

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICtwo I ŚRODOWisko

MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK

4



G I G

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICtwo
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2009

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

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: *prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, prof. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, doc. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk, doc. dr hab. inż. Marian Tupek, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz, mgr Małgorzata Zielińska*

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redakcja wydawnicza i korekta

Ewa Gliwa

Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

Barbara Dusik

Skład i łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Nakład 100 egz.

Adres Redakcji:

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

tel. 032-259-24-03, 032-259-24-04

fax 032-259-27-74

e-mail: cintexmk@gig.katowice.pl

Spis treści

ZDZIŚLAW DYDUCH

Szacowanie laminarnej szybkości spalania mieszanin pył-powietrze na podstawie pomiarów ciśnienia w komorze sferycznej 5
An assessment of laminar burning speed of dust/air mixtures based on pressure measurement in a spherical chamber

KRYSTIAN KADLEWICZ

Badania stężeń włókien azbestu w powietrzu na stanowiskach pracy i w środowisku 19
Testing of the asbestos fibres concentration in the atmosphere at workstations and in the environment

JOANNA KURZEJA, JERZY KORNOWSKI

Estymacja energii sejsmoakustycznej i współczynnika jej absorpcji w pokładzie przed frontem skrawanej ściany 41
Estimation of the seismo-acoustic energy and the coefficient of its absorption in the seam ahead of the front of extracted longwall

MAGDALENA MITERSKA

Analiza narażenia pracowników górnictwa na trwałe uszkodzenia słuchu 55
Analysis of the exposition of mining workers to permanent damage of hearing

HENRYK PASSIA

Analiza możliwości pomiaru koncentracji cząstek niesferycznych w powietrzu z zastosowaniem układu dopplerowskiego anemometru laserowego 65
An analysis of possibilities for measuring concentration of non-spherical particles in air using the structure of laser Doppler anemometer

WITALIJ SKOROPACKI, STANISŁAW TRZCIONKA

Opis matematyczny wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na iskrobezpieczeństwo obciążenia 71
Mathematical description of the effect of internal inductance of the supply source on the intrinsic safety of the load

ADAM SMOLIŃSKI, JERZY ŚWIĄDROWSKI, NATALIA HOWANIEC

Niekonwencjonalne metody zagospodarowania dwutlenku węgla 85
Unconventional methods of carbon dioxide management

Zdzisław Dyduch*

SZACOWANIE LAMINARNEJ SZYBKOŚCI SPALANIA MIESZANIN PYŁ-POWIETRZE NA PODSTAWIE POMIARÓW CIŚNIENIA W KOMORZE SFERYCZNEJ

Streszczenie

W artykule opisano trudności związane z implementacją procedury dopasowania parametrów modelu Dahoe do wyników doświadczalnych uzyskiwanych w standardowej komorze 20-l. Przedstawiono trzy metody przewyciężenia tych trudności. Zastosowanie tych metod poprawia jakość dopasowania parametrów modelu Dahoe do wyników pomiarów ciśnienia wybuchu w komorze 20-l i w konsekwencji istotnie zmniejsza niepewność wyznaczania laminarnej szybkości spalania.

An assessment of laminar burning speed of dust/air mixtures based on pressure measurement in a spherical chamber

Abstract

In the paper difficulties bounded with implementation of fitting procedure of the Dahoe model parameters to experimental results obtained in the standard 20-l spherical chamber were discussed. Three methods of overcoming the difficulties were presented. Application of the methods improves the fit quality of parameters of Dahoe model to pressure histories measured in the 20-l sphere and in consequence significantly reduce uncertainty of assessment of the laminar burning speed.

WPROWADZENIE

Wybuchy pyłu od dawna są poważnym zagrożeniem w wielu gałęziach przemysłu. Jakkolwiek całkowite wyeliminowanie tego zagrożenia nie jest możliwe, to jednak zostały opracowane metody zapobiegania wybuchom, a także ograniczania ich skutków.

Właściwy dobór sposobu zwalczania wybuchu wymaga pewnych informacji o przebiegu tego zjawiska w konkretnej instalacji przemysłowej. Do tej pory podstawowym sposobem uzyskiwania takich informacji były badania. Choć znaczenie badań jest bezsporne, to mają one pewne ograniczenia. Należą do nich duży koszt ich wykonywania i ograniczenie stosowalności wyników do ściśle określonych warunków, narzuconych przez parametry urządzenia badawczego. Ważnym uzupełnieniem badań doświadczalnych stają się coraz częściej symulacje numeryczne zjawiska wybuchu mieszaniny pył-powietrze i gaz-powietrze.

Jedną z podstawowych trudności w modelowaniu zjawiska spalania deflagacyjnego mieszaniny pył-powietrze jest właściwy opis przebiegu wydzielania się energii cieplnej w przemianie chemicznej mieszaniny palnej w produkty spalania. W tym celu

* Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”.

najczęściej stosuje się modele bazujące na uproszczonym opisie propagacji frontu płomienia, z uwzględnieniem pewnej grupy zjawisk mających wpływ na szybkość spalania. Tak w przypadku modeli dla mieszanin gazowych, jak i pyłowych, właściwości materiału palnego uwzględnia się przez wprowadzenie pojęcia laminarnej szybkości spalania mieszaniny palnej. Jej wartość zależy od własności paliwa (pyłu lub gazu), nie zależy natomiast od warunków panujących w obszarze wybuchu. W ten sposób próbuje się oddzielić wpływ własności materiału palnego od pozostałych czynników decydujących o szybkości wydzielania się energii w reakcji spalania. Znajomość laminarnej szybkości spalania, a dokładniej – zależności laminarnej szybkości spalania od koncentracji pyłu, ma zatem podstawowe znaczenie w symulacjach numerycznych wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych. Bez przesady można stwierdzić, że dostępność stosunkowo prostej metody wyznaczania wspomnianej zależności pozwoliłaby na znaczne przyspieszenie rozwoju symulacji numerycznych tego typu.

Pomiar laminarnej szybkości spalania jest zadaniem szczególnie trudnym w przypadku mieszanin pył-powietrze. Z uwagi na to duże nadzieje wiąże się z metodą oznaczania tego parametru zaproponowaną przez Dahoe (2000). Metoda ta polega na wykorzystaniu pomiarów zmian ciśnienia w czasie wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej w zamkniętej, sferycznej objętości oraz na wykorzystaniu modelu wybuchu bazującego na zasadach zachowania w ujęciu całkowym. Dopasowanie parametrów modelu do zmierzonych zmian ciśnienia pozwala na wyznaczenie laminarnej szybkości spalania w mieszaninie pyłowo-powietrznej. Zaletą metody Dahoe jest łatwość uzyskania przebiegów zmian ciśnienia w czasie wybuchu. Można w tym celu wykorzystać standardową komorę sferyczną o objętości 20 dm³. Pewne trudności stwarza natomiast wyznaczanie laminarnej szybkości spalania za pomocą modelu wybuchu. Procedura dopasowania parametrów modelu do wyników doświadczalnych naraża na pewne problemy tak natury numerycznej, jak i interpretacyjnej.

1. LAMINARNA SZYBKOŚĆ SPALANIA

Stosowanie pojęcia laminarnej szybkości spalania w odniesieniu do mieszanin pyłowo-powietrznych budzi pewne kontrowersje. W przypadku mieszanin gazowych laminarna szybkość spalania jest fizyczną właściwością mieszaniny, podobną na przykład do lepkości płynu. Podobnie jak lepkość, laminarna szybkość spalania mieszaniny gazów palnych zależy od składu chemicznego mieszaniny, struktury molekularnej składników, temperatury i ciśnienia. Dodatkowo, szybkość spalania zależy od lokalnych gradientów prędkości, analogicznie jak w przypadku lepkości cieczy newtonowskich.

Kontrowersje związane z laminarną szybkością spalania mieszanin pyłowo-powietrznych wynikają z trudności z fizyczną interpretacją tej wielkości. Laminarna szybkość spalania jest definiowana jako szybkość przemieszczania się frontu płomienia w kierunku normalnym do jego powierzchni, w stronę niespalonej mieszaniny. Zatem, aby można było mówić o laminarnej szybkości spalania, konieczne jest istnienie ciągłej powierzchni frontu płomienia. Tymczasem, choć w makroskali wybuch mieszaniny pyłowo-powietrznej wydaje się przebiegać w jednorodnej mieszaninie paliwa z utleniaczem, w rzeczywistości ma się do czynienia z pewną liczbą ziaren

paliwa zanurzonych w ośrodku ciągłym utleniacza. Można wprawdzie argumentować, że w przypadku mieszanin gazowych też ma się do czynienia z rozmieszczonymi w przestrzeni dyskretnymi cząstkami – molekułami. W tym jednak przypadku molekuły paliwa i utleniacza są oddalone od siebie zaledwie o kilka rozmiarów samych molekuł. Są to odległości znacznie mniejsze od ich średniej drogi swobodnej i dlatego fizyczne właściwości mieszaniny, które określają wielkość laminarnej szybkości spalania, takie jak przewodnictwo cieplne czy entalpia tworzenia, można rozpatrywać jako wartości lokalnie uśrednione po objętości. W przypadku ziaren paliwa o gęstości rzędu 1000 kg/m^3 i średnicy $15 \mu\text{m}$ odległości między nimi w mieszaninie o koncentracji 500 g/m^3 wynoszą około $150 \mu\text{m}$.

Pomimo, że mechanizm propagacji płomienia w mieszaninie pyłowo-powietrznej nie jest jeszcze dokładnie poznany, istnieje w zasadzie zgoda, że zasadniczą rolę odgrywa spalanie w fazie gazowej: produktów odgazowania i pirolizy bądź odparowanego materiału ziarna. Zależnie od relacji między szybkością spalania i szybkością wydzielania produktów lotnych, spalanie to może zachodzić w atmosferze otaczającej ziarno lub bezpośrednio na jego powierzchni. Jeżeli spalanie odbywa się bezpośrednio w pobliżu powierzchni ziaren, obszar spalania składa się z pewnej liczby oddzielnie palących się stref nietworzących jednego ciągłego frontu płomienia. W takim przypadku trudno jest mówić o laminarnej szybkości spalania w zdefiniowanym wyżej sensie. Równocześnie jednak, w przypadku wielu mieszanin pyłowo-powietrznych uzyskiwano w praktyce spalanie z dobrze określonym ciągłym frontem płomienia.

Pomimo opisanych wyżej zastrzeżeń dotychczas wykonano wiele badań, podczas których mierzono laminarną szybkość spalania mieszanin pyłowo-powietrznych. W niektórych przypadkach sens fizyczny wyznaczanych wielkości był wątpliwy, ich znajomość ułatwiała parametryzację szybkości reakcji, a więc i szybkości wydzielania się energii, wpływającej w decydujący sposób na przebieg wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej. W procesie modelowania takich wybuchów laminarna szybkość spalania odzwierciedla wpływ własności materiału na przebieg reakcji. Jej znajomość ma zatem podstawowe znaczenie w symulacjach numerycznych wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych.

Pomiar laminarnej szybkości spalania mieszanin pyłowo-powietrznych wiąże się z dość poważnymi trudnościami wynikającymi głównie z uzyskiwania jednorodnych obłoków pyłu w nieruchomym ośrodku gazowym lub ośrodku z przepływem laminarnym. Naturalnym sposobem występowania pyłu jest tworzenie warstw i nagromadzeń pyłu osiadłego. Utworzenie jednorodnego obłoku wymaga czynnika powodującego uniesienie pyłu, na przykład podmuchu powietrza. Czynniki takie zaburzają jednak stan fazy gazowej, wprowadzając niepożądaną turbulencję.

Istnieje kilka tradycyjnych metod pomiaru laminarnej szybkości spalania mieszanin pyłowo-powietrznych. Z uwagi na wspomniane wyżej trudności, wszystkie te metody wymagają użycia dość złożonych specjalistycznych urządzeń i/lub aparatury pomiarowej. Z tego powodu są one wykorzystywane w nielicznych laboratoriach specjalistycznych.

Użyteczność symulacji numerycznych wybuchów pyłów jest ściśle związana z ich dostępnością. Aby tego typu badania odgrywały znaczącą rolę, potrzeba łatwego

dostępu do niezbędnych danych wejściowych modeli wybuchu, w szczególności laminarnej szybkości spalania mieszanin pyłowo-powietrznych. Specyficzne własności pyłów palnych, odróżniające je od gazów palnych, wymagają znajomości tego parametru praktycznie dla każdej mieszaniny, której właściwości wybuchowe mają być ocenione. Z tego powodu tak ważne są metody pozwalające na oszacowanie wartości laminarnej szybkości spalania z wykorzystaniem powszechnie dostępnych urządzeń badawczych. Do takich metod należą metody, których podstawę stanowią pomiary dokonywane podczas wybuchów doświadczalnych w zamkniętych komorach.

2. MODEL DAHOE

Model Dahoe jest klasycznym przykładem modeli bazujących na zasadach zachowania w ujęciu całkowym. Szczegółowy opis założeń modelu i sposób wyrowadzenia równań opisujących zmiany ciśnienia wybuchu można znaleźć w wielu publikacjach (np. Dahoe, Goey 2003; Dyduch, Majcher 2007). Podstawowe równanie modelu, opisujące szybkość zmian ciśnienia wybuchu, ma następującą postać

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_e - P_0}{V} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} 4\pi S_u \frac{r_{\text{front}}^3 - r_{\text{rear}}^3}{3\delta} \quad (1)$$

gdzie:

- P_0 – ciśnienie początkowe,
- P_e – ciśnienie maksymalne,
- V – objętość przestrzeni sferycznej,
- δ – grubość płomienia,
- r_{front} i r_{rear} – granice obszaru spalania,
- S_u – szybkość spalania.

Równanie (1) uzupełniają zależności pozwalające na wyznaczenie położenia granic strefy spalania. W początkowej fazie wybuchu, kiedy promień frontu płomienia jest oddalony od punktu zapłonu o odległość mniejszą niż grubość płomienia ($r_{\text{front}} < \delta$)

$$r_{\text{front}} = \left(\frac{3\delta V}{\pi} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \right] \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

W późniejszej fazie wybuchu, kiedy $r_{\text{front}} \geq \delta$, granice te oblicza się z zależności

$$-\frac{\pi}{3\delta} \left[r_{\text{front}}^4 - (r_{\text{front}} - \delta)^4 \right] + V = V \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \quad (3)$$

$$r_{\text{rear}} = r_{\text{front}} - \delta$$

aż do momentu, kiedy front płomienia dociera do ścianek komory. Od tej chwili

$$r_{\text{front}} = R$$

$$\frac{\pi}{\delta} (R^4 - r_{\text{rear}}^4) + \frac{4\pi}{3\delta} (r_{\text{rear}}^4 - R^3 r_{\text{rear}}) = V \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \quad (4)$$

Warunki panujące w komorze doświadczalnej podczas przeprowadzania wybuchu powodują, że szybkość spalania S_u modelu nie jest oczywiście poszukiwaną laminarną szybkością spalania. Szybkość spalania mieszaniny zmienia się z temperaturą, ciśnieniem, a także stopniem turbulencji. Podobny rodzaj zależności wykazuje kolejny parametr modelu: grubość płomienia δ . Istnieje co najmniej kilka sposobów wyboru zależności parametrów modelu od wymienionych czynników (np. Dyduch, Majcher 2007). Dotychczas najbardziej obiecujące wyniki uzyskuje się, stosując zależności zaproponowane przez Dahoe. Zależności od temperatury i ciśnienia mają postać (Dahoe 2003):

$$S_u = S_{u0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{c + \frac{\lambda-1}{\gamma} + \alpha}$$

$$\delta_L = \delta_{L0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{c-\alpha} \quad (5)$$

Wartości parametrów c i α należy wyznaczać empirycznie, na przykład przez dopasowanie do wyników doświadczalnych.

Posługując się metodami analizy wymiarowej Dahoe (2000) wyprowadził też zależność wiążącą laminarną i turbulentną szybkość spalania, a także podobną zależność dla grubości laminarnego δ_L i turbulentnego δ_T płomienia:

$$\frac{S_u}{S_L} = 1 + \text{Da}^{a'} \left(\frac{u'_{rms}}{S_L} \right)^{b'}$$

$$\frac{\delta_T}{\delta_L} = 1 + \text{Da}^{a''} \left(\frac{l_l}{\delta_L} \right)^{b''} \quad (6)$$

W równaniach (6) u'_{rms} jest średniokwadratową prędkością pulsacyjną, l_l – całkowitą skalą długości, a Da – liczbą Damköhlera zdefiniowaną jako

$$\text{Da} = \frac{l_l}{\frac{u'_{rms}}{\delta_L} S_L} \quad (7)$$

Wielkości u'_{rms} i l_l w równaniach (6) i (7) można obliczyć, posługując się wzorami empirycznymi wyznaczonymi przez Dahoe (2000) dla komory sferycznej 20-l:

$$\frac{u'_{rms}}{u'^0_{rms}} = \left(\frac{t}{t_0}\right)^n$$

$$\ln\left(\frac{l_t}{l_t^0}\right) = a_1 \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) + a_2 \left[\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)\right]^2 \quad (8)$$

gdzie u'^0_{rms} , t_0 , l_t^0 , a_1 i a_2 są stałymi, których wartości zostały wyznaczone eksperymentalnie.

