność,
- dobra produktywność i jakość drewna.

Nasadzenia zaplanowano na okres późnojesienny (listopad 2003) i wiosenny (marzec 2004).

W dniu 27.11.2003 roku do nasadzenia wykorzystano zręzy sadzonek jednorocznych długości około 20 cm. Sadzonki na plantacji rozmieszczono rzędami w odległości około 100 cm, a odległość między sadzonkami wyniosła około 30–40 cm.

Zgodnie z planem (rys. 2) sadzonki nasadzano bezpośrednio w materiale hałdowym (A), w dołkach zaprawionych ustabilizowanymi osadami ściekowymi (B) oraz w tzw. warstwie uzdatnionej – w obecności osadów ściekowych (C).



Rys. 2. Technika nasadzeń: 1 – materiał hałdowy zagęszczony, 2 – materiał hałdowy rozluźniony, 3 – ustabilizowany komunalny osad ściekowy, 4 – zręzy wierzb krzewiastej

Fig. 2. Technics of planting: 1 – heap consolidated material, 2 – heap loosened material, 3 – stabilised communal sludge, 4 – disintegrated shrubby willows

Nasadzenia w marcu 2004 roku wykonano również w sposób opisany powyżej. Przed wsadzeniem sztabry były moczone w wodzie przez 24 do 48 godzin.

1.5. Pielęgnacja roślin

Wierzba krzewiasta, która jest sadzona w formie nieukorzenionej (zrzesy), szczególnie w pierwszym roku jest narażona na zachwaszczenie, dlatego w okresie wegetacyjnym sadzonki poddawane były okresowo mechanicznemu odchwaszczaniu (zwłaszcza w części plantacji uzdatnionej materiałem organicznym).

2. WYNIKI BADAŃ

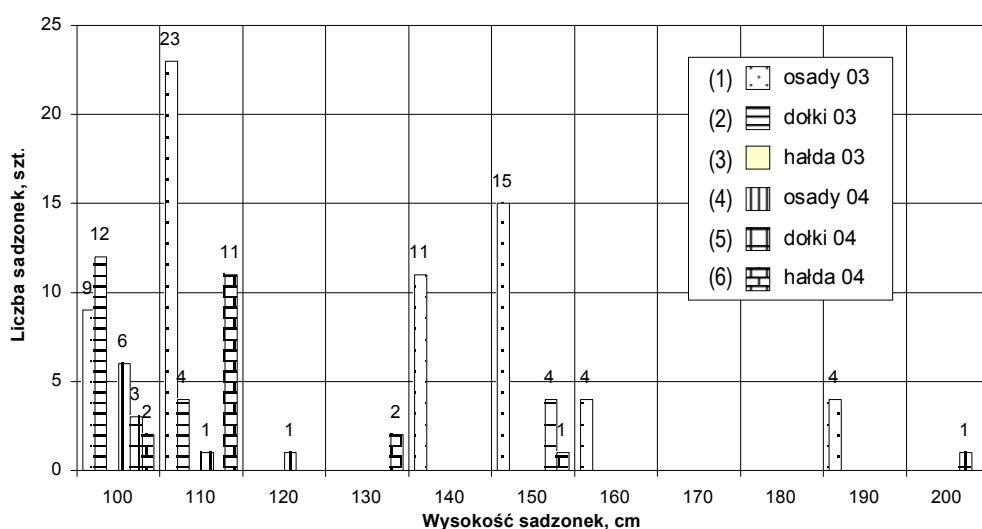
Wyniki badań prowadzonych na doświadczalnej plantacji wierzby *Salix viminalis* na składowisku odpadów powęglowych, które opracowano na podstawie prowadzonych w okresie listopad 2003 – październik 2004 okresowych kontrolach terenu plantacji, przedstawiono w tablicach 4 i 5 oraz na rysunkach 3 i 4.

Tablica 4. Wyniki badań udatności nasadzeń wierzby *Salix viminalis* – listopad 2003 rok

Wyszczególnienie	Warstwa uzdatniona	Dołki zaprawowe	Hałda	Ogółem
Pora nasadzeń	Listopad 2003 rok			
Liczba sadzonek, szt.	219	143	99	461
Wzeszło (nie wzrosło), szt.	156 (63)	104 (39)	82 (17)	342 (119)
Urosło w okresie wegetacyjnym, szt.	16	43	33	92
W sumie nie wzrosło ogółem, % (szt.)	36% (79)	57% (82)	51% (50)	45% (211)
W sumie wzrosło, % (szt.)	64% (140)	43% (61)	49% (49)	54% (250)
Jakość uzyskanej biomasy	najwyższe sadzonki – 190 cm, 66 sadzonek powyżej 100 cm	najwyższe sadzonki – 110 cm, średnia wysokość sadzonek – ok. 80 cm	najwyższe sadzonki – 90 cm, średnia wysokość sadzonek – ok. 50 cm	
Sadzonki powyżej 100 cm w odniesieniu do udatności, %	47%	26%	0%	33%
Sadzonki powyżej 100 cm w odniesieniu do ogólnej liczby sadzonek, %	30%	11%	0%	18%

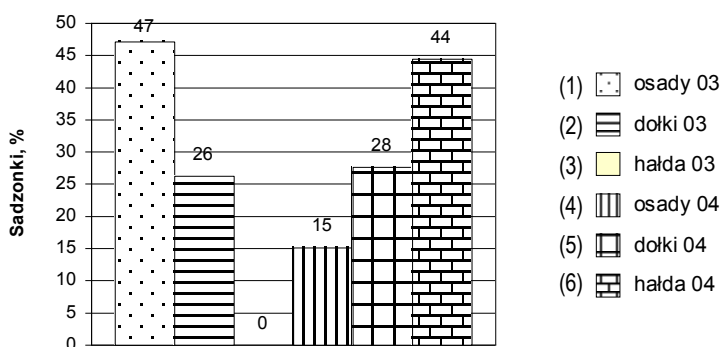
Tablica 5. Wyniki badań udatności nasadzeń wierzby *Salix viminalis* – marzec 2004 rok

Wyszczególnienie	Warstwa uzdatniona	Dołki zaprawowe	Hałda	Ogółem
Pora nasadzeń	Marzec 2003r			
Liczba sadzonek	289	50	101	440
Wzeszło (nie wzrosło), szt.	95 (194)	42 (8)	52 (49)	188 (253)
Urosło w okresie wegetacyjnym, szt.	42	13	16	73
W sumie nie wzrosło ogółem, % (szt.)	82% (236)	42% (21)	64% (65)	74% (326)
W sumie wzrosło, % (szt.)	18% (53)	58% (29)	36% (36)	26% (118)
Jakość uzyskanej biomasy	najwyższa sadzonka – 115 cm, 8 sadzonek powyżej 100 cm	najwyższa sadzonka – 200 cm, 8 sadzonek powyżej 100 cm	najwyższa sadzonka – 150 cm, 16 sadzonek powyżej 100 cm	
Sadzonki powyżej 100 cm w odniesieniu do udatności, %	15%	28%	44%	27%
Sadzonki powyżej 100 cm w odniesieniu do ogólnej liczby sadzonek, %	3%	16%	16%	7%



Rys. 3. Liczba sadzonek powyżej 100 cm na poszczególnych poletkach

Fig. 3. Number of quicksets above 100 cm on each experimental plot: 1,4 – sediments, 2,5 – holes, 3,6 – heap



Rys. 4. Procent sadzonek powyżej 100 cm w odniesieniu do udatności

Fig. 4. Percentage of quicksets above 100 cm with reference to neatness: 1,4 – sediments, 2,5 – holes, 3,6 – heap

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na plantacji doświadczalnej na składowisku kamienia „Wschód I” KWK Mysłówice nasadzono 901 sadzonek wierzby *Salix viminalis* w dwóch turach: w listopadzie 2003 roku (461 szt.) oraz w marcu 2004 roku (440 szt.). Przyjęty sposób nasadzeń obejmował nasadzenia bezpośrednio w materiale hałdowym, w dołkach zaprawionych ustabilizowanymi osadami ściekowymi oraz w tzw. warstwie uzdatnionej, którą stanowiła wierzchnia warstwa materiału hałdowego, wymieszana z osadami ściekowymi.

Na podstawie obserwacji stwierdzono, że najkorzystniejszą porą sadzenia wierzby na gruntach antropogenicznych, uformowanych z odpadów powęglowych, jest okres późnojesienny, kiedy sadzonka ma zapewnioną dostateczną ilość wilgoci, co wykorzystuje na początku okresu wegetacyjnego. Średnia udatność nasadzeń jesien-nych wyniosła 54%, przy udatności nasadzeń wiosennych wynoszącej 26%. Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku nasadzeń jesien-nych w warstwie uzdatnionej osadami ściekowymi, gdzie udatność wyniosła 64%, z czego prawie połowa sadzonek (47%) osiągnęła wysokość ponad 100 cm. Bardzo duży wypadek (74%) sadzonek wiosennych był spowodowany niekorzystnymi warunkami wodnymi. Duża liczba dni suchych, w okresie wiosennym i letnim podczas prowadzenia doświadczenia, spowodowała znaczne przesuszenie wierzchniej warstwy zwałowiska, nie zapewniając sadzonkom dostatecznej ilości wilgoci w początkowej fazie wzrostu.

Generalnie zrehabilitowane składowisko kamienia „Wschód I” nie było odpowiednim terenem do zakładania jakichkolwiek upraw, zwłaszcza roślin energetycznych. Niedostateczna ilość wody retencjonowanej powodowała, że warunki wzrostu sadzonek wierzby krzewiastej wykluczały odpowiedni przyrost masy (porównywalny z terenami rolnymi) – zapewniający opłacalność ekonomiczną plantacji.

Zwiększenie wielkości plonów w przypadku upraw lokalizowanych na obszarach lokowania odpadów powęglowych jest możliwe, gdy wybierze się teren zapewniający odpowiednią retencję wód, a także stworzy się „warstwę urodzajną”, na przykład przez zastosowanie komunalnych osadów ściekowych.

Z uwagi na to, że sadzonki wierzby krzewiastej osiągają maksymalny przyrost dopiero od drugiego roku uprawy, w celu określenia przydatności terenów pogórnich do zakładania plantacji roślin energetycznych, korzystne będzie kontynuowanie obserwacji plantacji doświadczalnej jeszcze przez co najmniej jeden okres wegetacyjny.