3. METODA DOPASOWANIA PARAMETRÓW MODELU

Parametry modelu Dahoe można wyznaczyć na podstawie dopasowania przebiegu zmian ciśnienia opisanych zależnością (1) do przebiegów doświadczalnych z wykorzystaniem równań dodatkowych (2)–(8). Dopasowanie to jest procedurą złożoną, ponieważ w wyniku dopasowania należy łącznie wyznaczyć osiem parametrów. Dodatkowo, pomiary prowadzone podczas wybuchów doświadczalnych w komorze 20 pozwalają na uzyskanie zmian ciśnienia w funkcji czasu, podczas kiedy podstawowe równanie modelu (1) opisuje zmiany szybkości narastania ciśnienia. Wyznaczenie laminarnej szybkości spalania polega zatem na dopasowaniu ośmiu parametrów funkcji danej równaniem różniczkowym zwyczajnym pierwszego stopnia, przy czym zależność od parametrów jest silnie nieliniowa. Z tego powodu konieczne jest bardzo precyzyjne zaprojektowanie procedury dopasowania tak, aby uzyskać możliwie dobrą zbieżność i oszacowanie parametrów modelu, zwłaszcza laminarną prędkość spalania S_L , obarczone akceptowalnymi niepewnościami pomiaru.

3.1. Położenie granic płomienia

W momencie, kiedy wybuch jest już rozwinięty położenie granic płomienia oblicza się z równań (3), a następnie (4). Dość złożona postać tych równań powoduje, że ich rozwiązanie zwykle znajduje się numerycznie. W równaniu (1) położenie granic płomienia jest zawarte jednak w wyrażeniu o postaci $r_{\text{front}}^3 - r_{\text{rear}}^3$. Wyrażenie takie jest typowym miejscem generowania dużych błędów numerycznych. W przypadku płomieni o niewielkiej grubości $r_{\text{front}}^3 \approx r_{\text{rear}}^3$ różnica takich wielkości pomnożona następnie przez wyrażenie o dużej wartości powoduje bardzo dużą niepewność obliczenia wartości końcowej. Aby tego uniknąć, warto zadbać o większą dokładność obliczania granic płomienia.

Dahoe i Skjold (2008) podali analityczne rozwiązanie pierwszego z równań (3):

$$\begin{aligned}
 r_{\text{front}} &= \frac{1}{2} \delta + \frac{3^{\frac{1}{3}} A_1}{6} - \frac{\left(\frac{1}{3^3} \delta \right)^2}{6 A_1} \\
 A_1 &= \left[9A + \sqrt{3(27A^2 + \delta^6)} \right]^{\frac{1}{3}} \\
 A &= 4R^3 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

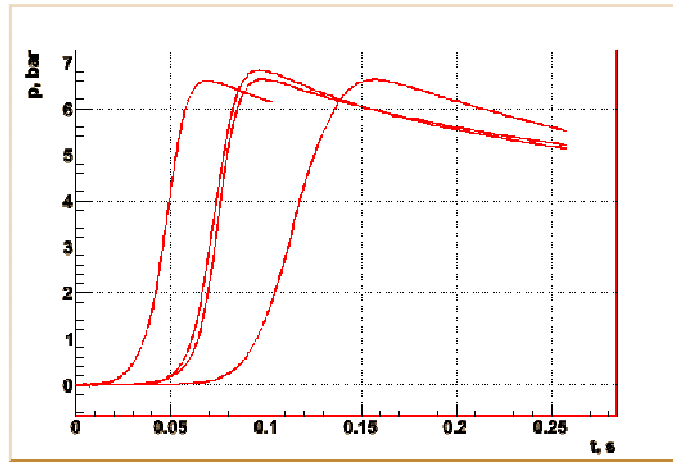
Wśród rozwiązań drugiego z równań (4) poszukiwany sens fizyczny ma postać:

$$\begin{aligned}
 r_{\text{rear}} &= \frac{1}{2} \sqrt{3} A^{\frac{1}{6}} \left[\sqrt{Z} - \frac{\sqrt{24R^3 \sqrt{3A} - Z^{\frac{3}{2}}}}{Z^{\frac{1}{4}}} \right] \\
 Z &= 2A^{\frac{2}{6}} + 4B \\
 A &= 8 \left(\frac{\sqrt{27R^{12} - B^3}}{3\sqrt{3}} + R^6 \right) \\
 B &= R^3 \left[3R - 4\delta \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{P_e - P}{P_e - P_0} \right]
 \end{aligned} \tag{10}$$

Rozwiązania analityczne (9) i (10) poprawiają dokładność obliczeń, a także umożliwiają poprawienie stabilności obliczeń w końcowej fazie wybuchu, kiedy front płomienia dociera do ścianek komory badawczej.

3.2. Czas indukcji wybuchu

Wyniki pomiarów zmian ciśnienia wybuchu w mieszaninie lycopodium-powietrze podczas czterech wybuchów przeprowadzonych w takich samych warunkach przedstawiono na rysunku 1. Pomimo to wyraźnie widać różnice między poszczególnymi wykresami ciśnienia. Znaczne przesunięcia przebiegów na osi czasu wskazują, że zapoczątkowanie poszczególnych wybuchów następowało w niektórych przypadkach po upływie znaczącego czasu, sięgającego nawet 60 ms. Takie zachowanie nie zostało przewidziane w modelu Dahoe, w którym przyjęto założenie, że wybuch rozpoczyna się natychmiast po zadziałaniu źródła zapłonu. Trudno też uwzględnić w modelu zjawisko powodujące opóźnienie zapłonu, ponieważ jego natura nie jest oczywista. Najprawdopodobniej na opóźnienie wpływa kilka zjawisk.



Rys. 1. Porównanie kilku przebiegów ciśnienia wybuchu pyłu lycopodium w tych samych warunkach:
 C_n – koncentracja nominalna 875 g/m³

Fig. 1. Comparison of several pressure histories of the lycopodium dust explosion obtained in the same conditions:
 C_n – nominal concentration i.e. 875 g/m³

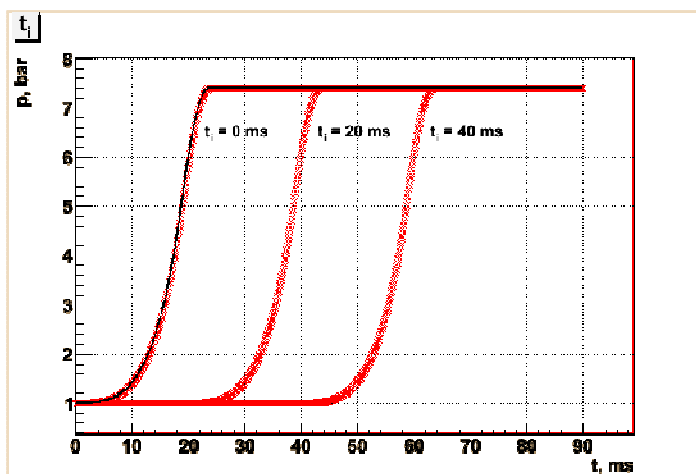
Pamiętając o zasadniczym celu obliczeń łatwiej jest wprowadzić dodatkowy parametr korygujący, odgrywający rolę czasu opóźnienia wybuchu t_i . Wprowadzenie czasu opóźnienia wybuchu wymaga modyfikacji podstawowego równania modelu (1), które przybiera teraz postać

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_e - P_0}{V} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} 4\pi S_u \frac{r_{\text{front}}^3 - r_{\text{rear}}^3}{3\delta} \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{t - t_i}{\sigma} \right) \right] \quad (11)$$

Oprócz czasu opóźnienia zapłonu do równania (11) wprowadzono jeszcze jeden parametr σ , którego wartość należy odpowiednio dobrać. Wartość ta powinna być rzędu wartości rozdzielczości czasowej wyników pomiaru ciśnienia.

Wyniki całkowania równania (11) dla różnych wartości czasu opóźnienia zapłonu t_i przedstawiono na rysunku 2. Widać wyraźnie, że jedynym efektem modyfikacji równania (1) jest przesunięcie wykresu ciśnienia wzdłuż osi czasu. Wielkość tego przesunięcia określa wartość czasu opóźnienia zapłonu. Na rysunku zaznaczono także rozwiązanie oryginalnego równania (1). Rozwiązanie to pokrywa się z rozwiązaniem równania (11), kiedy $t_i = 0$ ms.

Ważne jest, aby wprowadzonej modyfikacji modelu Dahoe nie traktować jako rozszerzenia modelu przez uwzględnienie dodatkowych zjawisk wpływających w tym wypadku na efekt opóźnienia zapłonu. Jest to raczej oddzielenie z wyników doświadczalnych tej części zjawisk, których w modelu nie uwzględniono tak, aby poprawić jakość dopasowania parametrów modelu.



Rys. 2. Rozwiązanie równania (11) dla różnych wartości czasu opóźnienia zapłonu; linia ciągła – rozwiązanie oryginalnego równania (1)

Fig. 2. Solution of equation (11) for different values of ignition delay time; solid line – the solution of original equation (1)

3.3. Różniczkowanie czy całkowanie numeryczne?

Model Dahoe, wraz z zależnościami uzupełniającymi, umożliwia wyznaczenie nieznanymi parametrów, w szczególności wyznaczenie laminarnej szybkości spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej i grubości płomienia wybuchu. Problem polega na znalezieniu najlepszej zgodności, w sensie χ^2 , funkcji opisującej zmiany ciśnienia w czasie z przebiegami doświadczalnymi, przy czym funkcja ta jest dana równaniem różniczkowym zwyczajnym pierwszego rzędu (11). Istnieją co najmniej dwa sposoby rozwiązania takiego problemu. Pierwszy polega na scałkowaniu równania (11), a następnie dopasowaniu parametrów otrzymanej funkcji. Zastosowanie tej metody napotyka jednak na pewne trudności. Zależność funkcji od parametrów jest nieliniowa, a to oznacza, że procedura dopasowania jest procedurą iteracyjną. W każdym kroku iteracji należy całkować numerycznie równanie (11), co pogarsza zbieżność procedury i powiększa niepewność wyznaczenia parametrów, a nawet może prowadzić do niezyskania zbieżności.

Zamiast całkować równanie (11) można zróżniczkować wyniki pomiarów i bezpośrednio przeprowadzić dopasowanie funkcji danej tym równaniem do tak przygotowanych danych. Różniczkowanie przeprowadza się tylko raz, na początku obliczeń. W stosunku do wcześniej opisanej, metoda ta ma pewne zalety, pod warunkiem, że proces obliczania pochodnej wyników doświadczalnych nie wprowadza znacznej niepewności. Podstawowe znaczenie ma zatem jakość metody aproksymacji pochodnej zmian ciśnienia w funkcji czasu otrzymanych w wyniku pomiarów.

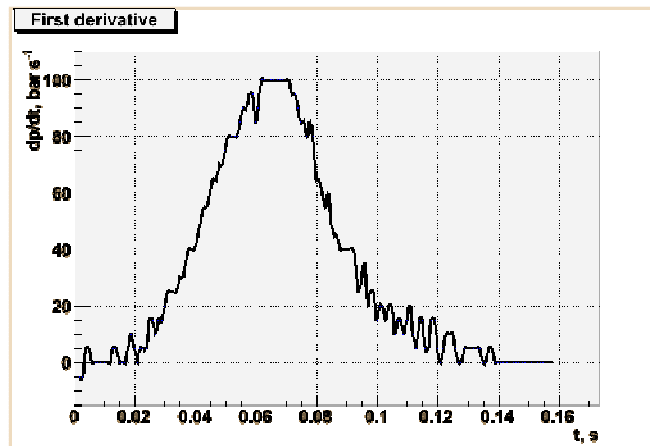
3.4. Estymacja pochodnej

Zagadnienie estymacji pochodnej można sformułować następująco: Dany jest zbiór punktów doświadczalnych (p_i, t_i) , z których każdy jest obarczony określoną niepewnością pomiarową. Należy znaleźć dobrą aproksymację p^a funkcji $p(t)$. Jeżeli funkcja p^a będzie dobrze odtwarzać funkcję p , to pochodna $p^{a'}$ powinna także być bliska p' . Generalnie, metody realizacji tego zadania można podzielić na lokalne i globalne (Ahnert, Abel 2007). W metodach lokalnych do aproksymacji wykorzystuje się tylko podzbiór dostępnych punktów, znajdujących się w pobliżu punktu, w którym przeprowadza się aproksymację. W metodach globalnych są wykorzystywane informacje „niesione” przez wszystkie punkty. Metody lokalne są często stosowane z powodu ich prostoty i łatwości implementacji. Nie dorównują jednak metodom globalnym w przypadku, kiedy jest wymagana duża dokładność estymacji.

Prostym przykładem metody lokalnej może być obliczanie pochodnej za pomocą centralnego ilorazu różnicowego

$$\frac{dP}{dt}(t_i) = \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (12)$$

Wynik zastosowania tej metody do pomiarów zmiany ciśnienia wybuchu pyłu lycopodium przedstawiono na rysunku 4. Widać na nim wyraźnie rozrzut wartości dP/dt wynikający ze skończonej dokładności pomiarów ciśnienia. Używając takiej aproksymacji w procedurze dopasowywania zależności (11) do wyników pomiaru ciśnienia wybuchu należy liczyć się ze znaczną niepewnością obliczeń.



Rys. 3. Szybkość zmian ciśnienia wybuchu obliczona za pomocą ilorazu różnicowego (12)

Fig. 3. Rate of explosion pressure rise calculated by means of the difference quotient (12)

W metodach globalnych konstruuje się estymator szukanej zależności funkcyjnej, wykorzystując informacje „niesione” przez wszystkie punkty doświadczalne w wybranym przedziale czasu (t_i, t_f) . Kształt zależności $P(t)$ nie jest znany i dlatego dopasowywana funkcja powinna zapewnić możliwość uzyskania dobrej zgodności

z zależnościami różnych kształtów. Warunek ten dobrze spełnia i często jest wykorzystywana w takiej roli kombinacja liniowa ortogonalnych bazowych funkcji skleja-nych B-spline

$$f(t) = \sum_{j=0}^{n+2} \gamma_j B_j(t) \quad (13)$$

W zależności (13) γ_j oznaczają współczynniki sześciennych funkcji bazowych B-spline $B_j(t)$ wyznaczane w procesie estymacji. Z uwagi na omawiane zastosowanie funkcja $f(t)$ ma bardzo korzystne własności. Przede wszystkim $f \in C^2$, co oznacza, że jej druga pochodna jest funkcją ciągłą. Dodatkowo zarówno pierwsza, jak i druga pochodna f są określone zależnościami analitycznymi.

Sama funkcja $f(t)$ nie spełnia jednak warunku optymalnej gładkości. Warunek ten można sformułować następująco

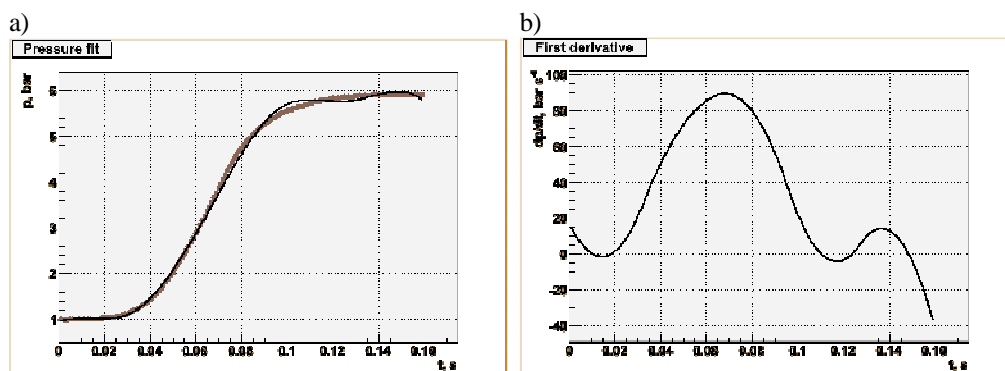
$$s(f) = \int_{t_j}^{t_f} \|f''(t)\|^2 dt \quad (14)$$

Maksymalizacja gładkości funkcji prowadzi do minimalizacji jej krzywizny. W rezultacie estymację funkcji opisującej zmiany ciśnienia wybuchu w czasie można przeprowadzić zwykle stosowaną metodą najmniejszych kwadratów, uzupełnioną więzami wymuszającymi odpowiednią gładkość rozwiązania

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[P_i - f(t_i)]^2}{\sigma^2(P_i)} + \lambda \int_{t_i}^{t_f} [f''(t)]^2 dt \quad (15)$$

Stopień gładkości rozwiązania jest zależny od parametru λ . W ogólnym przypadku, odpowiedni dobór wartości tego parametru jest problemem nietrywialnym (Gu, Wahba 1991), jednak w rozpatrywanym przypadku wystarczająco dobre rezultaty daje zwykła obserwacja jakości dopasowania. Wyniki zastosowania opisanej metody przedstawiono na rysunkach 4–6. Każdy z rysunków zawiera dwa wykresy. Wykres części a) rysunku przedstawia wynik dopasowania funkcji $f(t)$ danej zależnością (13) do zmierzonych zmian ciśnienia wybuchu. Wykres części b) rysunku jest szukaną pochodną dopasowanej funkcji względem czasu.