Literatura

1. Dubas J. (2003): *Uprawy wierzby na cele energetyki cieplnej*. Czysta energia nr 1.
2. Olejniczak J. (2000): *Możliwości i perspektywy energetycznego wykorzystania biomasy w produkcji rolniczej*. Przegląd komunalny nr 4(103).
3. Ruszkowski J. (1999): *Biomasa-źródłem energii odnawialnej*. Czystsza Produkcja w Polsce nr 5.
4. Szwalek K. (2003): *Energetycy krzewią wierzbę, aby palić nią w piecach*. Świat energii nr 3.
5. Weber H. (2000): *Odpady roślinne źródłem energii*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 5.
6. Broda J. i inni (1993): *Zagospodarowanie i rekultywacja składowiska kamienia „Wschód I” KWK Mysłowice*. Fundacja Wspierania Technologii Ekologicznych „Czyste Jutro”.
7. Stolarski M. (2003): *Instrukcja zakładania i prowadzenia połowych plantacji energetycznych wierzby krzewiastej*. Materiały szkoleniowe, Sosnowiec, marzec 2003.
8. Wyżgolik B., Brząkałik K.: (1994): *Produkcja biomasy na obszarach szczególnego zagrożenia*. Materiały seminaryjne. Mikołów WODR.
9. Brząkałik K. (1994): *Ogólne zasady zakładania plantacji wierzbowych na terenach zdegradowanych*. Materiały seminaryjne. Mikołów WODR.
10. *Uprawa wierzby krzewiastej Salix viminalis na cele energetyczne*. Materiały promocyjne Jero S.C., 2002.

Recenzent: dr Leszek Trzaski

Andrzej Staniek

METODA IDENTYFIKACJI CIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH W GÓROTWORZE

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę identyfikacji nieciągłości wklejenia żerdzi kotwionych w górotworze. Metoda polega na wymuszeniu drgań badanego obiektu młotkiem udarowym i eksperymentalnej analizie modalnej. Otrzymane częstotliwości własne porównywane są z wynikami teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Omówiono wyniki badań prowadzonych w warunkach stosowania obudowy kotwionej dla przypadków o znanej i nieznannej długości wklejenia. Przeprowadzono również analizę statystyczną otrzymanych wyników oraz przedstawiono wnioski końcowe.

Method for identification of continuity of resin layer of rock bolts

Abstract

A rock bolt which is grouted underground may not be properly inserted with the result of discontinuity of a cement layer surrounding it. Such discontinuity may also occur in working conditions due to typical rock behavior and displacement. It may be very hazardous to mine safety.

In this paper a method for non-destructive identification of discontinuity of a resin layer surrounding rock bolt is presented. The method uses modal analysis procedures and is based on an impact excitation where a response transducer is positioned at a visible part of a rock bolt. As an installed rock bolt acts as an oscillator, different length of discontinuity of resin layer changes its modal parameters. By proper extraction of these parameters, from which a resonant frequency is seen as most valuable, the intended identification is possible. At the first phase of research work measurements and analyses were performed in laboratory conditions on models with different types of discontinuity of a cement layer. A special stand was prepared and rock bolts were grouted into cement cylinders of different lengths and clinched to a 20-t foundation. Though there was a good correlation between obtained results, quite large interaction with supporting elements was observed. Not being unexpected it proved that such laboratory conditions can not be used as a reference for in situ measurements. What also was gained from laboratory measurements and analysis was the fact that most significant role in identification of different lengths of discontinuity of a resin layer, which form boundary conditions, play natural frequencies. Damping does not convey satisfactory information on that subject and may vary to a certain degree from sample to sample overshadowing its proper usefulness. Since tests in real conditions must be performed on relatively short length of a rock bolt, a mod shape usage was also constrained.

One of the obstacles in making in situ measurements, especially in severe mine conditions, is lack of a relatively low cost apparatus used for acquiring and recording data. These severe conditions are frequently met in coal mines where rock bolts are installed to support roof strata. Because of this inventing and constructing of a portable measurement system was realized. As a programming tool the LabVIEW program was used and as hardware a DAQ card installed on a laptop platform and worked out conditioning signal unit were introduced to the measurement chain.

As a continuation of laboratory measurements and analysis relevant tests were performed at an experimental coal mine underground. One of technical problems was proper insertion of a rock bolt into a drill hole with known length and placement of its discontinuity. After overcoming this obstacle underground tests were realized and through relevant analysis the modal parameters, especially natural frequencies, were derived. The experimental setup is shown in Figure 3.

It was found that proper identification of the natural frequencies of a grouted rock bolt is a key point in determining a position and length of the discontinuity of a resin layer. But what is also needed is a reference point, with which our results may be compared. With this aim theoretical modal analysis was introduced (Ewins, Silva, Uhl) and a database of Finite Element (FE) models with different types of resin discontinuity (different boundary conditions) was built. Then process of reconciliation of these two groups of models was undertaken and comparison between relevant known cases of discontinuities was made. An example of a Finite Element model and an analytical mode shape for such boundary conditions are presented in Figure 9. As there are many problems connected with proper reconciliation, exact experimental estimation of the physical properties of structural materials, including rock properties, was done.

At the final stage many tests on unknown cases of discontinuity of a grout layer were performed. Satisfactory results were obtained.

To sum up, the method consists mainly of two parts: proper derivation of modal parameters of an examined rock bolt, with natural frequencies seen as most valuable, and comparison with the data base of Finite Element models. The observed conclusions are: close relation between modal parameters and boundary conditions of tested structures exists, satisfactory repeatability for the same cases of discontinuity was obtained.

WPROWADZENIE

W światowym górnictwie węglowym obudowa kotwiona stanowi podstawę bezpiecznego utrzymywania wyrobisk korytarzowych. Wśród liczących się producentów węgla wydobywanego sposobem podziemnym: USA, RPA i Australii, jest ona praktycznie jedyną stosowaną obudową wyrobisk korytarzowych. Obudowa kotwiona jest coraz częściej stosowana w innych krajach, w tym także w Polsce.

Powszechniejsze stosowanie obudowy kotwionej jest spowodowane rozwojem przemysłu wytwarzającego zmechanizowany sprzęt do kotwienia, przede wszystkim lekkie kotwiarki pneumatyczne i hydrauliczne, wozy kotwiąco-podporowe, a także szeroki asortyment kotwi stalowych. Innym, istotnym powodem stosowania obudowy kotwionej, szczególnie w skałach słabych, dotychczas tradycyjnie podtrzymywanych obudową podporową, jest wprowadzanie do użytku ładunków klejowych na bazie żywic poliestrowych do osadzania kotwi w górotworze.

Niezależnie od metod projektowania i sposobów wykonywania obudowy kotwionej, podstawowe znaczenie, z uwagi na bezpieczeństwo, ma kontrola pracy jej parametrów. W przeciwieństwie bowiem do obudowy podporowej, która może być w każdej chwili, po zabudowaniu, sprawdzona wizualnie oraz poddana testom, istotna – tj. umieszczona w odwiercanych otworach – część konstrukcji obudowy kotwionej jest niewidoczna dla obserwatora znajdującego się w wyrobisku. W związku z tym sprawdzenie wszystkich jej elementów jest albo niemożliwe, albo bardzo uciążliwe. Obecnie powszechnie są stosowane następujące trzy rodzaje kontroli pracy obudowy kotwionej:

- sprawdzenie na powierzchni typu i jakości prętów, terminu ważności użytego spoiwa (ładunku klejowego), a następnie po zamocowaniu kotwi kontrolę wizualną jakości zamocowania zewnętrznych części obudowy, rozstawu i usytuowania kotwi,
- kontrolę parametrów pracy obudowy kotwionej, polegającą na pomiarze nośności nominalnej kotwi oraz, w przypadku zamocowania odcinkowego, próbnego obciążenia kotwi,
- kontrolę stateczności wyrobiska – badanie rozwarstwienia skał stropowych lub zaciskania wyrobiska.

W praktyce górniczej, mimo istniejących na rynku bardzo dobrych spoiw, w następstwie: rozwarstwienia skał, przenikania kleju do szczelin, sedimentacji cementu, pracy górotworu, żerdź kotwiowa bardzo często nie jest związana mechanicznie z górotworem na całej swojej długości. W takiej sytuacji nie wiadomo, czy zamocowana kotew pełni swoją funkcję właściwie i jaka miąższość skały jest faktycznie przez nią związana, konsekwencją czego może być zawalenie się stropu.

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że skuteczna metoda kontroli ciągłości wklejenia żerdzi kotwiowej w górotworze nie została jeszcze opracowana. Nie jest więc kontrolowany podstawowy czynnik wpływający na pracę obudowy kotwiowej, a tym samym na stabilność wyrobiska i bezpieczeństwo pracy załogi.

1. TEORETYCZNE PODSTAWY PROWADZONYCH BADAŃ

Właściwości dynamiczne struktur mechanicznych mają charakter wielkości rozproszonych w przestrzeni. Te właściwości to masa, sztywność mechaniczna oraz tłumienie, od których jest uzależniona bezwładność, siły sprężystości oraz tarcie. Opis wzajemnego oddziaływania wszystkich właściwości mechanicznych badanej struktury mechanicznej na podstawie modelowania rzeczywistej struktury mechanicznej jest przedsięwzięciem bardzo złożonym lub wręcz niemożliwym. Jednakże, w większości przypadków, satysfakcjonujące rezultaty mogą być osiągnięte, jeżeli podstawowe właściwości złożonej struktury są rozpatrywane jako suma cech zbioru prostych elementów dyskretnych, na które ta struktura może być podzielona, a które właściwie powiązane mogą reprezentować z zadawalającą dokładnością jej charakterystyki dynamiczne.

1.1. Model modalny

Jedną z metod analizy właściwości mechanicznych struktur lub układów mechanicznych jest analiza modalna. Może być ona stosowana, jeżeli są spełnione następujące założenia (Uhl 1997):

- spełniona jest zasada liniowości, a więc dynamika może być opisana za pomocą liniowego układu równań różniczkowych,
- współczynniki równań opisujących dynamikę są niezmiennie w czasie pomiarów,
- badana struktura jest obserwowalna i istnieje możliwość pomiaru charakterystyk, których znajomość jest niezbędna do identyfikacji modelu,
- spełniona jest zasada wzajemności Maxwella, tzn. odpowiedź w i -tym punkcie na wymuszenie w j -tym punkcie jest równa odpowiedzi w j -tym punkcie na to samo wymuszenie w i -tym punkcie,
- tłumienie jest małe lub proporcjonalne.

Ostatni warunek jest istotny, gdy są stosowane metody identyfikacji parametrów modalnych dla jednego stopnia swobody, natomiast w praktyce w przypadku struktur silnie tłumionych identyfikacja modelu jest możliwa przez zastosowanie technik bazujących na metodzie najmniejszych kwadratów.

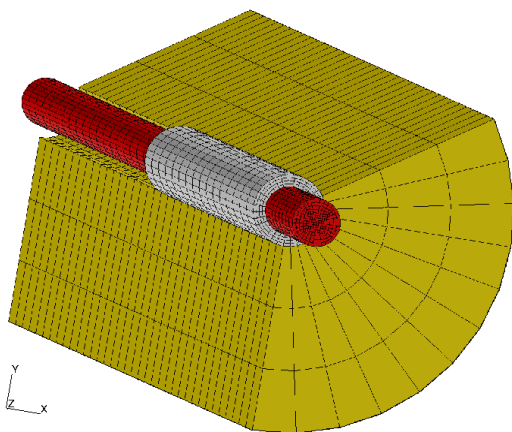
Model modalny jest zdefiniowany jako zbiór częstotliwości drgań własnych, współczynników tłumienia dla tych częstotliwości oraz postaci drgań (wektorów

modalnych). Wielkości te można otrzymać z modelu strukturalnego układu przez rozwiązanie zagadnienia własnego dla macierzy mas, tłumienia i sztywności mechanicznej. Stąd też często analizę modalną definiuje się jako rozwiązanie zagadnienia własnego dla badanej struktury mechanicznej.

1.2. Układy o wielu stopniach swobody

Podstawowym pojęciem związanym z analizą modalną jest liczba stopni swobody. Jest to minimalna liczba niezależnych współrzędnych, których znajomość jest konieczna do opisanie położenia układu w przestrzeni. Dla przykładu, liczba stopni swobody dla bryły sztywnej wynosi 6: trzy stopnie związane z przesunięciami wzdłuż poszczególnych osi układu współrzędnych oraz trzy związane z obrotami wokół tych osi. Każdy układ mechaniczny może być traktowany jako zbiór nieskończonej liczby małych brył sztywnych, z tego też względu może być on traktowany jako układ o nieskończonej liczbie stopni swobody. W praktyce wszystkie układy aproksymuje się układem o skończonej liczbie stopni swobody. Jest to konsekwencją budowy modeli układów mechanicznych, na podstawie których analizuje się ich ruch w określonym zakresie częstotliwości. Od liczby stopni swobody jest zależny wymiar macierzy mas, sztywności i tłumienia, jak również liczba teoretycznych częstotliwości drgań własnych i postaci drgań (Byron, Fuller 1975, Uhl 1997, Remington 1997). W praktyce stosuje się również modele zredukowane, w których zmniejszenie liczby stopni swobody wiąże się ze zmniejszeniem wymiaru macierzy mas, sztywności i tłumienia. Jednakże, taka redukcja nie może ograniczać się jedynie do eliminacji wybranych kolumn i wierszy macierzy mas, sztywności i tłumienia, gdyż w konsekwencji otrzymany układ miałby inne właściwości mechaniczne, lecz do redystrybucji parametrów opisujących masę, sztywność i tłumienie z redukowanych wierszy i kolumn do pozostałych. Bardziej trafnym określeniem jest więc kondensacja macierzy.

Przykład układu o wielu stopniach swobody, który stanowi pręt stalowy (żerdź kotwiowa) przytwierdzony na określonym odcinku do górotworu z wykorzystaniem żywicy poliestrowej (wklejenie formułuje określone warunki brzegowe) przedstawiono na rysunku 1. Przypadek taki był analizowany w czasie prowadzonych badań.

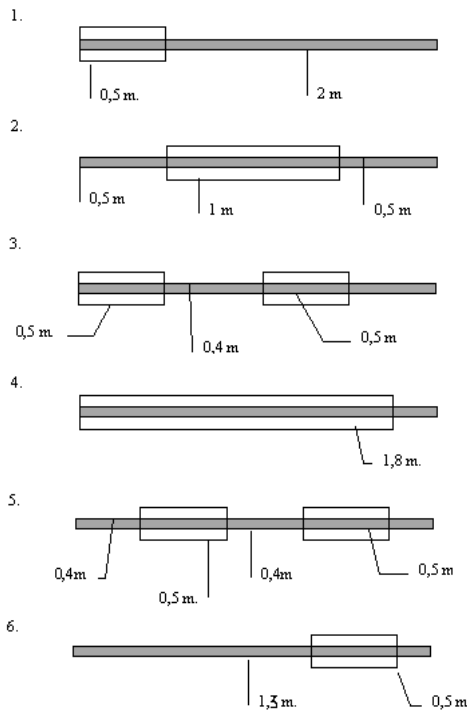


Rys. 1. Układ o wielu stopniach swobody – drgający pręt stalowy (żerdź kotwiowa) z zaznaczonymi warunkami brzegowymi (przytwierdzenie na określonym odcinku do górotworu – kolor żółty, z wykorzystaniem żywicy poliestrowej – kolor biały)

Fig. 1. Multidimensional oscillator – vibrating rock bolt grouted into the rock on a certain length, that forms particular boundary conditions (resin layer – white colour, rock – yellow colour, rock bolt – red colour)

2. ANALIZA RÓŻNYCH PRZYPADKÓW NIECIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

W celu zbadania możliwości identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych utworzono specjalne stanowisko badawcze. Wykonano szereg cementowych walców o różnej długości z wydrążonym wzdłuż osi symetrii walca otworem o średnicy około 28 mm (typowa średnica odwiercanych otworów w warunkach rzeczywistych). Długości cementowych walców dobrano tak, aby umożliwiały wklejenie żerdzi na długościach: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ oraz na całej długości. Następnie przystąpiono do wklejenia żerdzi stosując typowy, popularnie stosowany w Polsce klej poliestrowy. Przygotowano w ten sposób różne kombinacje nieciągłości wklejenia, z których część pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rodzaje badanych nieciągłości wklejeń (przykłady)
Fig. 2. Different cases of measured resin discontinuities (examples)

2.1. Wnioski z badań laboratoryjnych

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych wyciągnięto następujące wnioski:

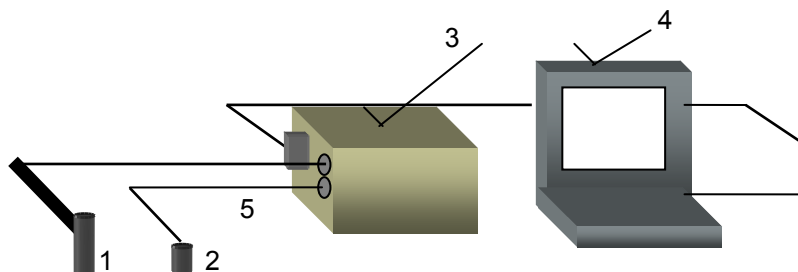
- zaproponowana metoda może być skuteczna do identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych,
- w celu właściwego mocowania żerdzi (stwierdzono wady mocowania z wykorzystaniem imadeł) badania należało kontynuować w warunkach rzeczywistych stosowania obudowy kotwiowej (kopalnia doświadczalna, zakłady górnicze stosujące samodzielną obudowę kotwiową),

- konieczne było skonstruowanie przenośnego systemu akwizycji danych pomiarowych zapewniającego rejestrację funkcji przejścia w warunkach, gdzie stosowana jest samodzielna obudowa kotwiowa,
- w celu identyfikacji odcinków nieciągłości należało opracować matematyczny model badanej struktury (model elementów skończonych) uwzględniający różne, badane eksperymentalnie przypadki nieciągłości wklejenia oraz przeprowadzić na tym modelu teoretyczną analizę modalną,
- wyniki analizy modalnej, zrealizowanej na modelu teoretycznym, mogą stanowić bazę odniesienia dla identyfikowanych nieznanych przypadków po uprzednim dostrojeniu modeli eksperymentalnego i teoretycznego.

3. SYSTEM POMIAROWY UMOŻLIWIAJĄCY REJESTRACJĘ I AKWIZYCJĘ DANYCH W WARUNKACH TERENOWYCH

W celu praktycznej realizacji wniosku wynikającego z badań laboratoryjnych opracowano i skonstruowano system pomiarowy, umożliwiający rejestrację i akwizycję funkcji przejścia (*Frequency Response Function*) badanych obiektów w warunkach terenowych.

Ze względu na konieczność równoczesnej dwukanałowej rejestracji sygnału analogowego (rejestracja funkcji przejścia) wybrano odpowiednią kartę DAQCard-6062E, 500 kS/s. Program komputerowy sterujący pracą systemu rejestracji i akwizycji danych opracowano w języku ikonicznym w środowisku LabVIEW. Równocześnie z tworzeniem programu określono założenia oraz wykonano dwukanałowy układ wzmacnienia i dopasowania sygnału, dostosowany do współpracy z piezoelektrycznymi przetwornikami drgań. Po sprawdzeniu działania programu zestawiono system pomiarowy, przedstawiony na rysunku 3, składający się z wykonanego, według własnej konstrukcji, dwukanałowego układu wzmacnienia i dopasowania sygnału sterowanego wspomnianym oprogramowaniem zapisanym w pamięci przenośnego komputera.

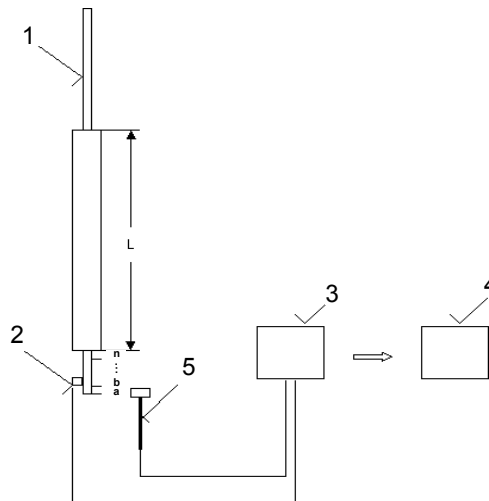


Rys. 3. Przenośny system pomiarowy dla akwizycji i rejestracji funkcji przejścia, pliki wejściowe dla eksperymentalnej analizy modalnej badanych struktur mechanicznych (żerdzi kotwiowych): 1 – młotek uderowy z przetwornikiem siły, 2 – przetwornik przyspieszenia drgań, 3 – układ wzmacnienia i dopasowania sygnału, 4 – komputer przenośny typu laptop, 5 – gniazdo 68 pin

Fig. 3. Portable unit for acquisition and recording of frequency response function (FRF), the source files for experimental modal analysis of tested mechanical structures (rock bolts): 1 – impact hammer with force transducer, 2 – accelerometer, 3 – conditioning unit, 4 – laptop computer, 5 – 68 pin socket

4. METODA IDENTYFIKACJI CIĄGŁOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH ZAMOCOWANYCH W GÓROTWORZE

Metoda identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych w górotworze polega na wymuszaniu drgań badanego obiektu za pomocą młotka udarowego, wyposażonego w przetwornik siły umieszczony w głowicy młotka oraz równoczesną rejestrację sygnału wymuszenia, pochodzącego z przetwornika siły i sygnału odpowiedzi na to wymuszenie, pochodzącego z piezoelektrycznego przetwornika drgań. Kierunek wymuszenia jest prostopadły do osi symetrii żerdzi, oś główna przetwornika odbiorczego również jest prostopadła do osi symetrii żerdzi. Wymuszenie drgań odbywa się w kilku punktach na wystającym z górotworu odcinku żerdzi kotwionej, przy określonym położeniu przetwornika odbiorczego umieszczonego na tym odcinku żerdzi. Sygnały rejestruje się sekwencyjnie dla każdej pary punktów pomiarowych, wykorzystując skonstruowany system akwizycji danych. Dane są zapisywane w postaci plików w formacie UF (*universal file*), a następnie importowane do programu realizującego analizę modalną w celu identyfikacji odpowiednich częstości własnych badanego obiektu, charakterystycznych dla danego rodzaju nieciągłości wklejenia. Otrzymane częstości własne są porównywane z wynikami teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Układ pomiarowy stosowany w metodzie przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Układ pomiarowy: 1 – żerdź kotwiona, 2 – przetwornik drgań, 3 – system akwizycji danych, 4 – stacja robocza dla analizy modalnej, 5 – młotek udarowy, a–n – punkty wymuszenia, L – długość wklejenia

Fig. 4. Experiment setup: 1 – rock bolt, 2 – accelerometer, 3 – portable measurement system, 4 – workstation for modal analysis, 5 – impact hammer, a–n – points excited, L – grouted length

Układ pomiarowy do akwizycji i rejestracji danych w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwionej przedstawiono na zdjęciach 1 i 2.