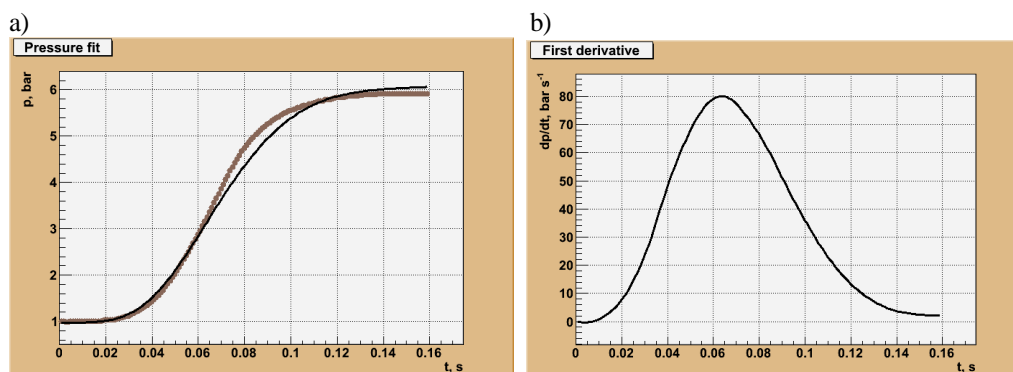
Wynik dopasowania bez dodatkowych więzów [bez drugiego składnika w zależności (15)] przedstawiono na rysunku 4. Jakość dopasowania jest daleka od zadowalającej, zwłaszcza w obszarze większych ciśnień, gdzie występują нефизyczne oscylacje funkcji dopasowywanej. Jeszcze wyraźniej jest to widoczne na wykresie pochodnej. Przykład ten uzasadnia konieczność zastosowania więzów wymuszających odpowiednią gładkość dopasowywanej funkcji.



Rys. 4. Ciśnienie (a) i szybkość zmian ciśnienia (b) wybuchu, obliczone za pomocą kombinacji liniowej funkcji B-spline bez więzów

Fig. 4. Explosion pressure (a) and rate of pressure rise (b) calculated by means of the combination of the linear B-spline function with no constraints

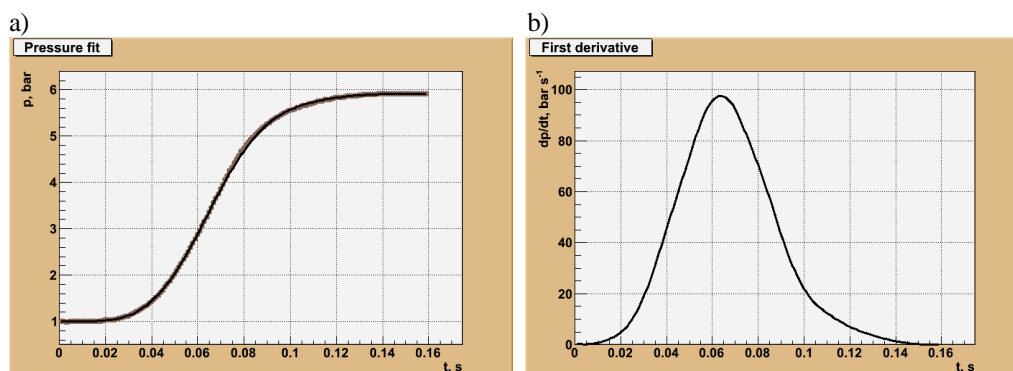
Na rysunku 5 przedstawiono wynik dopasowania z dodatkowymi więzami, ale z dobraną zbyt dużą wartością parametru λ . Funkcja dopasowywana nie odtwarza w pełni krzywizny charakterystycznej dla danych doświadczalnych. Największa niezgodność występuje oczywiście w obszarze, gdzie krzywizna ta jest największa. Wynikiem tego jest zbyt szerokie maksimum na wykresie pochodnej funkcji dopasowywanej.



Rys. 5. Ciśnienie (a) i szybkość zmian ciśnienia (b) wybuchu obliczone za pomocą kombinacji liniowej funkcji B-spline z więzami; wartość parametru wygładzającego λ jest zbyt duża

Fig. 5. Explosion pressure (a) and rate of pressure rise (b) calculated by means of combination of linear B-spline functions with constraints; the value of smoothing parameter λ is too high

Wyniki dopasowania, przedstawione na rysunku 6, wykazują dobrą zgodność funkcji dopasowywanej z wynikami pomiarów. Także kształt pochodnej tej funkcji względem czasu jest zgodny z oczekiwaniami. Wartość pochodnej jest równa zero w momencie zainicjowania wybuchu i zmniejsza się monotonicznie do zera w momencie osiągnięcia przez ciśnienie wybuchu wartości maksymalnej.



Rys. 6. Ciśnienie (a) i szybkość zmian ciśnienia (b) wybuchu obliczone za pomocą kombinacji liniowej funkcji B-spline z więzami; wartość parametru wygładzającego λ jest odpowiednio dobrana

Fig. 6. Explosion pressure (a) and rate of pressure rise (b) calculated by means of combination of the linear B-spline function with constraints; the value of smoothing parameter λ is properly selected

PODSUMOWANIE

W publikacji przedstawiono trzy metody zaproponowane w celu poprawiania dokładności wyznaczania laminarnej szybkości spalania w mieszaninie pył-powietrze. Podano zależności analityczne, opisujące położenie granic obszaru spalania mieszaniny podczas wybuchu. Wprowadzono dodatkowy czynnik do równania modelu Dahoe, pozwalający na oddzielenie z wyników doświadczalnych tej części zjawisk, która powoduje opóźnienie zapłonu, nieopisywane przez równania modelu. Omówiono procedurę obliczania pochodnej względem czasu z wyników pomiarów ciśnienia wybuchu. Pozwala ona na zastąpienie procedury dopasowywania zależności $P(t)$ bezpośrednim dopasowaniem zależności $dP/dt(t)$.

Wykonane obliczenia z wykorzystaniem opisanych metod potwierdziły znaczną poprawę jakości dopasowania równania modelu Dahoe do wyników pomiarów ciśnienia wybuchu w komorze 20-l i w konsekwencji istotne zmniejszenie niepewności wyznaczania laminarnej szybkości spalania.

Literatura

1. Ahnert K., Abel M. (2007): Numerical differentiation of experimental data: local versus global methods. *Computer Physics Communications* Vol. 177, s. 764–774.
2. Dahoe A.F. (2000): Dust explosions: a study of flame propagation. Ph.D. Thesis. Technical University of Delft.
3. Dahoe A.F., de Goey L.P.H. (2003): On the determination of the laminar burning velocity from closed vessel gas explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 16.
4. Dahoe A.F., Skjold T. (2008): Explofit: a brief user manual for version 0.99h. Working document.
5. Dyduch Z., Majcher B. (2007): Oznaczanie prędkości spalania w mieszaninach pyłowo-powietrznych z wykorzystaniem modelu wybuchu w zamkniętej objętości. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2.

6. Gu G., Wahba C. (1991): Minimizing GCV/GML scores with multiple smoothing parameters via the Newton method SIAM. J. Sci. Statist. Comput. Vol. 12, s. 383–398.

Recenzent: prof. dr hab. Kazimierz Lebecki

Krzysztof Kadlewicz*

BADANIA STEŻEŃ WŁÓKIEN AZBESTU W POWIETRZU NA STANOWISKACH PRACY I W ŚRODOWISKU

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę badań stężeń włókien azbestu w powietrzu, na stanowiskach pracy i w środowisku. Omówiono regulacje prawne, uzasadniające tego typu badania oraz doświadczenia Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza Głównego Instytutu Górnictwa (powstało w 1998 r.) z zakresu badań, kontaktów z inwestorami i wykonawcami prac związanych z usuwaniem wyrobów zawierających azbest. Badania są wykonywane na stanowiskach pracy, podczas usuwania wyrobów z azbestem z różnych obiektów, głównie z budynków mieszkalnych, oraz w środowisku, na przykład w rejonach remontowanych obiektów, w celu oceny poprawności wykonywanych prac.

W artykule przedstawiono także informacje o wyposażeniu Laboratorium, metodyce pobierania próbek powietrza oraz dokumentowaniu i niepewności wyników.

Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza posiada Certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji nr AB 301. Od 2003 roku zakres akredytacji obejmuje między innymi pobieranie próbek do oznaczania stężeń liczbowych włókien respirabilnych azbestu w środowisku pracy i środowisku zewnętrznym. Próbkę są pobierane według opracowanej w Laboratorium procedury badawczej (PB-11), w systemie zarządzania zgodnym z normą PN-EN ISO 17025:2005. W ramach wewnątrzinstytucyjnej współpracy, oznaczenia liczby włókien azbestu w próbkach są wykonywane metodą mikroskopii optycznej w Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza GIG według akredytowanej w Polskim Centrum Akredytacji procedury KD-2205-1.

Testing of the asbestos fibres concentration in the atmosphere at workstations and in the environment

Abstract

The paper presents the methodology for determining the concentrations of asbestos fibres in the atmosphere, at workstations and in the environment. There have been discussed the legal regulations, that substantiate this type of tests, and the experience of the Testing Laboratory for Work Environment and Atmosphere Protection of the Central Mining Institute, within the scope of testing, relations with the investors and contractors for works connected with the removal of asbestos-containing products. The tests are being conducted at workstations, when removing the products with asbestos from various buildings, mainly from dwelling houses, as well as in the environment, for example in the areas of renovated buildings, for estimation of correctness of performed work.

In the article, there have also been presented the information on the equipment of the testing laboratory, methodology of collecting air samples, as well as on documenting, and uncertainty of results. The Testing Laboratory for Work Environment and Atmosphere Protection holds the Certificate of the Polish Centre for Accreditation No. AB 301.

Since 2003, the scope of accreditation includes among other things, collecting the samples with the aim to determine the numerical concentrations of respirable asbestos fibres in the work and in the outer environment. The samples are being taken in accordance with the testing procedure (PB-11), worked out in the Laboratory, in the management system corresponding with the PN-EN ISO 17025:2005 standard. Within the range of intra-institute cooperation, determination of the numbers of asbestos fibres in the samples are made by using the optical microscopy method in the Laboratory for Measurements of Atmospheric Dust, according to the KD-2205-1 procedure, accredited in the Polish Centre for Accreditation.

* Główny Instytut Górnictwa.

WPROWADZENIE

Azbest jest minerałem z grupy serpentynów lub amfiboli. W przyrodzie występuje w postaci igiełkowatych skupień, ma strukturę włóknistą i budowę krystaliczną. Znanych jest kilka typów azbestu: chryzotyl – minerał skałotwórczy z grupy serpentynów oraz pięć minerałów z grupy amfiboli: amozyt, aktynolit, antofyllit, krokidolit i tremolit. Azbest, ze względu na właściwości, był szeroko stosowany do produkcji materiałów ogniotrwałych, izolacyjnych i kwasoodpornych.

Na terenie kraju, według szacunków Ministerstwa Gospodarki, znajduje się około 15 500 tys. Mg wyrobów zawierających azbest, w tym 14 900 tys. Mg płyt azbestowo-cementowych oraz 600 tys. Mg rur i innych wyrobów. Spośród ostatnich należy wymienić przede wszystkim rury wodociągowe i kanalizacyjne oraz przewody kominowe.

Trwałość wyrobów azbestowo-cementowych określa się na 30 do 50 lat. Najdłuższa jest trwałość płyt azbestowo-cementowych, natomiast okres eksploatacji innych wyrobów jest z reguły krótszy. Niezależnie jednak od trwałości wyrobów azbestowych z upływem czasu pogarszał się ich stan techniczny. Był to ważny argument dotyczący rozpowszechniania, stosowania i egzekwowania bezpiecznych metod eksploatacji, usuwania, transportu i unieszkodliwiania odpadów powstałych z tych wyrobów (O azbeście... 2005).

Objawy chorobowe związane z ekspozycją na azbest zawodową, jak i środowiskową, występują najczęściej po długim czasie od pierwszego narażenia – około 10–40 lat. Przykładowo, latencja nowotworu – międzybłoniaka opłucnej – zwykle wynosi 30–40 lat. Z badań wynika, że zagrożenie na drodze pokarmowej jest znikome. Udowodnione rakotwórcze działanie włókien azbestu, dostającego się do organizmu z powietrza, było powodem ograniczania jego stosowania w przemyśle. Zakaz obrotu i stosowania azbestu w Unii Europejskiej obowiązuje od 2005 roku. W Polsce, Rozporządzeniem Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z 1996 roku (Rozporządzenie 1996) wprowadzono zakaz stosowania wyrobów azbestowych w budownictwie. Zgodnie natomiast z Ustawą z 19 czerwca 1997 roku o zakazie stosowania wyrobów zawierających azbest (Ustawa 1997), z małymi wyjątkami, nie mogą być wprowadzane, produkowane i stosowane wyroby zawierające azbest.

Zakazy i działania dotyczące azbestu zostały określone również w Prawie ochrony środowiska (Ustawa 2001a). Artykuł 160 tej ustawy brzmi: „1. Zabronione jest, z wyjątkiem przypadków określonych w ustawie i przepisach odrębnych, wprowadzanie do obrotu lub ponowne wykorzystanie substancji stwarzających szczególne zagrożenie dla środowiska. 2. Substancjami stwarzającymi szczególne zagrożenie dla środowiska są w szczególności: 1) azbest, (...) art. 161: „1. Substancje stwarzające szczególne zagrożenie dla środowiska powinny być wykorzystywane, przemieszczane i eliminowane przy zachowaniu szczególnych środków ostrożności. 2. Instalacje lub urządzenia, w których są lub były wykorzystywane substancje stwarzające szczególne zagrożenie dla środowiska, powinny zostać oczyszczone lub unieszkodliwione”.

Odrębne, istotne regulacje prawne dotyczące azbestu wynikają z Ustawy o odpadach (Ustawa 2001b). Odpady zawierające azbest, jako odpady niebezpieczne, muszą być w odpowiedni sposób zabezpieczane, transportowane i składowane.

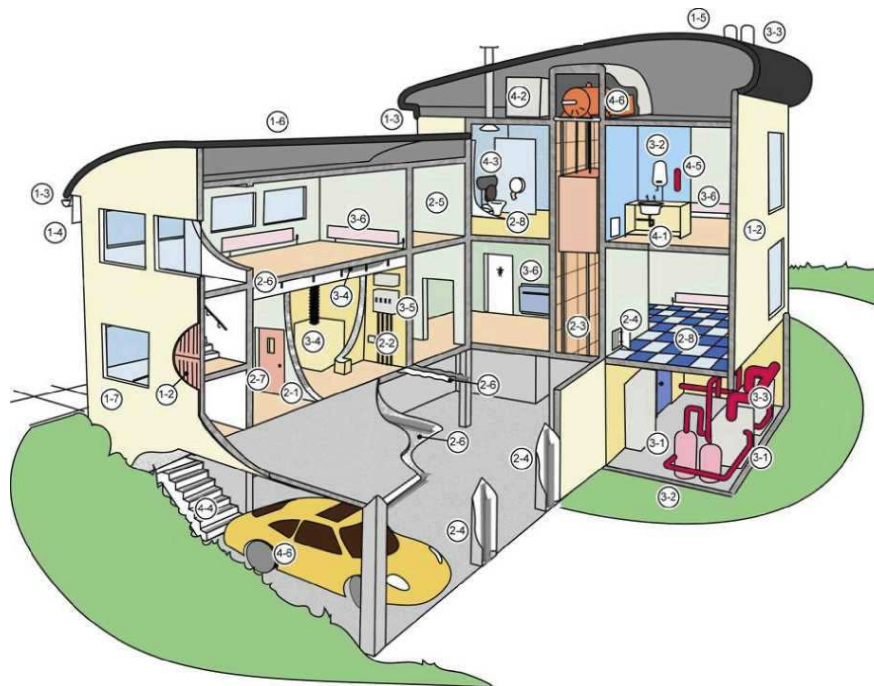
Zgodnie z założeniami zawartymi w „Programie usuwania azbestu i wyrobów zawierających azbest, stosowanych na terytorium Polski”, do 2032 roku powinno nastąpić sukcesywne usuwanie tych wyrobów oraz stopniowa likwidacja negatywnego ich oddziaływania na człowieka i środowisko.

Występowanie azbestu kojarzy się głównie z pokryciami dachów (eternit falisty, płytki karo) i elewacjami budynków (płyty acekol). Często w budynkach wielorodzinnych występuje również w kanałach wentylacyjnych, przewodach kominowych, obudowach zsyków i wind. W przemyśle spotyka się go najczęściej w postaci izolacji czy uszczelnień: koce, sznury, maty, płótna, uszczelki – ciepłownictwo, energetyka, budownictwo przemysłowe.

Zawartość azbestu w produkowanych materiałach kształtowała się następująco: wyroby faliste produkowane w latach 60. zawierały od 11,5 do 15% masy suchej azbestu. Później produkowane w Polsce płyty azbestowo-cementowe zawierały różne ilości azbestu (w zależności od producenta) – od 10 do 14%. Do końca lat 70. do wyrobu płyt azbestowo-cementowych stosowano mieszankę krokidolitu i chryzotyłu, natomiast z początkiem lat 80. zaczęto używać wyłącznie chryzotyłu. Ogólnie można stwierdzić, że udział azbestu w wyrobach azbestowo-cementowych zależał od ich przeznaczenia i przedstawiał się następująco (Brzozowski, Obmiński 2004): w płytach płaskich prasowanych: 10–11%, w płytach falistych: 10–14%, w rurach niskociśnieniowych: 14–16%, w rurach wysokociśnieniowych: do 18% (czasem do 25%), w szczeliwach azbestowo-kauczukowych o nazwie GAMBIT, POLONIT: około 30%, w płaszczach cementowo-azbestowych: 20–70%, w płaszczach gipsowo-azbestowych: 20–60%, w sznurach różnej grubości: od kilku do kilkudziesięciu %, w tekturze azbestowej: < 50%, w płytach ognioochronnych z dodatkiem azbestu „Sokalit”: około 15%, w płytach ognioochronnych „Pyral”: około 35%, w płytach ligno-cementowych FIBROBET i ligno-cementowych modyfikowanych: 5–6%, w materiałach ciernych stosowanych w pojazdach: do 40%, w płaszczach ochronnych sieci ciepłej: około 37%, w masach izolacyjnych: 15–30% „kurzu azbestowego”.

Potencjalne miejsca w budynku mieszkalnym, w których może znajdować się azbest, przedstawiono na rysunku 1 (Azbest 2006).