Fot. 1. Przenośny system akwizycji i rejestracji funkcji przejścia – PSAR-FRF; realizacja badań w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej

Foto. 1. Portable unit for acquisition and recording of frequency response function – PSAR-FRF, measurement in real working conditions where rock bolt support system is used



Fot. 2. Wymuszanie drgań młotkiem udarowym, sygnał odpowiedzi mierzony piezoelektrycznym przetwornikiem drgań

Foto. 2. Exciting of a rock bolt with an impact hammer, response of the impact measured with piezoelectric transducer

Zaletami metody jest: możliwość oceny ciągłości wklejenia w dowolnym momencie po zamontowaniu kotwi, nieniszczący charakter metody oraz brak konieczności instalacji oprzyrządowania w górotworze.

Jednym z podstawowych warunków realizacji metody jest identyfikacja modelu modalnego badanej struktury. Model modalny struktury mechanicznej składa się zasadniczo z dwóch macierzy:

- macierzy fundamentalnej zawierającej częstotliwości własne i współczynniki tłumienia drgań (parametry te są zawarte w wartościach własnych macierzy),
- macierzy modalnej zawierającej wektory własne drgań (postacie drgań).

Można więc konstruować model, zaczynając od identyfikacji pojedynczych wektorów modalnych, a bardziej złożony model (niekoniecznie kompletny) stanowiłyby zestawione razem współrzędne poszczególnych wektorów modalnych wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami drgań własnych i współczynnikami tłumienia.

Z pojedynczej charakterystyki funkcji przejścia $H_{jk}(\omega)$, gdzie j, k oznaczają odpowiednio punkty wymuszenia i odpowiedzi, możliwe jest obliczenie: częstotliwości własnej, współczynnik tłumienia oraz reszty modalnej dla r -tego modu (Dossing 1988).

$$H_{jk}(\omega) \rightarrow \eta_r A_{jk}; \quad r = 1, m \quad (1)$$

gdzie: $\omega, \eta_r, A_{jk}, m$ – oznaczają odpowiednio częstotliwość drgań, współczynnik tłumienia, resztę modalną i liczbę modów drgań zidentyfikowanych w procesie analizy.

Aby otrzymać poszczególne elementy macierzy modalnej $[\Phi]$, czyli współrzędne wektorów modalnych ϕ_{jr} , konieczne jest wykonanie serii pomiarów funkcji przejścia kolejno w różnych punktach badanej struktury mechanicznej. Szczególnie ważnym jest pomiar odpowiedzi bezpośrednio w punkcie wymuszenia. Można wtedy otrzymać składowe r -tego modu drgań, znając resztę modalną A_{kk} w tym punkcie, na podstawie zależności

$$\phi_{jr}^2 = A_{kk} \quad (2)$$

Pozostałe współrzędne wektora modalnego mogą być obliczone z równania

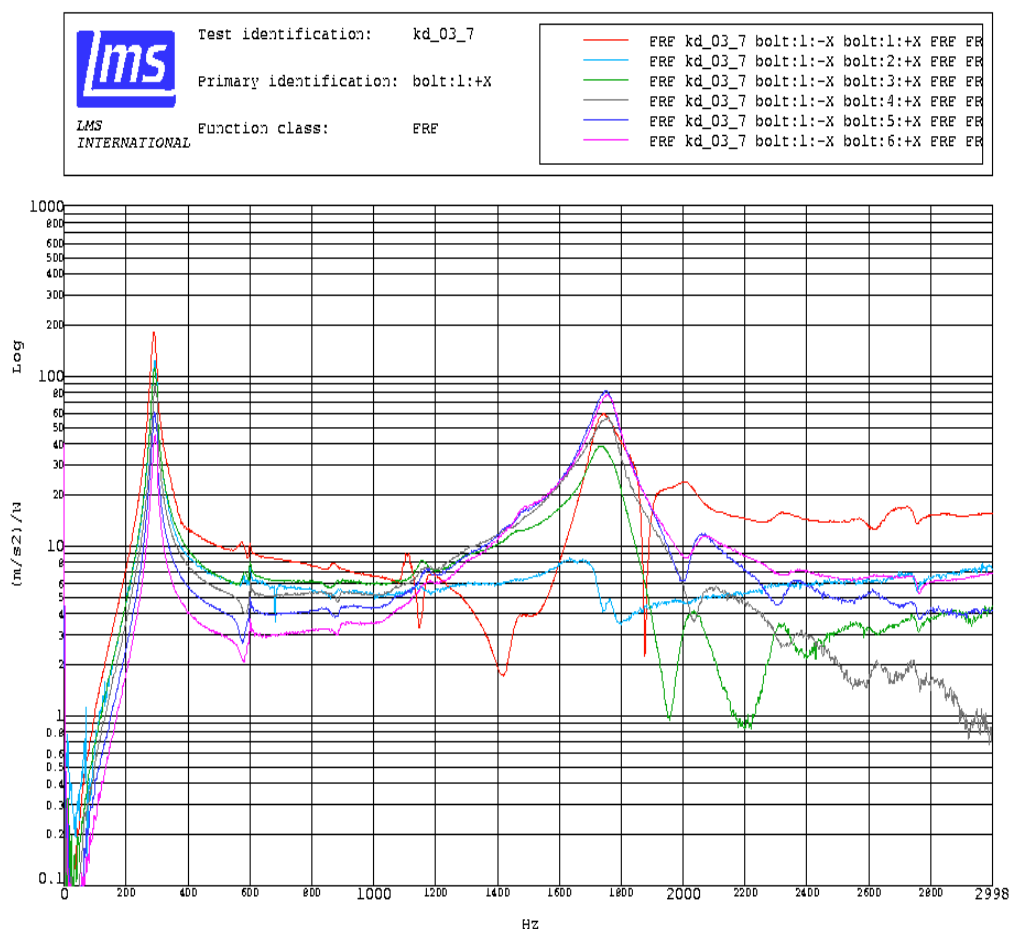
$$\phi_{jr} = \frac{A_{jk}}{\phi_{jr}} \quad (3)$$

gdzie: ϕ_{jr}, ϕ_{jr} – współrzędne wektora po jego znormalizowaniu.

Stąd dla pełnego obrazu drgań badanej struktury o n stopniach swobody jest potrzebny pomiar funkcji przejścia w n różnych punktach badanej struktury, włączając w to funkcję przejścia mierzoną w punkcie wymuszenia (Uhl 1997; Maia, Silva 1997). Jest to równoważne z pomiarami funkcji przejścia będących elementami kolumny lub wiersza macierzy $[H]$. W praktyce często jest zasadne zwiększenie liczby punktów pomiarowych i pomiar dodatkowych elementów macierzy, na przykład dodatkowego wiersza (lub kolumny).

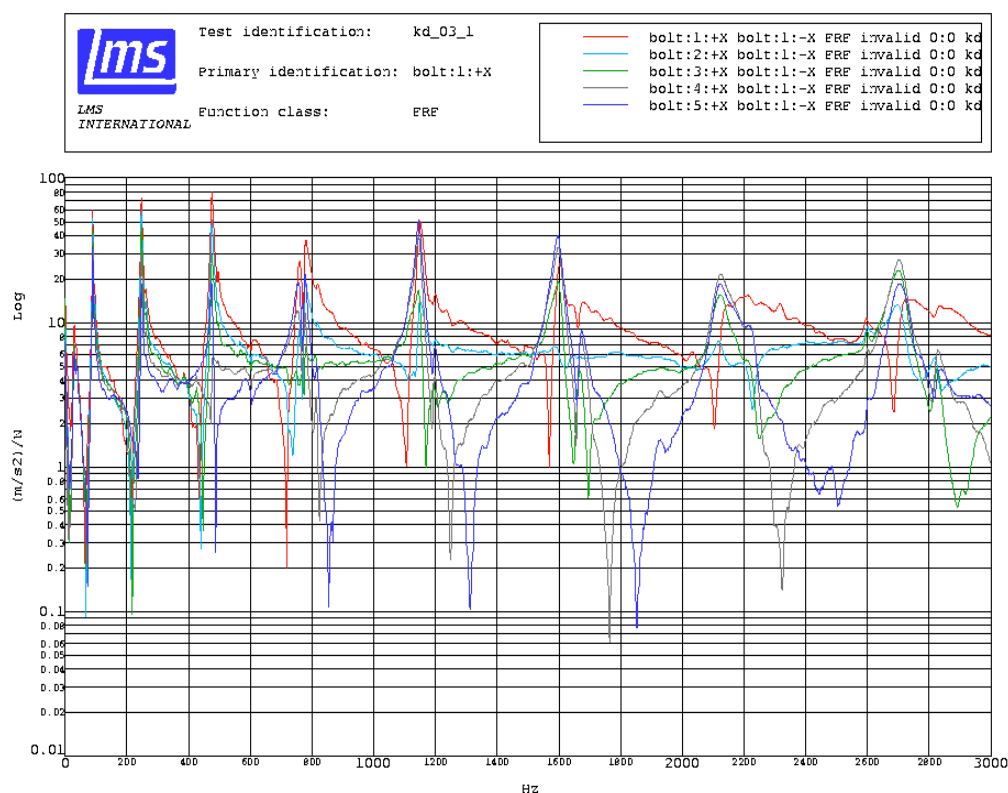
W prowadzonych badaniach zasadniczym parametrem modalnym, który był brany pod uwagę w celu rozróżnienia poszczególnych przypadków nieciągłości wkleje-

nia, była częstotliwość drgań własnych. Postaci drgań własnych z oczywistych względów nie mogą być określone dla całej drgającej struktury (brak dostępu do części znajdującej się w górotworze). Było to możliwe jedynie w warunkach laboratoryjnych. W celu zwiększenia dokładności metody, pomiary funkcji przejścia były wykonywane dla 5–7 punktów rozmieszczonych na wystającym z górotworu odcinku żerdzi. Zapewniało to obliczanie częstotliwości drgań własnych z wykorzystaniem większej liczby równań oraz uśrednienie otrzymanych wyników metodą najmniejszych kwadratów. Dodatkowo można było w ten sposób uniknąć przypadkowego wymuszenia drgań w węźle określonej postaci drgań. Poniżej na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykłady wyników badań dla wklejenia realizowanego w sposób kontrolowany w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej.