W publikacji, z której pochodzi rysunek, zostały omówione przede wszystkim dobre praktyki usuwania azbestu słabo związanego, natomiast problem usuwania wyrobów zawierających azbest mocno związany, na przykład wyrobów azbestowo-cementowych, nie został dostatecznie przedstawiony. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że w tzw. starych krajach UE azbest słabo związany jest powszechnie stosowany nie tylko w przemyśle, lecz także w budownictwie mieszkaniowym. W przypadku Polski zapasy azbestu słabo związanego są znacznie mniejsze niż ilości wyrobów azbestowo-cementowych i z tego względu wydaje się celowe opracowanie poradnika dobrych praktyk w zakresie usuwania tych wyrobów (Fołtyn 2007).



Rys. 1. Schemat przedstawiający typowe umiejscowienie materiałów zawierających azbest w budynku (Azbest 2006): 1 – dach/elewacja zewnętrzna: 1-1 dachówki/blacha dachowa, 1-2 okładzina, powłoka ścienna, 1-3 orynnowanie/rury ściekowe, 1-4 panele podsufitowe, 1-5 deflektory kominowe, 1-6 pilśni dachowa, 1-7 panele podokienne, 2 – elewacja wewnętrzna: ściany/sufity: 2-1 ściany działowe, 2-2 panele urządzeń elektrycznych, grzewczych, kuchenek, łazienek, szafek, 2-3 panele okładzinowe szybu, wyciągowe, 2-4 panele dostępu do przewodu pionowego, obudowa przewodu pionowego, 2-5 powłoki ozdobne, 2-6 powłoki natryskowe elementów konstrukcyjnych, płytek sufitów zawieszonych, pasów przeciwpożarowych, izolacji strychu lub sufitu, drzwi, 2-7 panele, płyty, podłoga, 2-8 płytki, linoleum, okładzina podniesionych podłóg, 3 – ogrzewanie, wentylacja i urządzenia elektryczne: 3-1 boiler/podgrzewacz wody: izolacja zewnętrzna i wewnętrzna, uszczelki, 3-2 rurociągi: izolacja, uszczelki, okładzina papierowa, 3-3 rura ogniowa i uszczelki, 3-4 przewody: izolacja, uszczelki, okładzina wewnętrzna i mieszki ochronne przeciwdrganie, 3-5 elektryczna aparatura rozdzielcza: elementy wewnętrzne, panele otaczające, 3-6 urządzenie grzewcze: uszczelki, panele otaczające, 4 – pozostałe elementy: 4-1 maty bitumiczne pod zlew, 4-2 zbiorniki na wodę, 4-3 zbiorniki na wodę i sedesy, 4-4 brzeg stopnia schodów, 4-5 koce przeciwpożarowe, 4-6 okładzina hamulca/sprzęgło (samochód w garażu i silnik do wyciągów pionowych)

Fig. 1. The scheme presenting the typical location of materials that contain asbestos in a building (Azbest 2006): 1 – roof/external elevation: 1-1 roof tiles/roof metal sheet, 1-2 facing, wall coatings, 1-3 guttering/sewage pipes, 1-4 panels under the ceiling, 1-5 chimney cowls, 1-6 roof felt, 1-7 panels under the window, 2 – internal elevation: walls/ceilings: 2-1 partition walls, 2-2 panels of the electrical, heating devices, kitchenettes, bathrooms, cupboards, 2-3 facing panels of the shaft, ventilating, 2-4 panels of the access to the vertical duct, lining of the vertical duct, 2-5 decorative coatings, 2-6 spray coatings of constructional elements, of tiles of the suspended ceilings, of the fire-fighting strips, of insulation of the loft or ceiling, doors, 2-7 panels, plates, floor, 2-8 tiles, linoleum, facing of the elevated floors, 3 – heating, ventilation and electrical devices: 3-1 boiler/water heater: external and internal insulation, gaskets, 3-2 pipelines: insulation, gaskets, paper facing, 3-3 fire pipe and gaskets, 3-4 pipelines: insulation, gaskets, internal facing and protective, anti-vibration bellows, 3-5 electric distribution equipment: internal elements, surrounding panels, 3-6 heating device: gaskets, surrounding panels, 4 – the rest of elements: 4-1 bituminous mats under the sink, 4-2 water tanks, 4-3 water tanks and toilets, 4-4 the edge of the stairs step, 4-5 fire-fighting blankets, 4-6 facing of the brake/clutch (car in the garage and engine for the elevators)

Mieszkańcy nie zawsze zdają sobie sprawę z niebezpieczeństwa, które stwarzają znajdujące się w powietrzu, niewidoczne gołym okiem, włókna azbestu, nie tylko dla pracowników firm wykonujących prace demontażowe, ale również dla nich samych. Dotychczasowe kontakty zarówno z przedstawicielami firm, jak i ich pracownikami,

w tym kierownikami budów, pozwalają na stwierdzenie, że znajomość obowiązujących regulacji prawnych, jak i zagrożeń dla zdrowia przy wykonywaniu prac z wyrobami zawierającymi azbest jest niedostateczna. Odosobnione są przypadki kompetentnych i wymagających inspektorów nadzoru, reprezentujących inwestorów. Brak znajomości lub niestosowanie przepisów, to najczęstsza przyczyna zwiększonego uwalniania się włókien azbestu z wyrobów budowlanych zawierających azbest, podczas ich demontażu i usuwania. Jest to tzw. emisja niezorganizowana.

Przez wiele lat badania i pomiary stężeń włókien azbestu w powietrzu zarówno na stanowiskach pracy, jak i w środowisku były wykonywane przez pracowników Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza GIG. Wykonano je dla prawie pięćdziesięciu firm, przede wszystkim prowadzących prace demontażowe. Autor ma nadzieję, że opisana metodyka, doświadczenia i skrótowo przedstawione wyniki badań, pozwolą na przybliżenie problemu zagrożeń, możliwości ich zmniejszenia i sposobu monitorowania powietrza. Zagadnienia te dotyczą nie tylko pracowników, mieszkańców czy użytkowników budynków i obiektów posiadających elementy z materiałów zawierających azbest, lecz ze względu na przemieszczanie się włókien i zagrożenie dla zdrowia, pośrednio każdego obywatela.

1. REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE BADAŃ I POMIARÓW WŁÓKIEN AZBESTU

Emisja włókien azbestu może pochodzić z różnych źródeł i może mieć również charakter zorganizowany. W związku z tym, w Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Rozporządzenie 2005a) została podana dopuszczalna wartość emisji pyłu wynosząca $0,1 \text{ mg/m}^3$ (w praktyce jest to średnia wartość stężenia pyłu w gazach odlotowych, mierzona w przekroju pomiarowym metodą wagową – przyp. aut.). W przypadku prowadzenia badań metodą mikroskopii optycznej, fazowo-kontrastowej, są to nie więcej niż 2 włókna długości powyżej $5 \mu\text{m}$, o średnicy $< 3 \mu\text{m}$ i stosunku długości do szerokości > 3 – w 1 ml gazów odlotowych w warunkach umownych. Określone w Rozporządzeniu wymiary włókien, to jednocześnie definicja włókien respirabilnych, których stężenie w powietrzu jest oznaczane na stanowiskach pracy, ponieważ stanowią największe zagrożenie, ze względu na zatrzymywanie w organizmie i penetrację w tkance płucnej.

W Rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy zmieniającym Rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Rozporządzenie 2005d) zostały zawarte najwyższe dopuszczalne stężenia (NDS) obowiązujące dla wszystkich odmian włókien azbestu, wynoszące: dla pyłu całkowitego zawierającego azbest $0,5 \text{ mg/m}^3$ (wagowo) lub $0,1 \text{ włókien/cm}^3$ czyli $0,1 \text{ włókna w 1 ml powietrza}$, co odpowiada wartości $100\,000 \text{ włókien/m}^3$. Stosowanie jako kryterium metody wagowej jest mało precyzyjne i nie ma większego sensu, ponieważ nie jest znany udział pyłu azbestowego w pyłe całkowitym. Podobnie w innych krajach UE, w Dyrektywie 2003/18/EC (Dyrektywa 2003) zostało podane $\text{NDS} = 0,1 \text{ włókna/cm}^3$ jako średnia ważona w przeliczeniu na ośmiodzinny okres odniesienia. Jednocześnie podano, że „gdzie to możliwe, liczenie włókien będzie dokonywane za pomocą mikroskopu z kontrastem fazowym, zgodnie

z metodą zalecaną przez Światową Organizację Zdrowia z 1997 roku (Determination...) lub inną metodą dającą równorzędne wyniki. Wypada wspomnieć, że we wcześniejszych polskich wersjach rozporządzeń NDS wynosiło $1,0 \text{ mg/m}^3$ dla mniej szkodliwych odmian azbestu, z wyjątkiem krokidolitu i antygorytu włóknistego ($0,5 \text{ mg/m}^3$) odpowiednio $0,5$ i $0,2$ włókna/ cm^3 . W Rozporządzeniu obowiązującym od 2003 roku (Rozporządzenie 2002b) (przed zmianami w 2005 r.) utrzymano podobne wartości wagowe, z tym, że $0,5 \text{ mg/m}^3$ dotyczyło tylko krokidolitu, natomiast mikroskopowe – $0,2$ włókien/ cm^3 dotyczyło wszystkich odmian azbestu.

Częstotliwość wykonywania badań na stanowiskach pracy reguluje Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Rozporządzenie 2005c). W §7 Rozporządzenia zapisano: „Laboratoria wykonujące badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy powinny uzyskać akredytację na podstawie przepisów ustawy z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz. U. z 2004 r. Nr 204, poz. 2087 oraz z 2005 r. Nr 64, poz. 565)”.

Odrębną grupę regulacji, pośrednio z zakresu badań i pomiarów stężeń włókien azbestu w powietrzu, stanowią rozporządzenia dotyczące zasad bezpieczeństwa i higieny pracy oraz sposobów i warunków użytkowania, zabezpieczania i usuwania wyrobów zawierających azbest.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie zasad bezpieczeństwa i higieny pracy przy zabezpieczaniu i usuwaniu wyrobów zawierających azbest oraz programem szkolenia w zakresie bezpiecznego użytkowania takich wyrobów (Rozporządzenie 2005b) pracodawcy są zobowiązani do kontroli stopnia narażenia pracowników na działanie pyłu azbestu w sposób określony w przepisach dotyczących badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz podejmowania działań zmniejszających narażenie i ograniczających jego stężenia do wartości dopuszczalnych.

O planach kontroli jakości powietrza obejmujących stężenie azbestu jest mowa również w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 23 października 2003 r. w sprawie wymagań w zakresie wykorzystywania i przemieszczania azbestu oraz wykorzystywania i oczyszczania instalacji lub urządzeń, w których był lub jest stosowany azbest (Rozporządzenie 2003). Projekt i harmonogram usuwania lub wymiany azbestu lub wyrobów zawierających azbest z takich pomieszczeń uwzględnia wykonanie pomiarów stężeń pyłów azbestu w środowisku pracy przed i po wykonaniu prac (§5.3).

W Rozporządzeniu MGPIPS z dnia 2 kwietnia 2004 r. w sprawie sposobów i warunków bezpiecznego użytkowania i usuwania wyrobów zawierających azbest (Rozporządzenie 2004) zostało zdefiniowane pojęcie emisji azbestu, podana identyfikacja azbestu i określony sposób potwierdzania prawidłowości wykonywanych prac na podstawie wyników badań jakości powietrza, przeprowadzanych przez akredytowane laboratorium. Najważniejsze zalecenia dotyczą sposobów usuwania wyrobów z azbestem, z czym w praktyce nie jest najlepiej. Według Rozporządzenia wykonawca prac jest zobowiązany do zastosowania odpowiednich środków technicznych ograniczających do minimum emisję azbestu do środowiska. Oczyszczanie powinno być wyko-

nywane skutecznymi urządzeniami filtracyjno-wentylacyjnymi lub na mokro, a wyroby przed ich demontażem powinny być nawilżane i utrzymywane w stanie wilgotnym podczas prac. Prawidłowe postępowanie przy demontażu pokrycia dachowego w Niemczech przedstawiono na fotografii 1. Rzetelność firm i stopień kontroli prac także w polskich warunkach decydują o minimalizowaniu emisji włókien i struktur azbestu do środowiska podczas wykonywania prac z materiałami zawierającymi azbest.



Fot. 1. Niemiecki przykład prawidłowego postępowania przy demontażu pokrycia dachowego z eternitu (odkurzacz z filtrem Hepa) i usuwania azbestu miękkiego (maska z nawiewem powietrza, specjalistyczny odkurzacz) (wykonywanie prac z azbestem – www.pip.gov.pl)

Photo. 1. German example of the correct acting at the disassembly of the roof covering made of eternit (vacuum cleaner with the Hepa filter) and removal of the soft asbestos (mask with the blast of air, specialist vacuum cleaner) (conducting works with asbestos – www.pip.gov.pl)

2. METODY BADAŃ I POMIARÓW STĘŻEŃ WŁÓKIEŃ AZBESTU W POWIETRZU

Badania stężeń włókien azbestu w powietrzu w Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza GIG są wykonywane zgodnie z akredytowaną procedurą badawczą PB-11: „Pobieranie próbek do oznaczenia stężenia liczbowego respirabilnych włókien azbestu w powietrzu na stanowiskach pracy i w środowisku”. W procedurze określono sposób postępowania podczas pobierania próbek powietrza ze stanowisk pracy za pomocą metody dozymetrii indywidualnej lub metody stacjonarnej. Procedura ta została opracowana na podstawie norm PN-Z-04008-07, PN-88/Z-04202/02 i PN-84/Z-04030/02. Dotyczy ona pobierania próbek powietrza do oznaczania w nich zawartości włókien respirabilnych azbestu metodą mikroskopii optycznej, która stanowi kryterium oceny warunków na stanowiskach pracy zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Rozporządzenie 2002b, 2005d), oraz warunków w środowisku zewnętrznym w rejonie źródeł możliwej emisji pyłu azbestowego.

Procedurę stosuje się do badań na wszystkich stanowiskach pracy, na których w wyniku prowadzonych procesów technologicznych mogą występować pyły prze-

mysłowe zawierające włókna azbestu. Najmniejsze stężenie liczbowe respirabilnych włókien azbestu, które można oznaczyć z zastosowaniem wymienionej procedury i procedury badawczej Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza GIG nr KD-2205-1, wynosi:

- 0,7 włókna/m³ (0,000007 włókna/cm³) – na stanowisku pracy,
- 0,01 włókna/m³ – w środowisku zewnętrznym.

2.1. Badania wykonywane na stanowiskach pracy

Próbki pyłu do oznaczania stężenia liczbowego włókien azbestu na stanowiskach pracy z wykorzystaniem metody dozymetrii indywidualnej są pobierane za pomocą zestawu, w skład którego wchodzi:

- głowica pomiarowa o symbolu katalogowym SKC 225-70 lub specjalistyczna do pyłów azbestowych zawierająca oprawkę do sącza z zaczepem umożliwiającym jej przymocowanie do ubrania pracownika w strefie oddychania (fot. 2),
- aspirator (pompka osobista) typu SKC model 224-52, połączony z głowicą pomiarową za pomocą węża polietylenowego i umieszczony w kieszeni lub na pasku ubrania roboczego pracownika,
- sączki pomiarowe (membrany filtracyjne) nitrocelulozowe o średnicy 25 mm – CNF produkcji Sartorius AG – Niemcy (nr kat. 11404-25N) o wymiarach porów 0,8 μm.

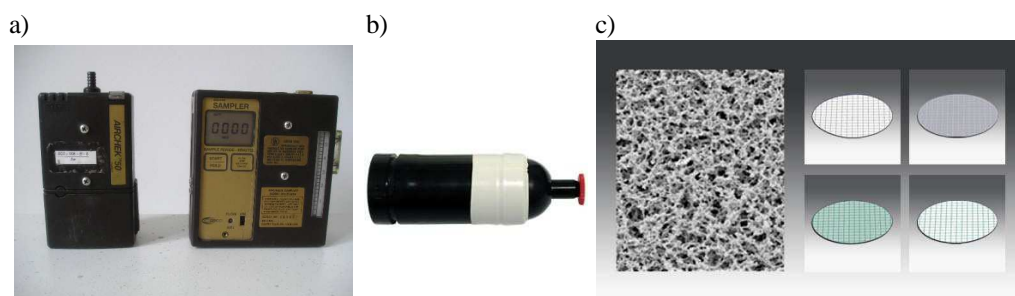


Fot. 2. Zestaw do pobierania próbek powietrza z wykorzystaniem filtrów oraz opravek, głowic i kaset firmy SKC (materiały informacyjne SKC)

Photo. 2. Unit for collecting air samples by using filters and holders, heads and cassettes of the SKC manufacture (SKC information materials)

Badanie za pomocą metody dozymetrii indywidualnej z użyciem pompki osobistej – najczęściej aspiratora firmy SKC typu 224-52 (fot. 3) – prowadzi się przez 4–6 godzin trwania zmiany roboczej; w połowie tego okresu wymienia się sącze ze względu na prawdopodobieństwo zbyt dużego pokrycia pyłem i trudności w wykonywaniu analiz mikroskopowych. Zagadnienie to dotyczy również pobierania próbek w środowisku zewnętrznym. Bezpośrednio po zakończeniu pobierania, próbki (sączki w oprawce roboczej) wyjmuje się z głowicy pomiarowej i umieszcza w kasetce trans-

portowej, w której mogą być przechowywane. Próbki są przekazywane do Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza GIG.