Rys. 5. Charakterystyki FRF dla poszczególnych punktów wymuszenia dla przypadku wklejenia na długości $\frac{1}{2}$ długości żerdzi – od calizny stropu

Fig. 5. FRF characteristics for different points of excitation for a rockbolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the outer end



Rys. 6. Charakterystyki FRF dla poszczególnych punktów wymuszenia dla przypadku wklejenia na długości $\frac{1}{2}$ długości żerdzi – od dna otworu

Fig. 6. FRF characteristics for different points of excitation for a rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the hidden end

Zasadniczy element identyfikacji nieciągłości wklejenia, to porównanie wyznaczonych eksperymentalnie częstotliwości drgań własnych z bazą danych otrzymaną w wyniku teoretycznej analizy modalnej realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu dla różnych warunków brzegowych odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Model teoretyczny, aby mógł być stosowany jako baza odniesienia, musiał być dostrojony na podstawie wyników eksperymentu dla przypadków wklejenia prowadzonych w sposób kontrolowany.

5. WYKONANIE OBLICZEŃ I WERYFIKACJA WARUNKÓW BRZEGOWYCH

Proces dostrojenia modeli eksperymentalnego i teoretycznego realizowano dla przypadków, które były analizowane w rzeczywistych warunkach stosowania obudowy kotwicznej w wyrobiskach górniczych (dla przypadków, w których wklejenie prowadzone było w sposób kontrolowany). Wykonanie obliczeń, które miało na celu określenie wrażliwości odpowiedzi w poszczególnych punktach modelu (stopniach

swobody) na zmiany wartości zbioru parametrów modelu (opisujących właściwości mechaniczne badanego obiektu czyli: parametry materiałowe, przyjęty rodzaj tłumienia itp.), nie dało pozytywnych rezultatów. Brak możliwości dopasowania modeli eksperymentalnego i analitycznego przez zmiany parametrów modelu skłonił autora do nieznacznych modyfikacji przyjętych warunków brzegowych w modelu teoretycznym (długości odcinków, na których żerdź była wklejona), a które w praktyce mogły częściowo różnić się od założonych. Po szeregu, przeprowadzonych w sposób iteracyjny, zmianach geometrii warunków brzegowych oraz towarzyszących im obliczeniach parametrów modalnych i funkcji przejścia, osiągnięto zadawalającą zgodność dopasowania modeli. Stwierdzono, że ten sposób dopasowania jest efektywny dla całej grupy przypadków, uwzględniając zidentyfikowane dla danego przypadku częstości własne. Uzasadniony był również wniosek, że parametry opisujące właściwości mechaniczne modelu elementów skończonych zostały właściwie określone już na etapie jego projektowania (parametry były wyznaczane empirycznie) i stąd wcześniejszy brak skuteczności dopasowania modelu przez ich modyfikację.

5.1. Dopasowanie modeli modalnych eksperymentalnego oraz teoretycznego

Jednym z podstawowych zadań teoretycznej analizy modalnej jest dostrajanie modeli obliczeniowych (np. modeli elementów skończonych), które stanowią analityczny obraz rzeczywistych badanych obiektów do modelu eksperymentalnego. Modele dostraja się na podstawie wyników eksperymentalnej analizy modalnej. Wszelkie modyfikacje rzeczywistego obiektu mogą być wtedy opisane wprowadzonymi zmianami w modelu analitycznym (Bochniak, Uhl, Lisowski 1999).

Wyniki eksperymentalnej analizy modalnej w postaci charakterystyk funkcji przejścia są mierzone i rejestrowane podczas pomiaru. W przypadku porównywania modeli analitycznego i eksperymentalnego najbardziej dogodnie jest porównanie parametrów modalnych tych modeli. Wynika to z faktu, że obliczenie przebiegu funkcji przejścia dla modeli analitycznych wymaga wcześniejszej znajomości parametrów modalnych, a jej postać zależy od liczby modów drgań, które uwzględnione zostały w obliczeniach. Parametry modalne natomiast, mogą być określone oddzielnie dla poszczególnych modów drgań w przyjętym zakresie częstotliwości, ograniczonym do zakresu użytecznego w przypadku konkretnego testu. Równocześnie eksperymentalna identyfikacja parametrów modalnych wymaga także wykonania koniecznych procedur obliczeniowych. Warunkiem jest posiadanie określonych mocy obliczeniowych i czasu. Pomimo tego wymagania, porównanie parametrów modalnych modelu eksperymentalnego i analitycznego jest jedną z najczęściej stosowanych metod dopasowania modeli.

W celu weryfikacji dopasowania modeli teoretycznego i eksperymentalnego najbardziej oczywistą czynnością jest porównanie zmierzonych częstotliwości własnych względem wartości obliczonych numerycznie (na podstawie modelu elementów skończonych). Można takie porównanie zrealizować tabelarycznie oraz w formie wykresu. Wykres jest bardziej użyteczny, gdyż pozwala na określenie stopnia korelacji tych modeli oraz przedziału występujących rozbieżności. Ważne jest jednak, aby zestawiane dane pochodziły od odpowiadających sobie postaci (modów) drgań,

niekoniecznie kolejnych. Jeżeli modele są dobrze skorelowane ze sobą, to punkty wykresu, w którym na osiach są oznaczone odpowiadające sobie częstotliwości drgań własnych, powinny znajdować się na prostej przecinającej oś współrzędnych pod kątem około 45°. Duże rozproszenie punktów świadczy o poważnych błędach modelowania numerycznego lub błędach popełnionych w czasie pomiarów. Jeżeli odchylenie punktów ma charakter systematyczny, świadczy to o występowaniu nieliniowości w badanej strukturze.

5.2. Metody porównywania modeli teoretycznego i eksperymentalnego, wyznaczanie korelacji funkcji przejścia

W przypadku dostrojenia modeli eksperymentalnego i analitycznego przez porównanie i wyznaczanie korelacji charakterystyk odpowiedzi badanego układu na wymuszenie, może być to realizowane zarówno w dziedzinie czasu – odpowiedź impulsowa układu (IRF), jak i w dziedzinie częstotliwości – funkcja przejścia (FRF). W najprostszej formie stopień zgodności jest określany przez nałożenie pojedynczych charakterystyk otrzymanych dla obu dopasowywanych modeli. Warunkiem wykreślenia teoretycznych charakterystyk funkcji przejścia jest przyjęcie prawidłowych założeń dotyczących: rodzaju i stopnia tłumienia (co nie jest bezpośrednio częścią modelowania) i liczby wektorów modalnych, które będą uwzględnione w obliczeniach (Silva, Maia 1999).

Podczas typowego testu modalnego, w przypadku impulsowego wzbudzenia drgań, wymuszenie drgań jest wykonywane w wielu punktach badanego obiektu (dla testów z wzbudnikiem drgań jest zmieniane położenie przetwornika odbiorczego). W celu otrzymania stopnia korelacji i dopasowania modeli analitycznego i eksperymentalnego dla wymuszenia w punkcie j i odpowiedzi w punkcie k , można zdefiniować parametr $FRAC(j)_k$ (*Frequency Response Assurance Criterion*) określony zależnością

$$FRAC(j)_k = \frac{\sum_{i=1}^L |X H_{jk}(\omega_i)|^2 |A H_{jk}^*(\omega_i)|^2}{\sum_{i=1}^L |X H_{jk}(\omega_i)|^2 \sum_{i=1}^L |A H_{jk}(\omega_i)|^2} \quad (4)$$

gdzie:

- $X H_{jk}$ – funkcja przejścia dla modelu eksperymentalnego,
- $A H_{jk}$ – funkcja przejścia dla modelu analitycznego,
- $i = 1, L$ – zakres częstotliwości, w którym dokonuje się obliczenia,
- j – punkt wymuszenia,
- k – punkt odpowiedzi.

5.3. Metoda dostrajania modeli w dziedzinie częstotliwości

Metody dostrajania modeli elementów skończonych na podstawie danych uzyskanych w badaniach można podzielić na:

- metody bezpośrednie dostrajania, w których poszczególne elementy macierzy mas i sztywności są dostrajane na podstawie wyników obliczeń i badań,
- metody pośrednie polegające na dopasowaniu właściwości fizycznych modelu.

Druga grupa metod dostrajania wydaje się być bardziej odpowiednia, ponieważ działania są wykonywane wprost na wielkościach fizycznie występujących w danej strukturze.

Rozpatrując odpowiedź układu w dziedzinie częstotliwości i zakładając, że po pewnych modyfikacjach dostrojony model elementów skończonych poprawnie przedstawia zmierzone funkcje przejścia, równanie opisujące odpowiedź układu po i przed modyfikacją można przedstawić w postaci (Ewins 2000; Silva, Maia 1999)

$$\mathbf{Z}_U(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{f} = \mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_A(\omega) \quad (5)$$

gdzie:

Z – macierz sztywności dynamicznej,

f – przyłożona siła,

X, A, U – symbole oznaczające odpowiednio model eksperymentalny, obliczeniowy i poprawiony obliczeniowy.

Odejmując od obu stron równania wyrażenie: $\mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_X(\omega)$, dla przyłożonej siły jednostkowej równanie (2) może być przekształcone do postaci

$$\Delta \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{f}_j - \mathbf{Z}_A(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) \quad (6)$$

gdzie:

$[\Delta Z(\omega)]$ – błąd macierzy sztywności dynamicznej,

j – lokalizacja punktu przyłożenia siły.

Mnożąc obie strony równania przez macierz funkcji przejścia dla modelu analitycznego otrzymuje się

$$\mathbf{H}_A(\omega) \Delta \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{H}_X(\omega) = \mathbf{H}_A(\omega) \mathbf{f}_j - \mathbf{H}_X(\omega) = \Delta \mathbf{H}_A(\omega) \quad (7)$$

Prawa strona równania przedstawia brak dopasowania funkcji przejścia: analitycznej i eksperymentalnej.