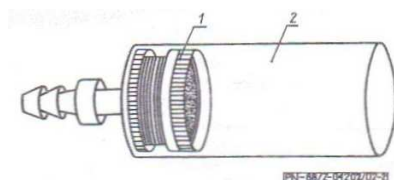
Fot. 3. Aspiratory akumulatorowe („pompki”) firmy SKC, model 224-52 i 224-PCXR4 oraz specjalna głowica-kaseta do pyłów azbestu i membrany filtracyjne nitrocelulozowe z siatką (fot. a – K. Kadlewicz, fot. b – SKC, fot. c – Sartorius)

Photo. 3. Battery aspirators („small pumps”) of SKC manufacture, model 224-52 and 224-PCXR4, and special head-cassette for asbestos dusts and filter nitrocellulose membranes with the net

Najczęściej badania tego typu są wykonywane w celu oceny zagrożenia pracowników usuwających płyty azbestowo-cementowe typu acekol z elewacji budynków oraz płyty eternitu falistego z dachów.

2.2. Analizy mikroskopowe

Metoda mikroskopowa (PCM – *Phase-Contrast Microscopy*) jest referencyjna według aktualnych wymagań UE czy zaleceń WHO (Determination...; Określanie stężenia... 1997). W Polsce analizy wykonuje się według normy PN-88/Z-04202.02: Ochrona czystości powietrza – badania zawartości azbestu – oznaczanie stężenia liczbowego respirabilnych włókien azbestu na stanowisku pracy metodą mikroskopii optycznej. Zgodnie z nią pompkę pyłomierza mocuje się do pasa pracownika wytypowanego do pobierania próbek powietrza. Głowicę pomiarową z założonym sączkiem mocuje się natomiast do ubrania, tak aby wlot powietrza znajdował się w strefie oddychania i nie był zwrócony ku górze. Zalecane w normie specjalne głowice pomiarowe z oprawką i kołnierzem ochronnym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Głowica pomiarowa (PN-88/Z-04202.02): 1 – oprawka, 2 – kołnierz ochronny

Fig. 2. Measuring head (PN-88/Z-04202.02): 1 – holder, 2 – protective flange

Pompkę należy połączyć z głowicą pomiarową i rozpocząć pomiar przez równoczesne włączenie pompki i sekundomierza oraz zanotować czas rozpoczęcia pomiaru. Czas pobierania próbki powietrza należy tak dobrać, aby uzyskać zalecane pokrycie

sączka włóknami azbestu. Pokrycie powinno wynosić co najmniej 50 włókien na 1 mm^2 , tj. w przybliżeniu 0,4 włókna w polu zliczania siatki Walton-Becketta. Dopuszcza się zmniejszenie pokrycia sączka do 20 włókien na 1 mm^2 , tj. w przybliżeniu 15 włókien na 100 pól zliczania, w przypadkach, gdy oznaczenie stężenia włókien z małą precyzją jest zadowalające. Pokrycie sączka nie powinno przekraczać 650 włókien na 1 mm^2 , tj. średnio 5 włókien w polu zliczania. Większe pokrycie dopuszcza się w przypadku czytelnych preparatów mikroskopowych. Czas trwania pojedynczego pomiaru t można określić w przybliżeniu według wzoru

$$t = \frac{AL}{aX_o r}, \text{ min}$$

gdzie:

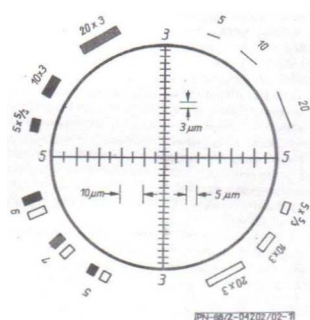
- A – czynna powierzchnia sączka, mm^2 ;
- L – wymagane pokrycie sączka włóknami, wyrażone liczbą włókien w polu zliczania;
- a – powierzchnia pola zliczania siatki Walton-Becketta, mm^2 (rys. 3);
- X_o – oczekiwane średnie stężenie włókien w czasie pobierania próbki, wyrażone liczbą włókien w 1 ml;
- r – objętość przepływu powietrza, ml/min.

Po pobraniu próbki powietrza należy zanotować czas trwania pojedynczego pomiaru, a następnie w pomieszczeniu bez źródeł emisji pyłu wykręcić oprawkę i wyjąć sączek. Sączki należy umieścić w osobnych, szczelnych pojemnikach, na przykład z tworzywa sztucznego. Zaleca się jednoznaczne znakowanie oprawek i pojemników do sączków w celu uniknięcia powtórnego użycia tego samego sączka.

Po przetransportowaniu sączków w szczelnie zamkniętych pojemnikach (kasetach) do Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza KD „Barbara” GIG, zostają one poddane procesowi uprzeczystnienia za pomocą balsamu uzyskanego na bazie szczawianu dwuetylu i ftalanu dwumetylu, zgodnie z normą PN-88/Z-04202 lub w parach acetonu w ewaporatorze, według własnej procedury.

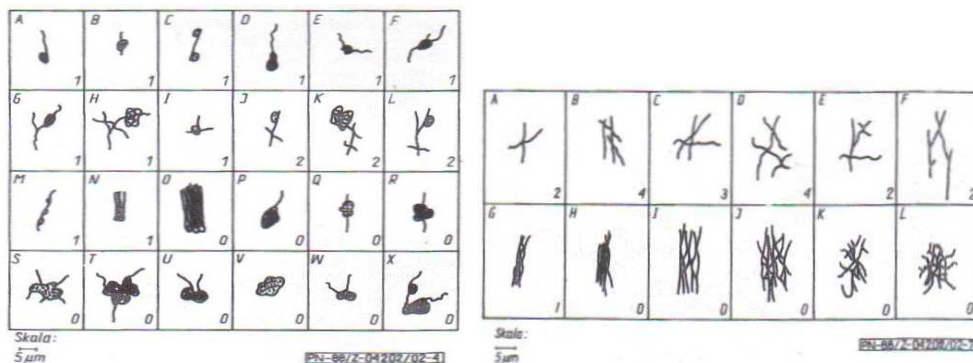
Tak spreparowane sączki ogląda się pod mikroskopem optycznym fazowo-kontrastowym o łącznym powiększeniu $600\times$ i zlicza włókna. Każdorazowo analizuje się 100 pól zliczania. Metoda analizy jest zgodna z procedurą KD-2205-1 „Rozkład ziarnowy pyłu. Oznaczenie liczbowe włókien respirabilnych” edycja 2. z dnia 26.02.2007 r. Procedura posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji – certyfikat nr AB 712. Zliczanie odbywa się w siatce okularowej (rys. 3), według wzorców dla pojedynczych, rozszczepionych i pęków włókien, opisanych w normie PN-88/Z-04202 (rys. 4).

W Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza KD „Barbara” GIG znajduje się mikroskop BX-51 firmy Olympus (fot. 4) do światła przechodzącego, wyposażony w polaryzację, kontrast fazowy, ciemne pole, możliwość pracy w powiększeniach od $40\times$ do $1000\times$. Mikroskop jest sprzężony z kamerą cyfrową Color-View o rozdzielczości 5 mln pikseli i programem do archiwizacji, wizualizacji danych analysis work.



Rys. 3. Siatka okularowa Walton-Becketta typu G22 (PN-88/Z-04202)

Fig. 3. Ocular net of Walton-Beckett, type G22 (PN-88/Z-04202)



Rys. 4. Wybrane wzorce włókien i pęków włókien azbestu według PN-88/Z-04202

Fig. 4. Chosen standards of fibres and bunches of asbestos fibres according to PN-88/Z-04202



Fot. 4. Mikroskop BX-51 firmy Olympus do światła przechodzącego z polaryzacją, kontrastem fazy, kamerą cyfrową i programem do archiwizacji, wizualizacji danych

Photo. 4. Olympus BX-51 microscope for transmission light, with polarization, phase contrast, digital camera and program for archiving, data visualization

Wyniki badań, czyli całkowita liczba zliczonych włókien respirabilnych, są przekazywane do Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza GIG, w którym wykonuje się obliczenia stężeń włókien w próbkach powietrza, zgodnie

z normą PN-88/Z-04202. Dla pojedynczej próbki stężenie włókien respirabilnych azbestu w powietrzu, wyrażone liczbą włókien w 1 ml (cm^3), wylicza się według wzoru

$$X = \frac{AN}{anrt}$$

gdzie:

- A – czynna powierzchnia sącza;
- N – całkowita liczba zliczonych włókien;
- a – powierzchnia zliczania;
- n – liczba analizowanych pól zliczania;
- r – objętość przepływu powietrza przez sącze, ml/min;
- t – czas pobierania próbki, min.

Należy zaznaczyć, że zarówno wartości kryterialne w postaci NDS, jak i przedstawiane w literaturze wyniki stężeń, dotyczą wartości uzyskanych na podstawie obliczeń z danych analiz mikroskopowych. Całkowita liczba zliczanych włókien na 100 pól zliczania dla pojedynczej próbki mieści się najczęściej w granicach od 1 do kilku, rzadko kilkunastu włókien w środowisku zewnętrznym oraz kilkunastu, kilkudziesięciu, czasem ponad stu włókien w środowisku pracy.

Dokumentacja badań stężeń włókien azbestu w środowisku pracy zawiera ocenę higieniczną stanowisk, według obowiązujących kryteriów zgodnych z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10.10.2005 r. (Rozporządzenie 2005d), zmieniającym Rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz z normą PN-Z-04008-7:2002 [10].

2.2. Badania wykonywane w środowisku zewnętrznym

Podobnie jak w środowisku pracy, metodyka badań w środowisku zewnętrznym została opracowana na podstawie obowiązujących norm i procedur pomiarowych. Ze względu na potrzebę uzyskania większych przepływów zasysanego powietrza, próbki zwykle pobiera się za pomocą aspiratorów zasilanych z sieci 230 V – typu AS-50, produkcji TWO-MET w Zgierzu (fot. 4). Parametry aspiratora przedstawiono w tablicy 1. Próbkę pobiera się na takie same jak w środowisku pracy sącze membranowe nitrocelulozowe.

W związku z tym, że badania w środowisku, zgodnie z §7, ust. 4 Rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2 kwietnia 2004 r. w sprawie sposobów i warunków bezpiecznego użytkowania i usuwania wyrobów zawierających azbest są wykonywane w celu oceny prawidłowości prowadzonych prac, zaleca się wykonawcom i wykonuje najczęściej dwie serie pomiarów. Laboratorium BŚPiOP wykonuje ocenę na podstawie porównania wyników uzyskanych w pierwszym etapie – przed rozpoczęciem robót – z wynikami serii pomiarowej wykonanej po zakończeniu robót związanych z demontażem płyt zawierających azbest. W pierwszej serii badań, prowadzonej w celu ustalenia, tzw. tła, określa się stan zanieczyszczenia powietrza włóknami azbestu w rejonie planowanego demontażu elementów zawierających azbest. Drugą serię przeprowadza się w tym samym rejonie, po zakończeniu

prac, usunięciu i wywiezieniu na składowisko odpadów – materiałów z azbestem. Porównanie wyników z obu serii pomiarowych daje wiarygodną ocenę prawidłowości prowadzonych prac.

Tablica 1. Dane techniczno-ruchowe aspiratora AS-50

Nominalna wydajność ssania	(50 l/min)
Nominalne ciśnienie ssania	10 kPa
Moc silnika napędowego	90 W
Zakres pomiarowy rotametu	(15–60 l/min)
Zakres regulacji wydatku	(15–60 l/min)
Tolerancja przepływu (nastawionego) przy zmianach spadku ciśnienia na filtrze pomiarowym 0,1–30,0 kPa	+/-5%
Wymiary gabarytowe (szer.) (dł.) (wys.)	155x200x330 mm
Ciężar	ok. 8,2 kg
Rodzaj pracy	ciągła



Fot. 5. Aspirator AS-50

Photo. 5. Aspirator AS-50

Prace remontowo-budowlane związane z zagrożeniem azbestem polegają najczęściej na demontażu płyt acekol ze ścian zewnętrznych, pakowaniu ich do folii, tymczasowym składowaniu w rejonie budowy i wywozie na składowisko zewnętrzne. W dalszym etapie, w ramach termomodernizacji, ściany budynków są ocieplane i tynkowane.

Po przeprowadzeniu wizji lokalnej w rejonie budynków mieszkalnych i innych – badania wykonuje się w ustalonych, wybranych miejscach w bliskiej odległości (ok. 1–2 m od ścian budynków). Dokładna lokalizacja miejsc pobierania próbek jest opisywana i przedstawiana graficznie na szkicu. W czasie badań określa się również warunki atmosferyczne: kierunek i prędkość wiatru, temperaturę, wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne.

Badania zawartości włókien azbestowych w powietrzu są wykonywane również w pomieszczeniach. Sposób prowadzenia tego typu badań został określony w opracowanej na podstawie norm amerykańskich i ISO normy PN-EN 16000-7:2007. Norma dotyczy:

- lokali mieszkalnych mających pokoje gościnne, sypialne, pomieszczenia do majsterkowania, pokoje do zabawy i odpoczynku, piwnice, kuchnie i łazienki,
- pracowni lub miejsc pracy w budynkach niepodlegających inspekcjom BHP w odniesieniu do substancji zanieczyszczających powietrze (np. biura i punkty sprzedaży),
- budynków użyteczności publicznej i handlowej (np. szpitale, szkoły, przedszkola, ośrodki sportu, biblioteki, bary i restauracje, teatry i pomieszczenia o innym przeznaczeniu),
- kabin pojazdów i transportu publicznego.

Z uwagi na brak normatywów dotyczących środowiska zewnętrznego, niektóre zapisy tej normy można wykorzystać do ustalenia metodyki pobierania próbek i prowadzenia badań. Praktyka i doświadczenia uzyskane przez pracowników Laboratorium BŚPiOP GIG potwierdzają zasadność tych zaleceń, które od kilkunastu lat są stosowane. Zalecenia zawarte w normie są następujące: „Warunki pogodowe mogą ograniczyć możliwość zebrania odpowiednich próbek powietrza w środowisku zewnętrznym. Jeśli to możliwe, zaleca się, aby pobieranie próbek było przeprowadzane w warunkach niskiej wilgotności i przy niedużym wietrze. Zaleca się, aby szczegółowe dane odnośnie do pogody, prędkości wiatru i jego kierunku w okresie pobierania próbek zostały odnotowane (...) Zaleca się, aby wszelkie dostępne informacje dotyczące lokalnej topografii oraz rodzaje i umiejscowienie źródeł zostały zanotowane”.

Z powodu wyłapywania na filtrach wszystkich pyłów (nie tylko włókien azbestu) istotnym problemem jest czas pobierania próbek i stosowany przepływ. W normie zwrócono uwagę na skutki dużego pokrycia filtrów: „Niższy próg wykrywalności dla danego pomiaru, może w zasadzie zostać osiągnięty poprzez zwiększenie badanej objętości powietrza i badanej powierzchni filtra. Jeśli wydłuży się czas pobierania próbek lub zwiększy prędkość przepływu, zwiększając tym samym objętość badanego powietrza (przepuszczonego przez filtr), wówczas stężenie niewłóknistych cząstek w powietrzu wewnątrz może doprowadzić do zwiększonego tworzenia się aglomeratów na filtrze. To z kolei może prowadzić do zapchania się filtra podczas pobierania próbek i w rezultacie do niedopuszczalnego spadku ciśnienia w filtrze, tak że dochodzi do obniżenia przepływu. Większe obciążenie filtra cząstkami niewłóknistymi może również doprowadzić do zasłonięcia włókien azbestu, wprowadzając ujemny błąd systematyczny. Cząstki osadzone nie powinny przekroczyć 10% powierzchni filtra.

Wybór odpowiedniego czasu na pobieranie próbek, intensywność i częstotliwość symulacji oraz obszar, który ma zostać zbadany stanowi problem do optymalizacji, który powinien zostać rozwiązany na etapie planowania określonego celu pomiaru. W określeniu optymalnych warunków pobierania próbek może być przydatne badanie pilotażowe”.

W praktyce, pracownicy Laboratorium pobierający próbki, obserwują stan zanieczyszczenia sącza filtracyjnego oraz kontrolują na bieżąco przepływ powietrza na

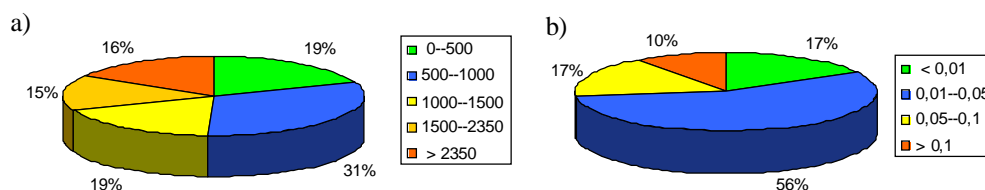
rotametrze zabudowanym w aspiratorze. Przepływ może być regulowany, a nieuniknione w związku z zapychaniem się filtra jego spadki są zapisywane. Taka sytuacja sugeruje konieczność skrócenia czasu pobierania próbek. Objętość pojedynczej próbki powietrza wynosi zwykle 1–2 m³.

Obecnie zarówno w Polsce, jak i w UE brak jest kryteriów dopuszczalnego stężenia włókien azbestu w powietrzu atmosferycznym. Niektóre kraje członkowskie stosują swoje różne i trudne do porównania kryteria. W Laboratorium jako wartość NDS w środowisku jest przyjmowana wartość dopuszczalna według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 5.12.2002 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu (Rozporządzenie 2002a) wynosząca dla jednej godziny 2350 włókien/m³. W Rozporządzeniu MŚZNiL z 1998 roku wartość ta wynosiła 1000 włókien/m³ w odniesieniu do 24 godzin.

Dokumentacja z badań i pomiarów stężeń azbestu w środowisku zewnętrznym, wykonywana w Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza GIG zawiera ocenę stopnia zanieczyszczenia powietrza w oparciu o kryterium, jakim jest wartość godzinowa zawarta w ww. Rozporządzeniu z 2002 roku.

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ STĘŻEŃ WŁÓKIEN AZBESTU

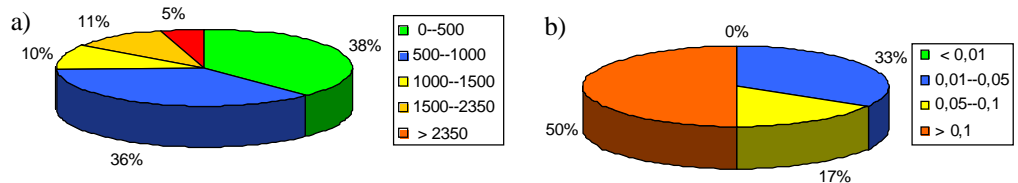
Na rysunkach 5–7 przedstawiono dane dotyczące lat 2007 i 2008. Przedziały stężeń dobrano na podstawie danych literaturowych i byłych oraz istniejących kryteriów stężeń. W przypadku środowiska zewnętrznego przeanalizowano 301 próbek pobranych w 2007 roku oraz 228 próbek pobranych w 2008 roku. Znacznie mniejsza liczba próbek dotyczyła badań środowiska pracy – w sumie 47.



Rys. 5. Porównanie wyników stężeń włókien azbestu w powietrzu: a – w środowisku, b – na stanowiskach pracy, uzyskanych w 2007 roku

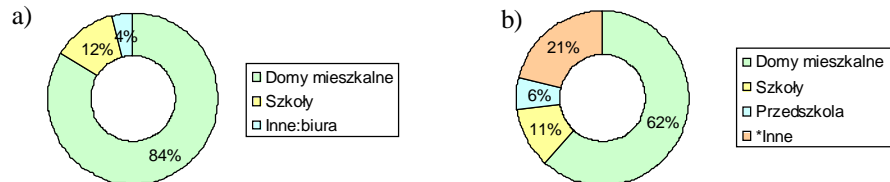
Fig. 5. Comparison of the results of asbestos fibre concentration in the atmosphere: a – in the environment, b – at workstations, obtained in 2007

Zdecydowana większość miejsc, w których wykonywano badania, to rejony budynków mieszkalnych wielorodzinnych, gdzie demontowano płyty elewacyjne azbestowo-cementowe, czasem dachowe. Wśród innych – w 2007 roku były budynki użyteczności publicznej – starostwa, pawilony handlowe, biura, nadszycia szybów kopalnianych, stacje – rozdzielnie wysokiego napięcia.



Rys. 6. Porównanie wyników stężeń włókien azbestu w powietrzu: a – w środowisku, b – na stanowiskach pracy, uzyskanych w 2008 roku

Fig. 6. Comparison of the results of asbestos fibre concentration in the atmosphere: a – in the environment, b – at workstations, obtained in 2008



Rys. 7. Miejsca pobierania próbek powietrza w środowisku: a – 2007 rok, b – 2008 rok

Fig. 7. Places of collecting air samples in the environment in the years: a – 2007, b – 2008

3.1. Omówienie wyników badań

Zdecydowana większość próbek wykazywała wartości stężeń włókien poniżej wartości dopuszczalnych. Dotyczyło to zarówno badań w środowisku, jak i na stanowiskach pracy.

W przypadku środowiska zewnętrznego liczba wyników przekraczających 2350 włókien/m³ zmalała w 2008 roku w porównaniu z 2007 rokiem z 16 do 5%. Może to sugerować poprawę prawidłowości prowadzenia prac i zapobiegania nadmiernej emisji do powietrza, równocześnie jednak można przyjąć, że we wcześniejszym okresie były demontowane elementy w gorszym stanie technicznym, mogące powodować większe uwalnianie się włókien. Stwierdzono również nieliczne przypadki dużej liczby włókien w powietrzu i występowanie przekroczenia ich liczby przed rozpoczęciem robót demontażowych. Z kolei na stanowiskach pracy, podczas wykonywania prac związanych z usuwaniem wyrobów zawierających azbest, nastąpił wzrost liczby próbek, w których stwierdzono przekroczenia NDS – z 10 do 50%. W większości przypadków przekroczenia były nieznaczne i mieściły się w granicach błędu metody. Niestety zespoły pomiarowe często stwierdzały brak obowiązującego zraszania elementów wodą. Trudno natomiast porównywać wyniki z badań stanowiskowych, ze względu na znacznie mniejszą ich liczbę w 2008 roku.

Znacznie bardziej jest utrudnione porównywanie wyników środowiskowych, jednak nie tylko ze względu na mniejszą ich liczbę w 2008 roku, ale na występowanie różnych warunków atmosferycznych podczas badań. Wydaje się oczywiste, że ze względu na możliwość unoszenia i przemieszczania się włókien, na uzyskiwane wyniki najbardziej wpływa prędkość i kierunek wiatru oraz wilgotność powietrza. W niektórych przypadkach pomiary następowały niezwłocznie po usunięciu i wywie-

zieniu azbestu, z kolei w innych – po zakończeniu wielomiesięcznych prac termomodernizacyjnych – ociepleniu budynków i ich otynkowaniu. Niejednokrotnie wykonawcy specjalnie wydłużali termin kolejnych badań, licząc na samoistne „doczyszczenie” terenu, na przykład na skutek opadów deszczu.

Zdaniem autora, nawet, jeśli badania są obciążone błędami i trudno je porównywać, to dają one przybliżone informacje o istniejących zagrożeniach i emisji włókien azbestu do środowiska. Ocena liczbowego stężenia włókien respirabilnych azbestu w powietrzu jest jedynym laboratoryjnym sposobem oceny prawidłowości wykonywanych prac, niezależnie od wykonawcy.

Przedstawione wyniki wskazują również na zmniejszenie się liczby zamówień na tego typu badania, co sugeruje oszczędność ze strony wykonawców lub brak zainteresowania wynikami ze strony inwestorów. Stworzenie jednoznacznych kryteriów dotyczących wartości dopuszczalnych oraz wprowadzenie ujednoliconej metodyki wykonywania tego typu badań i obowiązku jej stosowania, pozwoliłoby na bardziej precyzyjną ich ocenę, jak również byłoby instrumentem zapobiegającym niewłaściwemu demontażowi wyrobów azbestowych i niekontrolowanej emisji włókien do środowiska.

3.2. Niepewność wyników stężeń włókien azbestu

Na niepewność wyników stężeń włókien azbestu w powietrzu wpływa niepewność pobierania próbek powietrza, co sprowadza się do właściwego zmierzenia objętości pobranej próbki oraz niepewność wyznaczania liczby włókien respirabilnych w próbkach – preparatach z filtrów membranowych – z zastosowaniem badań mikroskopowych.

Przy pobieraniu próbek powietrza można wyróżnić niepewność pomiaru objętości i niepewność pomiaru czasu badania, co daje standardową złożoną niepewność pobierania próbek. W przypadku aspiratorów osobistych typu SKC z układem kompensacji, stabilizacja przepływu ogranicza zmiany strumienia zasysanego powietrza, niemniej można oszacować niepewność pomiaru objętości, uwzględniając:

- niepewność wyznaczenia strumienia objętości (przepływu),
- niepewność wynikającą ze zmian temperatury przy ustalaniu przepływu,
- niepewność wynikającą ze zmian prędkości zasysania,
- niepewność wynikającą ze zmian temperatury i ciśnienia w miejscach pobierania próbek.

W przypadku aspiratorów typu AS-50 natomiast, bez układu kompensacji, należy skorygować sposób obliczania niepewności.

Wyliczona niepewność standardowa złożona, zgodnie z zaleceniami Polskiego Centrum Akredytacji, powinna być podawana jako niepewność rozszerzona, która wynika z pomnożenia niepewności standardowej przez współczynnik rozszerzenia k wynoszący 2, który dla rozkładu normalnego zapewnia poziom ufności w przybliżeniu 95% lub taki współczynnik, który dla innego rozkładu prawdopodobieństwa pozwoli na uzyskanie poziomu ufności w przybliżeniu 95%.

Niepewność rozszerzona wyznaczenia objętości próbki wynosi zwykle kilka procent.

W metodzie z wykorzystaniem mikroskopu optycznego – fazowokontrastowego (w metodzie PCM), wyznaczenie właściwej liczby włókien jest zdecydowanie bardziej utrudnione. W normie PN-EN ISO 16000-7:2007 zostały zawarte ograniczenia wykrywalności dla analiz wykonywanych z zastosowaniem PCM: „granica wykrywalności dla analiz PCM na lekko obciążonych filtrach jest określona ilością włókien tła, które można ocenić na podstawie badania próbki filtrów dla każdej partii. Granica wykrywalności zwiększy się wraz ze wzrostem gęstości cząstek na filtrze, ale nie ma danych liczbowych dotyczących tego efektu”.

Do interpretacji wyników uzyskanych za pomocą metody PCM w powyższej normie została zaproponowana zmienność rozkładu typu Poissona i wzory empiryczne do obliczenia 95% granicy ufności, a mianowicie: „Współczynnik wariancji dla analizy PCM jest kombinacją zmienności rozkładu typu Poissona, błędów w pomiarze objętości powietrza oraz składnika subiektywnego. Składnik subiektywny jest największym z tych efektów i każde laboratorium analityczne może określić jego wartość dla swojej grupy analityków. Badania wykazały, że dla losowej grupy laboratoriów, międzylaboratoryjny 90% przedział ufności może być oszacowany poprzez połączenie zmienności typu Poissona ze składnikiem subiektywnym równym 0,45. W celu zapewnienia zgodności stałej wartości stężenia, należy wziąć pod uwagę zmienność całkowitą.

Górna i dolna 95% granica ufności są podane równaniami empirycznymi:

$$L_{LCL} = \frac{2x + 4 - \left[(4 + 2x)^2 - 4(1 - 4s_R^2)x^2 \right]^{1/2}}{2x(1 - 4s_R^2)} \quad (2)$$

$$L_{UCL} = \frac{2x + 2,25 + \left[(2,25 + 2x)^2 - 4(1 - 2,25s_R^2)x^2 \right]^{1/2}}{2x(1 - 2,25s_R^2)} \quad (3)$$

gdzie:

L_{LCL} – współczynnik do obliczenia dolnej 95% granicy ufności;

L_{UCL} – współczynnik do obliczenia górnej 95% granicy ufności;

s_R – subiektywna część składowa międzylaboratoryjnego współczynnika wariancji;

x – całkowita liczba policzonych włókien.

Równanie (2) nie jest obowiązujące dla wartości $s_R \geq 0,50$. Równanie (3) nie jest obowiązujące dla wartości $s_R \geq 0,66$.

Grupy laboratoriów lub analityków które zebrały wystarczające dane, aby otrzymać własną wartość s_R mogą zastosować te wzory do uzyskania 95% granicy przedziału ufności w celu jej użycia. Użytkownik danych laboratoryjnych powinien otrzymać wartość s_R od laboratorium lub powinien przyjąć wartość 0,45 dla interpretacji wyników PCM.

Na przykład, przy założeniu s_R równego 0,45, w celu wykazania zgodności ze standardem 0,01 włókna/ml, przy użyciu pojedynczej próbki, w której zliczono 100 włókien, równanie (3) wskazuje, że zmierzone w powietrzu stężenie włókien powinno

być 3,13 razy mniejsze od standardu 0,01 włókna/ml. Zmierzone stężenie włókien w powietrzu nie może być zatem wyższe niż 0,003 włókna/ml (100 włókien policzonych) w celu wykazania zgodności ze standardem 0,01 włókna/ml przy 95% ufności”.

Wyniki badań mikroskopowych uzyskiwanych w Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza GIG są wyznaczane z niepewnością 25%, z oznaczalnością do 0,5 włókna przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia k wynoszącym 2. Wartości niepewności są przyjmowane na podstawie wewnątrzlaboratoryjnych i międzylaboratoryjnych badań porównawczych. Istotne są w tym przypadku, oprócz parametrów sprzętu (mikroskopu), cechy osobowe badacza (Pindel 2009), zdolność rozdzielcza jego oka oraz jego samopoczucie i stopień zmęczenia oka. Pewnym zagrożeniem dla prawidłowości wyników są występujące w powietrzu, równocześnie z włóknami azbestu, włókna wełny szklanej czy mineralnej, która była montowana pod płytami elewacyjnymi acekol. Występuje to podczas prac demontażowych czy po ich zakończeniu. Ograniczenie identyfikacji włókien związane z ich morfologią w metodzie PCM pozwala zmniejszyć mikroskopia w świetle spolaryzowanym czy inne, znacznie droższe metody mikroskopii elektronowej (SEM, TEM), umożliwiające identyfikowanie włókien na podstawie składu chemicznego czy struktury krystalicznej.

PODSUMOWANIE

Pracownicy Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza Zakładu Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza GIG w czasie wieloletnich badań zdobyli doświadczenie w zakresie pobierania próbek powietrza do oznaczania stężeń liczbowych włókien respirabilnych azbestu w środowisku pracy i środowisku zewnętrznym. Próbki są pobierane zgodnie z opracowaną w Laboratorium procedurą badawczą w systemie zarządzania zgodnym z normą PN-EN ISO 17025:2005. W ramach wewnątrzinstytutowej współpracy, liczbę włókien azbestu w pobieranych próbkach oznacza się metodą mikroskopii optycznej w Laboratorium Pomiarów Zapylenia Powietrza GIG, według akredytowanej w PCA procedury KD-2205-1, wyniki są przekazywane do Laboratorium BŚPiOP. Na podstawie uzyskanych wyników oblicza się stężenie włókien w powietrzu i opracowuje sprawozdanie wraz z oceną higieniczną. Co do badań środowiska pracy, dla którego określono wartość dopuszczalną (NDS), ocena pozwala na stwierdzenie, czy na danym stanowisku istnieją bezpieczne warunki pracy. Przedstawione wyniki potwierdzają, że nie zawsze tak jest. Bezpośrednie obserwacje metod usuwania wyrobów zawierających azbest wskazują, że duże stężenia są związane z brakiem stosowania obowiązujących technik prowadzenia prac. Wynika to z różnych przyczyn, których analizy można szukać w opracowaniach Państwowej Inspekcji Pracy.

Badania środowiska zewnętrznego zwykle są wykonywane w celu oceny stopnia zanieczyszczenia terenu włóknami azbestu, gdzie planuje się usuwanie elementów zawierających azbest, oraz określenia prawidłowości prowadzonych prac i stopnia oczyszczenia terenu po zakończeniu prac demontażowych. Uzyskane wyniki w zdecydowanej większości potwierdzały prawidłowość wykonanych prac, ale zdarzały się sytuacje wymagające ponownego oczyszczenia i powtórzenia badań. Należy zana-

czyć, że w środowisku występują również włókna pochodzące z innych źródeł, mogące powodować podwyższone stężenia włókien azbestu w powietrzu, niezależnie od prowadzonych prac. Z tego powodu właściwa ocena powinna następować na podstawie porównania dwóch serii pomiarowych – przed i po zakończeniu robót.

Obecnie brak jest jednoznacznych normatywów i regulacji prawnych dotyczących badań stężeń włókien azbestu w środowisku. Pozwala to na przykład na taką ich interpretację, która nie wymaga, w opinii wykonawców, potrzeby wykonywania badań. Dotychczasowe doświadczenia wynikające ze współpracy pracowników Laboratorium Badań Środowiska Pracy i Ochrony Powietrza z przedstawicielami firm wykonujących prace związane z usuwaniem azbestu, wskazują na słabą znajomość obowiązujących przepisów. Również liczba firm oraz realizowanych prac w stosunku do zainteresowania badaniami wskazuje na omijanie obowiązku ich wykonywania. To z kolei pozwala wnioskować, że prace te nie są wykonywane z należytą starannością, niejednokrotnie przez przypadkowych przedsiębiorców nastawionych na zysk.

Metoda mikroskopii optycznej z kontrastem fazy, pomimo że obarczona znaczną niepewnością, pozwala na uzyskiwanie wiarygodnych i porównywalnych wyników, które mogą być podstawą do oceny stopnia narażenia na włókna respirabilne pracowników wykonujących prace związane z azbestem, jak również na ocenę prawidłowości wykonywanych prac.

Opracowanie jednoznacznych kryteriów wykonywania badań w środowisku oraz ustalenie racjonalnych normatywów dopuszczalnych stężeń w powietrzu atmosferycznym powinno zapobiegać nadmiernej emisji włókien do powietrza i przyczynić się do poprawy stanu środowiska.

Literatura

1. Azbest (2006): Podręcznik wydany przez Komitet Starszych Inspektorów Pracy (SLIC), KOMISJA EUROPEJSKA, DG ds. Zatrudnienia, Spraw Społecznych i Równości Szans. Warszawa 2006 (www.pip.gov.pl).
2. Brzozowski A., Obmiński A. (2004): Gdzie występuje potrzeba zabezpieczenia lub usuwania azbestu w Polsce? *Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka* nr 4.
3. Determination of airborne fibre number concentrations. A recommended method, by phase-contrast optical microscopy (membrane filter method). Geneva, WHO 1997.
4. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2003/18/WE z 27 marca 2003 r. zmieniająca dyrektywę Rady UE 83/477/EWG w sprawie ochrony pracowników przed zagrożeniami związanymi z narażeniem na działanie azbestu w miejscu pracy, OJEU L.97/48, 15.04.2003.
5. Fołtyn M. (2007): Azbest – jak ograniczyć ryzyko. Podręcznik dobrych praktyk. *Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka* nr 6.
6. O azbeście bez trucia – czyli techniczne, zdrowotne i prawne aspekty użytkowania wyrobów zawierających azbest. Warszawa, Urząd Miasta Stołecznego – Biuro Ochrony Środowiska 2005.
7. Określanie stężenia włókien unoszących się w powietrzu. Zalecana metoda: mikroskopia optyczna z kontrastem fazowym (metoda z wykorzystaniem filtra membranowego). Geneva, WHO 1997.