Aby otrzymać rozwiązanie, konieczny jest wybór parametrów wpływających na wielkość błędu. Wybiera się N_p parametrów modelu jako zmienne tworzące wektor $\{P\}$, które są przyczyną braku dopasowania modeli analitycznego i eksperymentalnego. Parametry te można przedstawić w postaci bezwymiarowej

$$p_i = \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_i^0 \quad (8)$$

gdzie $\{P^0\}$ są wartościami parametrów dla modelu analitycznego przed wprowadzeniem zmian. Parametry dopasowania p_i reprezentują częściowe zmiany zmiennych parametrów modelu. Szukana macierz sztywności dynamicznej dla dopasowywanego modelu elementów skończonych $[Z_U]$ jest funkcją $\{p\}$ i może być przedstawiona jako rozwinięcie w szereg Taylora względem macierzy sztywności dynamicznej początkowego modelu, $[Z_A]$, w sposób określony zależnościami

$$\mathbf{Z}_U = \mathbf{Z}_A + \Delta = \mathbf{Z}_A + \sum_{i=1}^N \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial p_i} p_i + \mathbf{R}_i^2 \quad (9)$$

Pozostawiając jedynie składniki sumy dla pochodnej pierwszego rzędu otrzymuje się

$$\underline{\Delta} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \underline{f}}{\partial p_i} p_i \quad (10)$$

Podstawiając wyrażenie (10) do równania (7) otrzymuje się po przekształceniach

$$\underline{H}(\omega) \underline{A} = \Delta H(\omega) \quad (11)$$

gdzie

$$\underline{H}(\omega) = \underline{H}_A(\omega) \left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial p_1} \underline{A}_X(\omega) + \dots + \frac{\partial \underline{f}}{\partial p_{N_p}} \underline{A}_X(\omega) \right] \quad (12)$$

Każdy wiersz macierzy $[S(\omega)]$ określa wrażliwość odpowiedzi w poszczególnych stopniach swobody (współrzędnych) na zmiany wartości zbioru parametrów p . Równanie (11) przedstawia układ N liniowych równań dla N_p niewiadomych odnoszących się do pojedynczej częstotliwości ω . Na podstawie N_f punktów charakterystyki częstotliwościowej można utworzyć N_f układów równań, co daje $N_f \cdot N$ równań dla N_p niewiadomych. Taki nadmiarowy układ równań może być rozwiązany, na przykład z wykorzystaniem metody dekompozycji wartości osobliwych (SVD), a otrzymany wynik jest rozwiązaniem uśrednionym metodą najmniejszych kwadratów. W przypadku braku wyników dla pewnych stopni swobody (brak wymuszenia dla tych stopni) wiersze równania (11) mogą być rozdzielone i można rozpatrzeć brak dopasowania modeli tylko dla punktów wymuszenia. Jeżeli jednak nie zamierza się redukować liczby stopni swobody w modelu elementów skończonych, macierz wrażliwości po lewej stronie równania (8) wymaga określenia odpowiedzi dla wszystkich stopni.

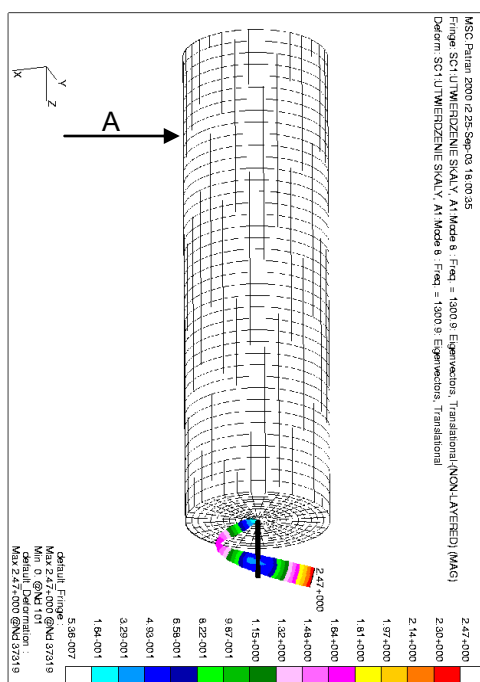
5.4. Utworzenie i analiza modeli elementów skończonych dla badanych przypadków nieciągłości wklejenia

Długość odcinków, na których żerdź (stalowy pręt) jest wklejona w górotworze określa warunki brzegowe. Różne przypadki nieciągłości wklejenia mogą być wtedy opisane przez zmianę warunków brzegowych w modelu analitycznym. Następnie po dostrojeniu, model elementów skończonych może stanowić odniesienie dla wyników badań eksperymentalnych nieznanych przypadków.

W badaniach własnych do budowy modeli elementów skończonych zastosowano oprogramowanie MSC/Patran. Program ten umożliwia tworzenie modeli elementów skończonych na podstawie zaawansowanych narzędzi programistycznych, służących do odwzorowania dowolnej geometrii obiektu. Budowę modelu rozpoczęto od wprowadzenia jego geometrii. Następnie model geometryczny podzielono na elementy dyskretne i przypisano im określone właściwości fizyczne takie, jak: gęstość materiału, moduł Younga, liczba Poissona, na podstawie których są tworzone macierze mas i sztywności. Podział modelu na grupy elementów skończonych daje możliwość przypisania określonych właściwości fizycznych do określonej grupy.

Może to być wykorzystane w kolejnym etapie, którym jest dostrajanie modeli: teoretycznego i eksperymentalnego. Do obliczeń dynamicznych modeli elementów skończonych zastosowano program MSC/Nastran.

Na rysunku 7 przedstawiono geometrię modelu elementów skończonych dla żerdzi kotwiowej wklejonej w górotwór. Górotwór został zamodelowany w postaci walca. W celu przybliżenia warunków rzeczywistych, węzły leżące na powierzchni walca zostały w modelu unieruchomione (położenie jednego z unieruchomionych węzłów zaznaczono literą A). Warstwę spoiwa na odcinkach, na których żerdź była mechanicznie związana z górotworem, zamodelowano w postaci wydrążonego walca o średnicy wewnętrznej równej średnicy żerdzi i średnicy zewnętrznej równej średnicy otworu w górotworze.

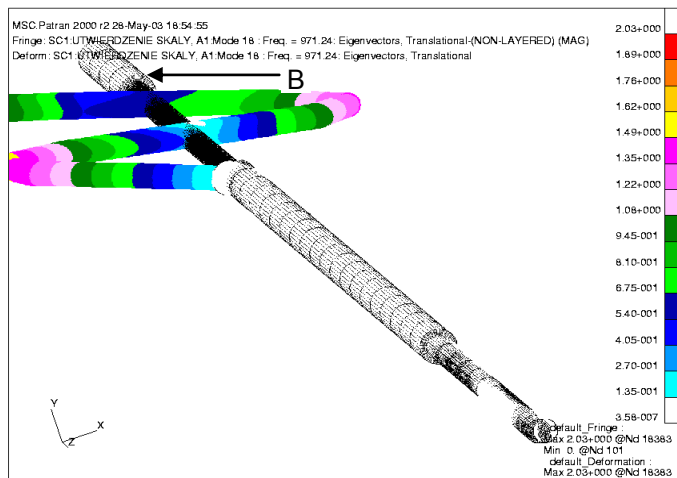


Rys. 7. Geometria modelu elementów skończonych dla żerdzi kotwiowej wklejonej w górotwór, model utworzony w programie Patran

Fig. 7. Geometry of a finite element model for a rockbolt grouted into the rock, a Patran model

Na rysunku 8 przedstawiono przykład modelowanej nieciągłości wklejenia. Widoczna jest warstwa spoiwa przylegająca do żerdzi (warstwa skały została graficznie zdjęta).

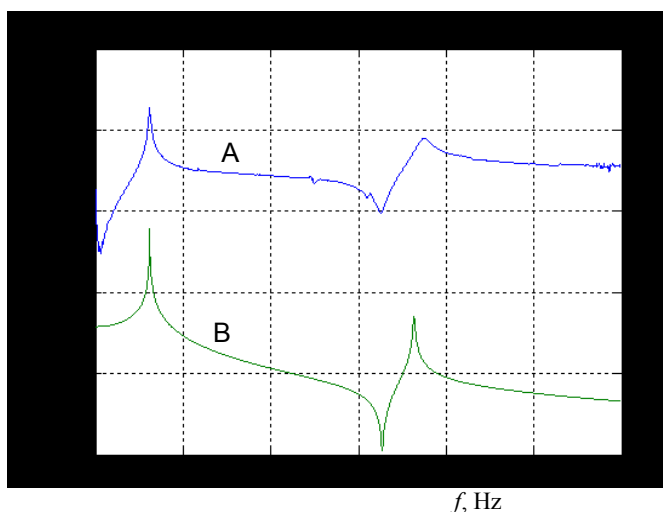
Modele elementów skończonych zostały utworzone dla różnych przypadków nieciągłości wklejenia, które praktycznie można było zrealizować w rzeczywistych warunkach stosowania obudowy. Po utworzeniu modeli analitycznych (MES) realizowano teoretyczną analizę modalną. W wyniku tej analizy, która obejmowała obliczenia częstotliwości drgań własnych oraz funkcji przejścia (dla wymuszenia w punkcie znajdującym się na wystającym z górotworu odcinku żerdzi), otrzymano dla każdego analizowanego przypadku zbiór częstotliwości drgań własnych charakterystycznych dla zamodelowanego rodzaju nieciągłości.



Rys. 8. Przykład nieciągłości wklejenia. Postać drgań charakterystyczna dla końcowego odcinka żerdzi jest również widoczna na odcinku wystającym z górotworu, co umożliwia pomiar. Koniec żerdzi nie jest mechanicznie związany ze skałą, której fragment jest widoczny na dalszym planie (oznaczony literą B)

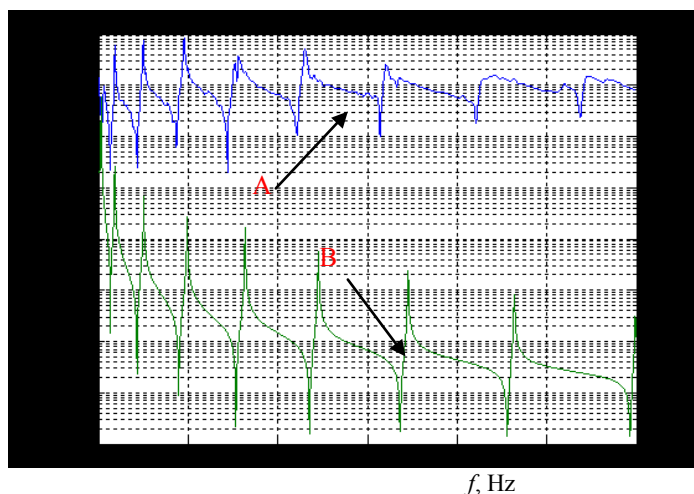
Fig. 8. An example of grouting. Mod which is characteristic of a hidden part of a rock bolt transfers to its outer part, what enables measurement. There is no resin layer between the end of the rock bolt and adjacent rock (indicated with letter B)

Na rysunkach 9 i 10 pokazano przykłady wyników procedury dopasowania modeli. Wyniki zastosowania kryterium FRAC dla rozpatrywanych przypadków oraz zestawienie częstotliwości drgań własnych, zidentyfikowanych dla obiektu rzeczywistego i analitycznego (MES), zamieszczono w tablicach 1 i 2.