8. Pindel T. (2009): Czulość i wiarygodność pomiarów czystości powietrza pod kątem analizy włókien respirabilnych azbestu za pomocą mikroskopii optycznej oraz innych metod badawczych. Seminarium szkoleniowe: Ocena zagrożeń obiektów budowlanych zanieczyszczonych pyłem azbestowym i metody kontroli zagrożeń. Warszawa, ITB.
9. PN-EN ISO 16000-7:2007 Powietrze wewnątrz – Część 7: Strategia pobierania próbek do pomiaru stężeń włókien azbestu zawieszonych w powietrzu.
10. PN-Z-04008-7:2002 Ochrona czystości powietrza. Pobieranie próbek. Zasady pobierania próbek powietrza w środowisku pracy i interpretacji wyników.
11. Rozporządzenie (1996): Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z 11 września 1996 r. w sprawie czynników rakotwórczych w środowisku pracy oraz nadzoru nad stanem zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (Dz. U. Nr 121, poz. 571).
12. Rozporządzenie (2002a): Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 grudnia 2002 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. Nr 1 z 2003 r., poz. 12).
13. Rozporządzenie (2002b): Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 217, poz. 1833, z późn. zmianami).
14. Rozporządzenie (2003): Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 23 października 2003 r. w sprawie wymagań w zakresie wykorzystywania i przemieszczania azbestu oraz wykorzystywania i oczyszczania instalacji lub urządzeń, w których był lub jest wykorzystywany azbest (Dz. U. Nr 192, poz. 1876).
15. Rozporządzenie (2004): Rozporządzenie MGPIPS z dnia 2 kwietnia 2004 r. w sprawie sposobów i warunków bezpiecznego użytkowania i usuwania wyrobów zawierających azbest (Dz. U. Nr 71, poz. 49).
16. Rozporządzenie (2005a): Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r., w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. Nr 260, poz. 2181).
17. Rozporządzenie (2005b): Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 14 października 2005 r. w sprawie zasad bezpieczeństwa i higieny pracy przy zabezpieczaniu i usuwaniu wyrobów zawierających azbest oraz programu szkolenia w zakresie bezpiecznego użytkowania takich wyrobów (Dz. U. Nr 216, poz. 824).
18. Rozporządzenie (2005c): Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2005 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 73, poz. 645).
19. Rozporządzenie (2005d): Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10 października 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 212, poz. 1769).
20. Rozporządzenie (2008): Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody (Dz. U. Nr 206, poz. 1291).
21. Ustawa (1997): Ustawa z dnia 19 czerwca 1997 r. o zakazie stosowania wyrobów zawierających azbest (Dz. U. z 2004 r. Nr 3, poz. 20, z późn. zmianami).
22. Ustawa (2001a): Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62, poz. 627 z późn. zmianami, tekst jednolity Dz. U. Nr 25 z 2008 r., poz. 150).
23. Ustawa (2001b): Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz. U. 2007 Nr 39, poz. 251 z późn. zmianami).

Recenzent: doc. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk

Joanna Kurzeja*, Jerzy Kornowski*

ESTYMACJA ENERGII SEJSMOAKUSTYCZNEJ I WSPÓŁCZYNNIKA JEJ ABSORPCJI W POKŁADZIE PRZED FRONTEM SKRAWANEJ ŚCIANY

Streszczenie

W artykule przedstawiono szczegółowy opis związków tak zwanej energii umownej (EU) – odczytywanej z komputerowego wyjścia systemów sejsmoakustyki górniczej – ze strumieniem (e^*) energii pola falowego w otoczeniu geofonu. Następnie analizowano warunkowe – zależne od modelu – związki strumienia e^* z ważną w zastosowaniu, energią (E) emisji AE z pola źródłowego. Szczegółowo przedstawiono względnie prosty estymator energii emitowanej w określonym przedziale czasu z frontu eksploatowanej ściany, na podstawie obserwowanych wartości EU , bez lokalizacji źródeł AE.

Przyjęty model i metoda umożliwiły zbudowanie programu, który rozwiązuje zarówno „proste (symulacyjne) zadanie sejsmoakustyki” (tzn. oblicza wartości EU , gdy jest dana energia E oraz współczynnik γ absorpcji energii w pokładzie), jak i „odwrotne zadanie sejsmoakustyki” (tzn. oblicza energię E emitowaną z pola emisji oraz współczynnik γ absorpcji w pokładzie gdy dane są wartości EU).

To właśnie niewymagający lokalizacji sposób oszacowania energii AE na podstawie rutynowych obserwacji standardową aparaturą – sposób, który ponadto umożliwia oszacowanie wartości γ jako dodatkowego wskaźnika stopnia spękania (a pośrednio i naprężenia) górotworu – czyni przedstawioną metodę niezwykle wygodną i tanią.

W końcowej części artykułu przedstawiono przykładowe wyniki estymacji na podstawie obserwacji AE z kopalni.

Estimation of the seismo-acoustic energy and the coefficient of its absorption in the seam ahead of the front of extracted longwall

Abstract

The paper presents a detailed description of relations between the so called conventional energy (EU) and stream (e^*) of wavefield energy in a geophone neighbourhood. Conditional – depending on emission model – relations between the e^* and, crucial in applications, emission energy (E) from an emission field, are analysed too. Relatively simple estimator of E , feasible without AE source location, is introduced.

Model and a numerical method make it possible to write down the computer program which solves both the appropriately defined simple and inverse problems of mining seismoacoustics.

As the method can – conditionally on the model – estimate emission energy and the absorption (in front of the longwall) coefficient (γ) applying only the results of the routine AE observations, it is cheap and handy in mining applications.

In the final part of the paper, some results of actual (E , γ) estimation with a coal mine data are shown.

WPROWADZENIE

W artykule omówiono zagadnienie estymacji energii emisji sejsmoakustycznej i współczynnika jej absorpcji w pokładzie węgla przed frontem skrawanej ściany.

* Główny Instytut Górnictwa.

Z uwagi na to, że niektóre związane z tematem pojęcia będą się wielokrotnie pojawiały, dla zwięzłości zastosowano skróty: AE – (wszystkie tryby i odmiany słowa) sejsmoakustyka, EU – energia umowna, E – energia (dla zaznaczenia kontrastu czasem zwana „fizyczną”), e^* – strumień energii. Inne skróty i symbole objaśniono w miejscu występowania.

Sejsmoakustyka jest jedną z metod stosowanych w polskim górnictwie do oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego indukowanego eksploatacją, które jest kojarzone zazwyczaj z zagrożeniem tąpnięciami – choć nie jest z nim tożsame. Zasadniczą zaletą stosowania pojęcia (oraz oceniania i prognozowania) zagrożenia sejsmicznego – zamiast zagrożenia tąpnięciami – jest istnienie ścisłej, ilościowej i konstruktywnej (tzn. umożliwiającej obliczanie i prognozowanie) definicji tej wielkości, o następującej postaci (Kornowski, Kurzeja 2008).

Zagrożenie sejsmiczne, Z^s lub $Z^s[(t, t + \Delta t), S]$, jest to prawdopodobieństwo $Z^s = P\{E^C[(t, t + \Delta t), S] \geq E_g\}$, że całkowita energia sejsmiczna E^C wyemitowana w okresie $(t, t + \Delta t)$ z obszaru S , przekroczy wartość graniczną E_g zwaną „progiem bezpieczeństwa” lub „elementarną energią tąpnięcia” (Konopko 1994).

Gdy $S \rightarrow 0$ oraz $\Delta t \rightarrow 0$ to tak zdefiniowane zagrożenie Z^s staje się zagrożeniem wystąpienia zdarzenia $E > E_g$ w chwili t w punkcie S , lecz jak argumentują Kornowski i Kurzeja (2008), przejście graniczne ($S \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$) jest teoretyczne, którego nie poleca się stosować, ograniczając prognozy do obszaru ściany i okresu godziny lub skrawu, lub zmiany.

W definicji tej występuje pojęcie energii E^C całkowitej emisji sejsmicznej z ustalonego obszaru (np. ściany S) w ustalonym okresie (np. od t do $t + \Delta t$). W związku z tym, że energię całkowitą, E^C oblicza się jako sumę energii wstrząsów E^w i energii zdarzeń sejsmoakustycznych E^{AE} , to podstawowym warunkiem obliczalności E^C jest addytywność E^w i E^{AE} , co oznacza, że muszą to być identyczne wielkości fizyczne i muszą być wyrażone w tych samych jednostkach. Tymczasem powszechnie przyjmuje się, że E^w energia wstrząsów jest energią wyrażoną w dżulach, podczas gdy obecnie działające systemy obserwacyjne AE informują użytkownika o wartości EU tak zwanej energii umownej, która nie ma wymiaru energii.

W niniejszym artykule przedstawiono uzasadnienie i wyprowadzenie estymatora energii fizycznej E^{AE} zbiorów zdarzeń AE wyrażonej w dżulach. Estymator ten umożliwia obliczanie E^{AE} na podstawie rutynowych obserwacji AE zarówno w przypadku źródeł zlokalizowanych (rozd. 1.2), jak i – co znacznie ważniejsze w stosowaniu – bez lokalizacji źródeł, gdy energia umowna EU (z danej ściany) jest kumulowana w ustalonych okresach. W rozdziale 2 opisano metodę równoczesnej estymacji E^{AE} oraz współczynnika absorpcji energii fal γ , w pokładzie przed frontem ściany, co ma podstawowe znaczenie dla jakości wyników. Aby ograniczyć złożoność analiz pominięto zagadnienie zależności badanych wielkości od częstotliwości.

Przedstawiony w rozdziałach 1.2 i 1.3 estymator energii generuje jedną, jednoznacznie określoną, ocenę energii emitowanej z tak zwanego pola emisji (Kornowski, Kurzeja 2008) – którym jest otoczenie frontu ścianowego – jeśli tylko liczba geofonów zastosowanych do obserwacji tej ściany jest większa od 1. Stanowi to (przybliżone oczywiście) rozwiązanie jednego z najpoważniejszych problemów sejsmoakus-

tycznej oceny zagrożenia, powstającego zawsze, gdy z N geofonów otrzymuje się, w tym samym czasie, N ocen zagrożenia i nie wszystkie są zgodne.

1. ESTYMACJA ENERGII AE

1.1. Pojęcia, definicje i zależności podstawowe

Cechą specyficzną zagadnienia estymacji energii AE, odróżniającą je od analogicznego zadania sejsmologii górniczej **jest brak lokalizacji źródeł AE**. Wyklucza to możliwość bezpośredniego stosowania – do oceny energii AE – równań znanych z sejsmologii.

W celu uproszczenia założono, że aparatura pracuje w tzw. obszarze stałego wzmocnienia (Kornowski 2002; Kornowski, Kurzeja 2008), w którym charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa jest w przybliżeniu płaska, zatem wzmocnienie nie zależy od częstotliwości. W przypadku sygnałów AE, których widmo i amplituda mieszczą się w obszarze stałego wzmocnienia aparatury, **odpowieź napięciowa $u_G(t)$ jednoskładowego geofonu jest proporcjonalna do poosiowej składowej** (rys. 1c) $v_\beta(t)$ – **indeks β wskazuje, że to składowa poosiowa – prędkości $v(t)$ drgań cząstek ośrodka**, z którym geofon ten ma sztywny kontakt

$$u_G(t) = k^G v_\beta(t), \text{ V} \quad (1)$$

gdzie: $v_\beta = v \cdot \cos\beta$, $\cos\beta$ to teoretyczna „charakterystyka kierunkowa” geofonu, natomiast k^G , V·s/m, to czułość geofonu (lub wzmocnienie amplitudy sygnału wejściowego $v_\beta(t)$ przez geofon).

Elementarne (i znane) równania określające strumień e^* energii i wiążące go z sygnałem wejściowym $v_\beta(t)$, zestawiono w tablicy 1.

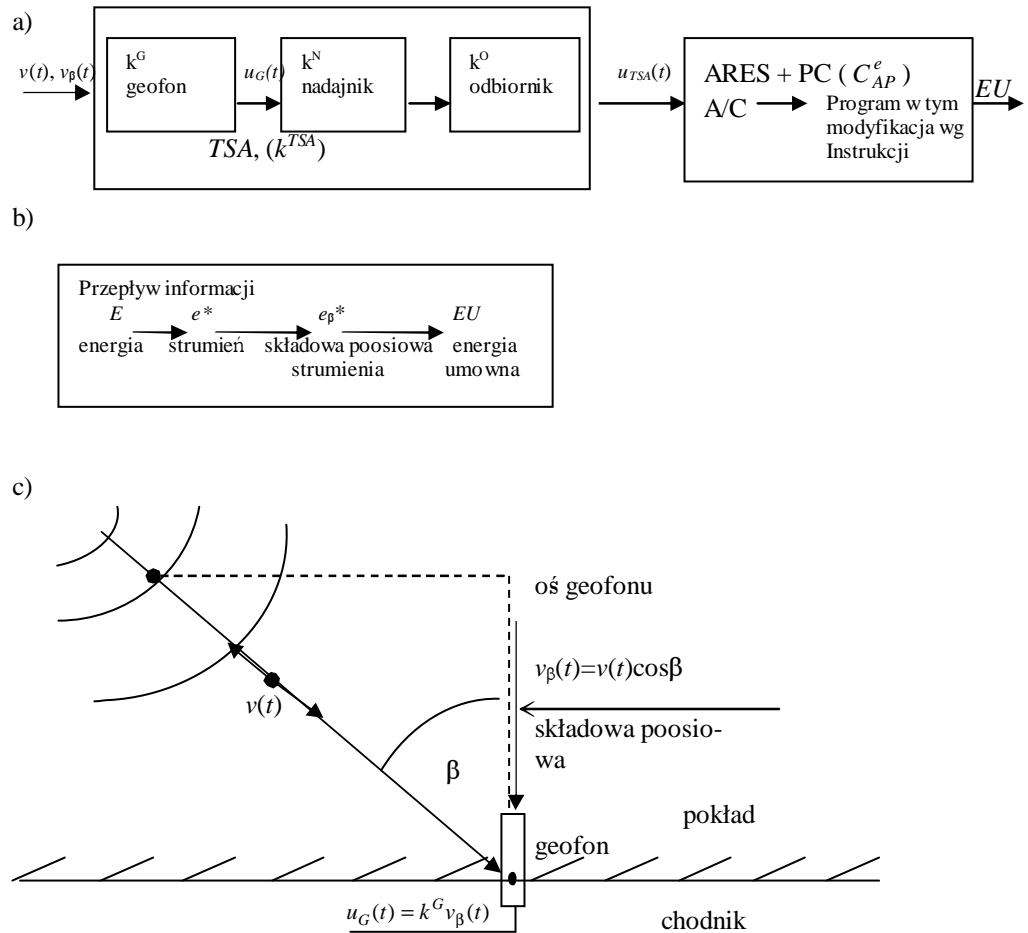
Podnosząc równanie (1) do kwadratu i w miejsce $v_\beta^2(t)$, wstawiając $e^{0*}(t)$, otrzymuje się

$$u_G^2(t) = e_\beta^{0*}(t)(k^G)^2 \quad (4)$$

Równanie (4) ma podstawowe znaczenie w zadaniu pomiaru/oceny energii fal za pomocą aparatury AE; zgodnie z nim kwadrat napięcia na wyjściu geofonu u_G^2 jest proporcjonalny – ze współczynnikiem proporcji $(k^G)^2$ – do e_β^{0*} , poosiowej składowej unormowanego strumienia energii pola falowego w otoczeniu geofonu.

Wśród wielkości fizycznych związanych z energią sejsmiczną tylko wielkość e_β^{0*} jest bezpośrednio mierzalna za pomocą jednoskładowego geofonu. Wszystkie parametry określające źródło, w tym energia E źródła, mogą być tylko („warunkowo”) estymowane, a wyniki estymacji zależą od przyjętego modelu zjawiska i ośrodka.

Współczynnik $(k^G)^2$ jest nazywany „wzmocnieniem energetycznym” geofonu.



Rys. 1. Uproszczony schemat przepływu sygnału w czasie pomiaru AE (a), schemat przepływu informacji o energii (b) oraz szkic ilustrujący pojęcie „składowej poosiowej” (c); konstrukcja geofonu umożliwia drgania uzwojenia tylko wzdłuż osi geofonu, stąd reaguje on tylko na składową poosiową drgań

Fig. 1. Diagram of a signal flow in a seismoacoustic measurement and transmission line (a), diagram of information flow (b) and sketch illustrating the notion of „axial component” (of P-wave) (c); geophone design allows only coaxial oscillations of the coil, so that it reacts only to the axial component of the wave

Należy zauważyć, że w odróżnieniu od $e^{0*}(t)$ i $e_{\beta}^{0*}(t)$ wielkości e^{0*} i e_{β}^{0*} mają wymiar metra kwadratowego na sekundę.

Jeżeli sygnał napięciowy $u_{TSA}(t)$ jest mierzony na wyjściu toru TSA to, analogicznie do równania (4), lecz z indeksem TSA, zamiast G i całkując od 0 do T , można zapisać

$$\int_0^T u_{TSA}^2(t) dt = (k^{TSA})^2 e_{\beta}^{0*} \quad (5)$$

Tablica 1. Równania określające strumień e^* energii i jego unormowaną ($e^{0*} = e^*/\rho V$) postać, w zależności od sygnału v_β na wejściu geofonu (wszystkie całki określone w przedziale od 0 do T , gdzie T jest czasem trwania sygnału)

Chwilowa wartość strumienia energii		Skumulowana wartość strumienia energii	
$e^*(t) = \rho v^2(t)$	(2a)	$e^* = \rho V \int v^2(t) dt$	(3a)
$e^{0*}(t) = (V\rho)^{-1} e^*(t)$	(2b)	$e^{0*} = (\rho V)^{-1} e^*$	(3b)
$e^{0*}(t) = v^2(t)$	(2c)	$e^{0*} = \int v^2(t) dt$	(3c)
$e_\beta^*(t) = e^*(t) \cos^2 \beta$	(2d)	$e_\beta^* = \rho V \int [v(t) \cos \beta]^2 dt$	(3d)
$e_\beta^{0*}(t) = (v_\beta(t))^2$	(2e)	$e_\beta^{0*} = \int v_\beta^2(t) dt$	(3e)
$e_\beta^{0*}(t) = e^{0*}(t) \cos^2 \beta$	(2f)	$e_\beta^{0*} = \int v^2(t) \cos^2 \beta dt$	(3f)

gdzie $(k^{TSA})^2$ jest „wzmocnieniem energetycznym” toru (TSA). Z uwagi na to, że między wyjściem TSA a użytkownikiem jest komputer, należy pamiętać o „stałej aparaturowej” C_{AP}^e (modyfikującej energię), co powoduje przekształcenie (5) do postaci

$$\int_0^T u_s^2(t) dt = (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_\beta^{0*} \quad (6)$$

gdzie $u_s(t)$ jest sygnałem w komputerze odczytywanym przez oprogramowanie. Jeżeli obliczenia są prowadzone zgodnie z Instrukcją nr 20 (2007) metody AE, to należy pamiętać też o modyfikacji czynnikiem $d/[50 \cdot (k'')^2]$, przy czym w niniejszym artykule zastosowano symbol k'' , aby zaznaczyć, że – nie jest to prawdziwe wzmocnienie toru, działające poza świadomością obsługi lecz – jest to (k'') liczba okresowo wprowadzana do systemu, przez obsługę, i niekoniecznie $k'' = k^{TSA} \equiv k'_{500}$. Na przykład w wielu Stacjach Tępań, gdy $k'_{500} \approx 2,5 \cdot 10^4$, to wprowadza się $k'' = 2,5$ (co autorzy uważają za poprawną obsługę systemu), lecz są możliwe i inne niezgodności. Biorąc to pod uwagę można zapisać

$$\frac{d}{50(k'')^2} \int_0^T u_s^2(t) dt = \frac{d}{50(k'')^2} (k^{TSA})^2 C_{AP}^e e_\beta^{0*} \quad (7)$$

Lewą stronę tego równania oznacza się symbolem EU i nazywa ENERGIĄ UMOWNĄ odczytywaną z komputerowego wyjścia systemu AE na odpowiednim kanale. Tak więc

$$EU = \frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e e_\beta^{0*}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (8)$$

gdzie d jest odległością geofonu od ściany, $C_{pb} = k^{TSA}/k''$ (i zazwyczaj $C_{pb} = 10^4$), zatem EU , tak jak e^{0*} , ma wymiar metra kwadratowego na sekundę.

Równanie to określa związek między e_{β}^* poosiową składową strumienia energii fal w otoczeniu czujnika a wielkością EU , zwaną potocznie energią umowną, odczytywaną z komputerowego wyjścia aparatury sejsmoakustycznej.

1.2. Źródło punktowe w pokładzie i estymacja jego energii

Najprostszym przypadkiem estymacji energii źródłowej jest źródło punktowe. Jeżeli źródło takie, emitujące energię E (energię sejsmiczną utożsamianą z energią dalekiego pola fal), wystąpi w pokładzie węgla o miąższości h w znanej odległości r od geofonu, to strumień e^* energii (w otoczeniu geofonu) jest określony równaniem

$$e^* = (\pi rh)^{-1} \exp(-\gamma r) E, \text{ J/m}^2 \quad (9)$$

gdzie $\gamma = 2\alpha$ [m^{-1}] jest współczynnikiem absorpcji energii fal przez górotwór (natomiast α to współczynnik tłumienia amplitudy fal), a energia E „rozkłada się” na powierzchni walca ($S = \pi rh$), którego środek jest źródłem (w pobliżu frontu ściany, stąd πrh , a nie $2\pi rh$) tak, że dla $\gamma = 0$, w sposób jawny jest spełniona zasada zachowania energii. Wyznaczając e^* z (3b), wstawiając do (9) i mnożąc obustronnie przez $\cos^2\beta$, otrzymuje się

$$e_{\beta}^{0*} = (\rho V)^{-1} (\pi rh)^{-1} \cos^2\beta \exp(-\gamma r) E \quad (10)$$

a mnożąc to obustronnie przez $dC_{pb}^2 C_{AP}^e / 50$ można zapisać

$$(d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e e_{\beta}^{0*} = (d/50) C_{pb}^2 C_{AP}^e (\rho V \pi rh)^{-1} \cos^2\beta \cdot \exp(-\gamma r) E \quad (11)$$

Z uwagi na to, że [zgodnie z (8)] lewa strona (11) to energia umowna EU , to jeżeli wyidealizowaną charakterystykę kierunkową ($f_k(\beta) = \cos\beta$) zastąpi się jej wersją realistyczną ($f_k(\beta) = 0,9(0,111 + \cos\beta)$) (Komowski 2002, rozdz. 5.2.3) – otrzyma się:

$$EU = C_2 d \cdot (rh)^{-1} (0,111 + \cos\beta)^2 \exp(-\gamma r) E \quad (12)$$

$$C_2 = (C_{pb}^2 C_{AP}^e \cdot 0,81) / (50\pi\rho V) \quad (13)$$

i to jest równanie wiążące energię umowną EU – odczytywaną na wyjściu aparatury sejsmoakustycznej w Stacji Tapań – z energią sejsmiczną E [J] punktowego źródła w pokładzie, w **znanej** odległości r od geofonu i dla znanej wartości współczynnika γ absorpcji energii w pokładzie. Warunek znanej odległości r oznacza konieczność lokalizacji źródeł (ze wszystkimi problemami dotyczącymi czasu pierwszych wejść itp.) przed przystąpieniem do obliczania energii.

Jeżeli więc $r \approx d$ oraz pominie się tłumienie (przyjmując $\gamma = 0$) i kierunkowe właściwości geofonu, to w pokładzie o stałej miąższości h otrzymuje się oszacowanie

$$EU = \text{const} E \quad (14)$$

gdzie wartość stałej (const) zależy od pokładu i aparatury, może więc być oszacowana w ustalonych warunkach. Taka była właśnie motywacja autorów pierwszej wersji In-

strukcji metody AE (Cianciara i in. 1988) i dłatego (wzorem sejsmologii górniczej, gdzie „redukcja na kulę” o ustalonym promieniu była wówczas stosowana) wprowadzono czynnik $d/(k^2 \cdot 50)$.

Równanie (14) dotyczy źródła punktowego, o znanym, zawsze tym samym położeniu ($r = d$ – brak zależności kierunkowej), obserwowanego w ośrodku pozbawionym absorpcji ($\gamma = 0$), geofonem bez właściwości kierunkowych.

Niestety, w przypadku zastosowania sejsmoakustyki źródła nie są lokalizowane, energia EU jest kumulowana w dłuższych okresach czasu, górotwór niewątpliwie pochłania energię fal, a pominięcie właściwości kierunkowych geofonu okazało się poważnym źródłem błędów.

Podsumowując, można stwierdzić, że próby estymacji energii źródła punktowego źle rokują, dopóki nie zostanie rozwiązane, w mniej lub bardziej poprawny sposób, zagadnienie lokalizacji źródeł. Opisany sposób oceny energii stał się, wskutek wprowadzenia „energii umownej”, źródłem nieporozumień, powinien więc być zaniechany i zastąpiony nowym, logicznie spójnym i fizycznie poprawnym sposobem. Taki właśnie sposób estymacji energii – bez lokalizowania źródeł – jest przedmiotem następnego rozdziału.

1.3. Pole emisji i energia emisji

Przedstawione w rozdziale 1.2 równania, umożliwiające estymację energii, dotyczą przypadku źródeł punktowych. Jest to podstawowy model obserwacji sejsmologicznych przyjęty z sejsmologii do sejsmoakustyki. Dzisiejszy stan metody sejsmoakustycznej (do oceny stanu zagrożenia sejsmicznego), gdy **zdarzenia AE nie są lokalizowane, a przedmiotem analiz jest między innymi energia** – nie pojedynczych zdarzeń, lecz – **skumulowana w kolejnych przedziałach (Δt) czasu**, skłania jednak do zbadania i zastosowania innego, znacznie bardziej (w przypadku AE) realistycznego modelu, który opisano poniżej. Założono więc przede wszystkim, że:

- **jest obserwowana energia umowna emisji $EU(\Delta T_i)$ skumulowana w – być może nieidentycznych i nieciągłych – jednostkach ΔT_i czasu, zgodnych z czasem trwania i -tego skrawu w badanej ścianie.**

Gdy założenie to jest spełnione, to kombajn, w każdej i -tej jednostce czasu ΔT_i , „odwiedza” wyłącznie raz każdy „elementarny odcinek” ściany (dx na rys. 2) i żaden punkt ściany nie jest przez kombajn „wyróżniony”. Jeżeli warunki geologiczne i naprężeniowe są, wzdłuż frontu ściany i w czasie danego skrawu, stałe lub losowo zmienne, oscylując wokół pewnej średniej, to wpływ pracy kombajnu na emisję AE może być pominięty. Sytuacja się nie zmieni, gdy model zostanie uogólniony, dopuszczając, że ΔT_i obejmuje zawsze kilka pełnych skrawów – na przykład gdy ΔT_i to i -ta zmiana wydobywcza (o ile wykonano pełną liczbę skrawów).

Z uwagi na to, że w metodach oceny stanu zagrożenia, realizacji których służy sejsmoakustyka, z reguły ściana jest traktowana jako pewna całość, można też założyć, że:

- energia AE pochodzi z całego frontu („czoła”) ściany i e_0^* [J/m²], strumień lub „elementarna” energia emitowana z 1 m² w okresie ΔT_i jest – na całym froncie długości L i wysokości h – wielkością losową

$$e_{0i}^*(\Delta T_i, x, y, z) = \bar{e}_{0i}^* \zeta_i \quad (15)$$

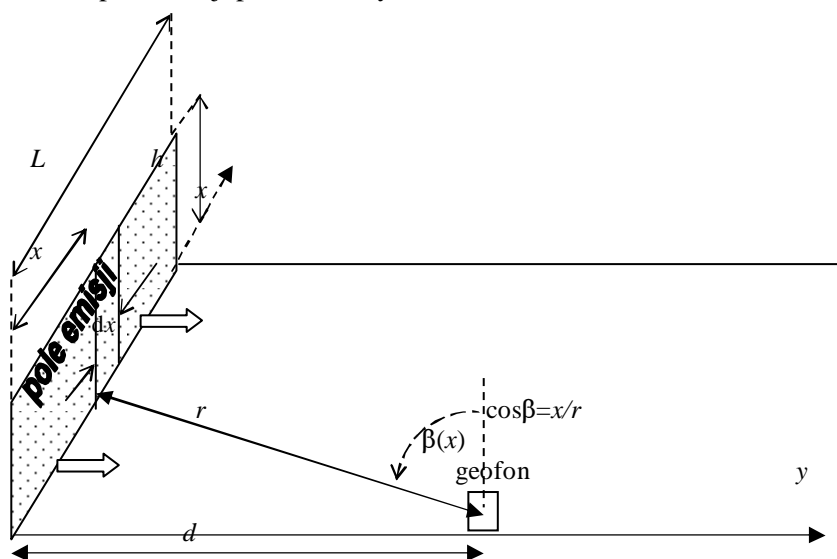
gdzie: $\log \zeta_i \approx N(0, \sigma^2)$ (16)

Założenie to zapewnia, że wielkość e_{0i}^* , choć losowa, jest zawsze nieujemna i, że w okresie ΔT_i jej wartość średnia \bar{e}_{0i}^* jest stała na całym froncie (zatem jest tylko jeden stan zagrożenia dla tej ściany) choć zmieniać się może wraz z i , czyli z postępowaniem ściany oraz zapewnia, że w okresie ΔT_i

$$E_i = \bar{e}_{0i}^* Lh \quad (17)$$

W dalszym tekście indeks i , oznaczający numer jednostki czasu lub skrawu, będzie pomijany.

Wielkość e_0^* to strumień emitowanej (z 1 m² frontu ścianowego, w okresie ΔT) energii, a \bar{e}_0^* to jego wartość średnia. Front ściany, z którego pochodzi e_0^* , jest nazywany **połem emisji**. Równania (15) i (16) definiują losowe („stochastyczne”) pole emisji o jednostajnym (na powierzchni frontu ściany $S = Lh$, rys. 2) rozkładzie strumienia emitowanej (w ΔT) energii, $\bar{e}_0^* = \text{const}$. Wielkości występujące w opisie AE z pola emisji podano na rysunku 2.



Rys. 2. Szkic ilustrujący sytuację podczas pomiaru AE z pola emisji (którym jest front ściany) oraz pojęcia i symbole stosowane do opisu modelu

Fig. 2. Emission field in a longwall and symbols applied in the model description

Jeżeli wprowadzi się układ współrzędnych (x, y) , jak na rysunku 2, z osią x równoległą do frontu ścianowego, to dla każdego elementarnego odcinka ściany ($\Delta x \rightarrow dx$) wysokości h , stosuje się równania (12), (13) jak do źródła punkowego i dla całej ściany otrzymuje się energię umowną EU obserwowaną za pomocą geofonu (w odległości r) i pochodzącą z całej ściany

$$EU = h \int_0^L \bar{e}_0^* C_2 d (rh)^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (18)$$

lub równoważnie

$$EU = \bar{e}_0^* C_2 d \cdot I(L, d, \gamma) \quad (19a)$$

$$I(L, d, \gamma) = \int_0^L r^{-1} \exp(-\gamma r) (0,111 + x/r)^2 dx \quad (19b)$$

gdzie:

$$r^2 = x^2 + d^2,$$

C_2 jest określone równaniem (13),

$\cos\beta$ zapisano na podstawie rysunku 2, jako x/r ,

d – odległość geofonu od skrzyżowania,

$$C_{pb} = k^{ISA}/k'.$$

Z równania (19a) można wyznaczyć średni strumień emitowany w jednostce ΔT czasu

$$\bar{e}_0^* = EU (C_2 d \cdot I(L, d, \gamma))^{-1} \quad (20)$$

i mnożąc obie strony równania (20) przez Lh otrzymuje się równania podane w tabelicy 2, gdzie E [J], to energia emitowana z pola emisji (tzn. z frontu ściany) w jednostce ΔT czasu, EU to energia umowna, w równaniu (21a) odczytywana z komputera na wyjściu systemu (np.) ARES w kopalnianej Stacji Tapań (a w równaniu (21b) estymowana na podstawie modelu i wymuszenia E), C_2 to stała, zależna od aparatury i cech pokładu (typowo $C_2 = 187,3131$) a całka $I(L, d, \gamma)$, określona w (19b), musi być obliczana numerycznie dla danych wartości (L, d, γ) . Czynniki $(d/50)$, zachowany w równaniu (23), aby sposób obserwacji pozostał zgodny z obecnie stosowaną Instrukcją, jest (w tym modelu) całkowicie zbędny. W publikacji (Kurzeja, Kornowski 2009) wykazano na przykładach, że pominięcie charakterystyki kierunkowej i absorpcji (jak ma to miejsce obecnie, patrz p. 1.2) może powodować nawet 50-krotne zaniżenie oszacowania emitowanej energii AE.

Przedstawiony model pola emisji i związany z nim estymator energii emitowanej z tego pola, pozwala wreszcie na zaniechanie stosowania niefizycznej energii umownej, zastępując EU energią E , wyrażoną w dżulach, obliczoną na podstawie rutynowych obserwacji AE z zastosowaniem standardowej aparatury (np. ARES), bez lokalizowania źródeł. Model ten – jak podano w p. 2 – umożliwia równoczesną estymację emitowanej energii oraz współczynnika absorpcji γ , co ma w zastosowaniu zna-

czenie zasadnicze i co stanowi praktyczne rozwiązanie jednego z najpoważniejszych problemów sejsmoakustyki górniczej.

Tablica 2. Zestawienie równań wiążących energię umowną EU , rejestrowaną w jednostce czasu na wyjściu komputerowego systemu obserwacyjnego, z energią E emitowaną z frontu ściany

Odwrotna relacja tłumienia energii AE emitowanej z pola emisji	$E = \frac{Lh}{C_2 d \cdot I(L, d, \gamma)} EU$ (21a)	$E = (W^e)^{-1} EU$ (22a)
Prosta relacja tłumienia energii AE emitowanej z pola emisji	$EU = C_2 \frac{d \cdot I(L, d, \gamma)}{Lh} E$ (21b)	$EU = W^e EU$ (22b)
Uogólnione wzmocnienie energii AE	$W^e = \left[\frac{0,81}{\pi} \frac{I(L, d, \gamma)}{Lh\rho V} \right] \left[\frac{d}{50} C_{pb}^2 C_{AP}^e \right]$ (2.23)	

2. RÓWNOCZESNA ESTYMACJA ENERGII E I WSPÓŁCZYNNIKA ABSORPCJI γ , BEZ LOKALIZOWANIA OGNISK

W przypadku obserwacji AE za pomocą $N > 1$ geofonów, równanie (21b) przekształca się w układ równań o postaci

$$EU(i) = C_2 \frac{d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)}{Lh} E, \quad i = 1 \dots N \quad (24)$$

który – w bardzo realistycznym przypadku, gdy