Rys. 9. Wklejenie na połowie długości żerdzi, zaczynając od calizny stropu. Porównanie funkcji przejścia zmierzonej i obliczonej z wykorzystaniem MES: f – częstotliwość, I – inercja

Fig. 9. A rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the outer end. Comparison of FRF characteristics measured (experiment) and calculated (FE Model): f – frequency, I – inercia



Rys. 10. Wklejenie na połowie długości żerdzi, zaczynając od dna otworu. Porównanie funkcji przejścia zmierzonej i obliczonej z wykorzystaniem MES: f – częstotliwość, I – inercja

Fig. 10. A rock bolt grouted at $\frac{1}{2}$ of its length, starting from the hidden end. Comparison of FRF characteristics measured (experiment) and calculated (FE Model): f – frequency, I – inercance

Tabela 1. Porównanie zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych w przypadku wklejania typu 1100 (w połowie długości żerdzi, zaczynając od calizny stropu)

Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretyczne	eksperymentalne
98,9	–
277,1	–
307,9	306,9
544,3	585,2
903,2	924,4
1356,7	–
1815,1	1872,5
1909,1	–

Tablica 2. Porównanie zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych w przypadku wklejania typu 0011 (na połowie długości żerdzi zaczynając od dna otworu)

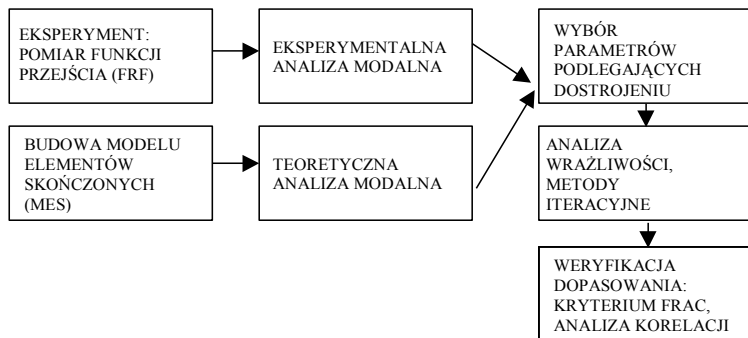
Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretycznie	eksperymentalnie
89,3	90,5
250,8	247,8
492,8	475,8
816,5	780,9
1225,3	1147,4
1725,6	1596,7
2317,3	2118,5
2992,3	2702,6

Poprawność dopasowania jest określana na podstawie porównania charakterystyk funkcji przejścia oraz wartości częstotliwości drgań własnych. W przypadku przedstawionym na rysunkach 5 i 9 są to częstotliwości odpowiednio 306,9 Hz i 1872,5 Hz, charakte-

rystyczne dla drgań odcinka przed wklejeniem oraz 585,2 Hz i 924,4 Hz (oznaczone w tablicy 1 czcionką pogrubioną), charakterystyczne dla drgań odcinka za wklejeniem.

Na rysunku 10 jest widoczne przesunięcie częstotliwości drgań własnych w górnym zakresie analizowanego pasma (odpowiadające sobie częstotliwości oznaczono literami A i B). Jednakże analiza współczynników korelacji dla poszczególnych przypadków wykazała dobre dopasowanie modeli eksperymentalnego i analitycznego. Oznacza to, że przesunięcie częstotliwości ma charakter systematyczny i nie ma znaczącego wpływu na jakość dopasowania. Niemniej, świadczy to o istnieniu charakterystyki częstotliwościowej (np. nieliniowości) powodującej to odchylenie.

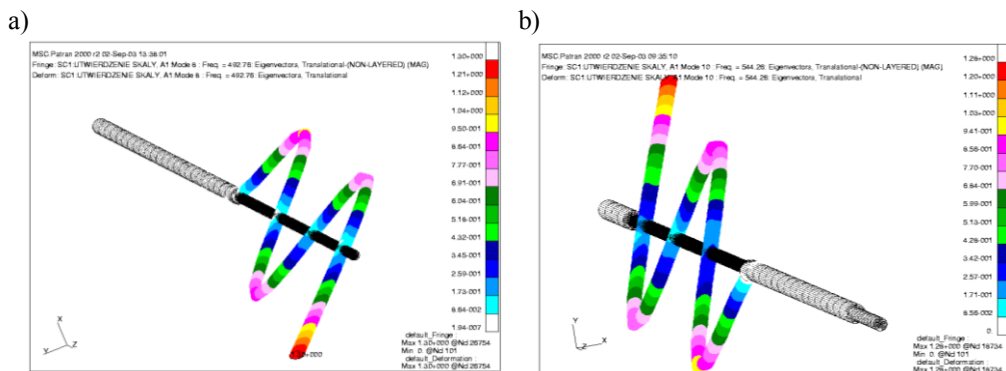
Proces dopasowania modeli eksperymentalnego i teoretycznego przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 11).



Rys. 11. Proces dopasowania i walidacji modeli eksperymentalnego i teoretycznego

Fig. 11. Process of adjustment and validation of experimental and theoretical modal models

Na rysunku 12 przedstawiono przykłady postaci drgań obliczonych z wykorzystaniem modelu MES dla przypadków wklejenia na odcinku $\frac{1}{2}$ długości żerdzi, analizowanych na rysunkach 5 i 6.



Rys. 12. Przykłady postaci drgań wyznaczonych teoretycznie dla dwóch przypadków wklejenia na odcinku $\frac{1}{2}$ długości żerdzi zaczynając od: a – calizny stropu, b – od dna otworu

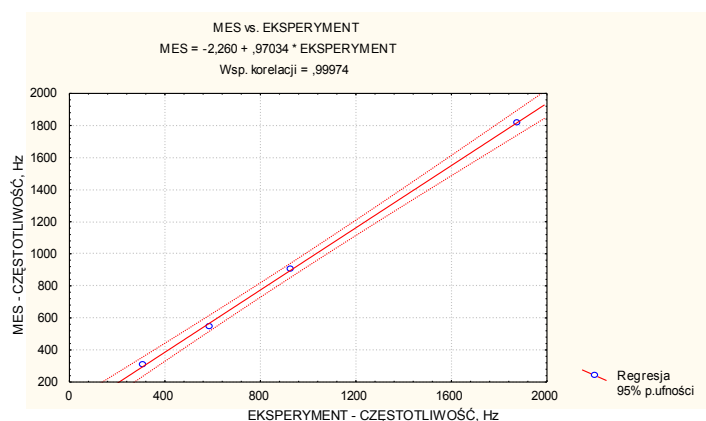
Fig. 12. Examples of mode shapes for two cases of grouting, at $\frac{1}{2}$ of the rock bolt length, starting from: a – an outer, b – a hidden end

Przedstawione w tablicach 1 i 2 częstotliwości drgań żerdzi kotwiowej identyfikują nieciągłość wklejenia. Podkreślić należy, że poszczególne zbiory częstotliwości są charakterystyczne dla poszczególnych przypadków nieciągłości wklejenia.

Potwierdzenie skuteczności dostrojenia poszczególnych analizowanych przypadków przeprowadzono na podstawie analizy współczynników korelacji między modelami analitycznym i eksperymentalnym oraz charakterystyk regresji liniowej.

5.5. Opracowanie statystyczne wyników badań, obliczenia współczynników korelacji oraz regresji liniowej

Jako wynik dopasowania modeli: analitycznego i eksperymentalnego obliczono współczynniki korelacji oraz charakterystyki regresji liniowej (dla poziomu ufności 95%) dla wyznaczonych eksperymentalnie oraz obliczonych na podstawie modelu elementów skończonych częstotliwości drgań własnych (Brandt 1974). Opracowanie statystyczne wyników było podsumowaniem badań. Przykład prowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Współczynnik korelacji oraz wykres regresji liniowej dla wklejenia w połowie długości, zaczynając od calizny stropu

Fig. 13. Correlation coefficient and regression curve for particular case. Vertical axe – FE Model and theoretical modal analysis, horizontal axe – experimental modal analysis

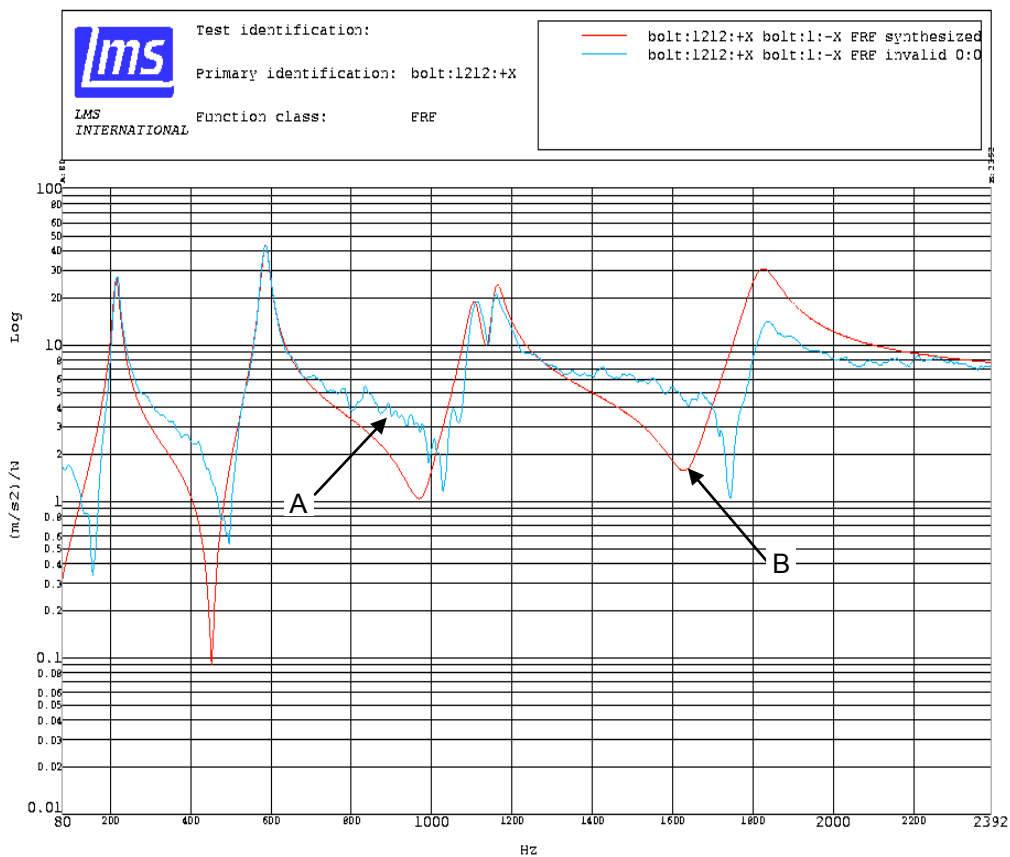
W tablicy 3 zestawiono częstotliwości drgań własnych dla trzech przypadków o takim samym typie wklejenia (jak w przypadku analizowanym na rys. 9) oraz dla porównania wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu elementów skończonych (model MES).

Tablica 3. Zestawienie częstotliwości drgań własnych dla trzech przypadków o takim samym typie wklejenia

Częstotliwości drgań własnych, Hz			
eksperyment			MES
291,9	306,9	311,4	307,9
599,2	585,2	626,6	544,3
886,3	924,4	937,6	903,2
1867,4	1872,5	1863,6	1815,1

5.6. Przesłanki do identyfikacji nieciągłości wklejenia dla nieznanego przypadku

Badania prowadzone na wklejanych, w sposób kontrolowany, żerdziach kotwionych w wyrobiskach chodnikowych dostarczyły cennych informacji dotyczących możliwości identyfikacji nieciągłości wklejenia oraz wpływu określonych rodzajów nieciągłości na zmiany ich parametrów modalnych. Po dostrojeniu modeli teoretycznego i eksperymentalnego, dla różnych przypadków nieciągłości wklejenia wykonano badania na żerdziach, stanowiących element samodzielnej obudowy kotwionej w typowym wyrobisku chodnikowym. Wyniki analizy dla wybranego przypadku przedstawiono na rysunku 14 oraz w tabelicy 4. Do identyfikacji nieciągłości wklejenia, wyznaczone eksperymentalnie częstotliwości drgań własnych posłużyły jako dane wejściowe do procesu wyszukiwania przypadku teoretycznego o określonych warunkach brzegowych (długości wklejenia), wykorzystując wcześniej utworzoną bazę danych.



Rys. 14. Charakterystyki funkcji przejścia otrzymane dla pomiarów w warunkach ruchowych (nieznana nieciągłość wklejenia), A – charakterystyka zmierzona, B – charakterystyka obliczona na podstawie zidentyfikowanych parametrów modalnych

Fig. 14. FRF characteristics for an unknown case of grouting measured in real mine conditions: A – measured FRF, B – synthesized FRF

Tabela 4. Zidentyfikowane częstotliwości drgań własnych dla nieznanego przypadku

Częstotliwości wyznaczone, Hz	
teoretycznie	eksperymentalnie
197,1	214,6
552,8	585,7
1082,8	1106,9
–	1159,2
1800,4	1817,7

Obserwowane na rysunku 14 rozdwojenie częstotliwości 1106,9 Hz i 1159,2 Hz wytłumaczyć można niepełną symetrią drgań poprzecznych w osiach x i y (przy przejściu osi z jako osi symetrii żerdzi kotwiowej).

Częstotliwościom drgań własnych, wyznaczonym eksperymentalnie, odpowiadają częstotliwości modelu analitycznego o wklejeniu na długości 180 cm, licząc od dna otworu (brak wklejenia 70 cm dla żerdzi o długości 2,5 m).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Duże zainteresowanie stosowaniem obudowy kotwiowej w przemyśle górnictwym wynika z jej parametrów ekonomicznych. Zabezpieczanie wyrobiska taką obudową wymaga krótszego czasu, zużycia mniejszej ilości materiałów, a także jest technicznie dogodniejsze od innych sposobów zabezpieczenia wyrobisk. W górotworze charakteryzującym się mocnym stropem, obudowa kotwiowa jest stosowana powszechnie. W polskim górnictwie węglowym, gdzie stateczność stropu jest mała, obudowa kotwiowa jest stosowana rzadziej, niemniej zainteresowanie jej stosowaniem wyraźnie wzrasta. Równocześnie obserwuje się brak nieniszczących metod badania poprawności zamocowania obudowy kotwiowej (żerdzi kotwiowych). Dotychczas opracowane metody nie dają dostatecznie pewnych wyników. Dlatego też podjęto pracę nad nieniszczącą metodą badania stopnia wklejenia żerdzi kotwiowych z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów przetwarzania sygnałów drganiowych.

W opracowanej metodzie wykorzystano: impulsowe wymuszenie drgań, analizy modalnej, tworzenie modeli teoretycznych badanych struktur mechanicznych wraz z ich weryfikacją eksperymentalną dla najczęściej spotykanych przypadków nieciągłości wklejenia żerdzi.

W badaniach laboratoryjnych wykazano związek przyczynowo-skutkowy między pobudzeniem kotwi do drgań poprzecznych, a odpowiedzią charakteryzującą badaną strukturę. Ze względu jednak na duże różnice w sposobie połączenia elementów układu: kotew–spoiwo–górotwór od warunków rzeczywistych, wyniki badań laboratoryjnych nie mogły stanowić bazy odniesienia. W tym celu podjęto prace nad modelem teoretycznym. Do opracowania takiego modelu zastosowano oprogramowanie Patran/Nastran, uwzględniając rzeczywistą geometrię badanych struktur mechanicznych, sposób ich połączenia oraz parametry materiałowe (wyznaczone również empirycznie).

Prawidłowość tego wyboru została potwierdzona wynikami analiz korelacyjnych modelu teoretycznego i przypadków kontrolowanego wklejenia żerdzi kotwiowych do górotworu (w KD Barbara GIG).

Do realizacji części eksperymentalnej opracowano zestaw aparaturowy oraz program, napisany w środowisku LabVIEW, umożliwiające rejestrację i akwizycję funkcji przejścia (ang. FRF) w warunkach ruchowych. Równocześnie do analizy modalnej CADA-X zastosowano fabryczne oprogramowanie.

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Parametry dynamiczne badanej struktury (żerdzi kotwicznej) są determinowane przez warunki brzegowe, które stanowią odcinki wklejenia żerdzi do górotworu.
2. Warunkiem koniecznym identyfikacji odcinków nieciągłości jest istnienie teoretycznego modelu badanej struktury uwzględniającego różne przypadki nieciągłości wklejenia (dla badań nieniszczących).
3. Wyniki analizy modalnej zrealizowanej na modelu teoretycznym, dostrojone do modelu eksperymentalnego, stanowią wzorzec odniesienia dla identyfikowanych nieznanych przypadków.
4. Wzorzec odniesienia może być stosowany dla różnych typów skał stropowych występujących w wyrobiskach korytarzowych.
5. Do określenia parametrów dynamicznych (modalnych) badanych obiektów bardziej odpowiednie jest wymuszanie drgań poprzecznych.
6. Masa przetwornika odbiorczego znacząco wpływa na parametry dynamiczne badanych obiektów, stąd jest istotna jego minimalizacja.
7. Zestaw pomiarowy (aparatura i oprogramowanie) został zweryfikowany w warunkach kopalnianych dla przypadków o nieznanym stopniu wklejenia kotwi do górotworu. Uzyskane wyniki są zbieżne z wielkościami opisywanymi przez modele wzorcowe, co jest potwierdzeniem praktycznej przydatności aparatury, metody przetwarzania sygnałów, jak i samych modeli wzorcowych.

Literatura

1. Bochniak W., Uhl T., Lisowski W. (1999): *Problemy dostrajania modeli elementów skończonych*. AGH, Kraków.
2. Bishop R.E.D., Gladwell G.M.L. (1963): *An investigation into the theory of resonance testing*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Vol. 225 A1055.
3. Brandt S. (1974): *Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych doświadczalnych*. Warszawa PWN.
4. Brown D.L., Allemang R.J., Zimmerman R., Mergeay M. (1979): *Parameter estimation techniques for modal analysis*. SAE Paper No. 790221.
5. Byron F.W., Fuller R.W. (1975): *Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej*. Warszawa, PWN.
6. Dobson B.J. (1987): *Modal analysis of using dynamic stiffness data*. Mechanical System and Signal Processing Vol. 1 No. 1, s. 29–40.
7. Dossing O. (1988): *Structural Testing, Part I: Mechanical mobility measurements*. Naerum, Bruel & Kjaer.
8. Dossing O. (1988): *Structural Testing, Part II: Modal analysis and Simulation*. Naerum, Bruel & Kjaer.
9. Ewins D.J., Gleeson P.T. (1982): *A method for modal identification of lightly damped structures*. Journal of Sound and Vibration Vol. 84 No. 1, s. 57–79.
10. Ewins, D.J. (2000): *Modal Testing. Theory Practice and Application*. Second Edition. Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England.

11. Ibrahim S.R., Mikulcik E.C. (1981): *A method for the direct identification of vibration parameters from the free response*. The Shock and Vibration Bulletin James G.H. Vol. 52 No. 3, s. 13.
12. Carne T.G., Laufer J.P. (1995): *The Natural Excitation Technique (NexT) for modal parameter extraction from operating structures*. Int. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis Vol. 10 No. 4, s. 260–277.
13. Juang J.N., Pappa R.S. (1985): *An eigensystem realisation algorithm for modal parameter identification and model reduction*. Journal of Guidance, Control and Dynamics Vol. 8 No. 5, s. 294–303.
14. Kennedy C.C., Pancu C.D.P. (1947): *Use of vectors in vibration measurements and analysis*. Journal of Aeronautical Sciences Vol. 14 No. 11.
15. Leuridan J., Vold H. (1983): *A time domain linear model estimation technique for multiple input modal analysis*. The Winter annual Meeting of the ASME, Boston, s. 51–62.
16. Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. (1997): *Theoretical and Experimental Modal Analysis*.
17. Pendered J.W. (1963): *Theoretical investigation into the effects of close natural frequencies in resonance testing*. Journal of Mechanical Engineering Science Vol. 7 No. 4, s. 372–379.
18. Remington P.J. (1997): *Experimental and theoretical studies of vibrating systems*. Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons Vol. 2.
19. Silva J.M.M., Maia N.M.M. (1999): *Modal Analysis and Testing*.
20. Uhl T., Lisowski W. (1999): *Eksploatacyjna analiza modalna i jej zastosowania*. Kraków, AGH.
21. Uhl T. (1997): *Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych*. Warszawa, WNT.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński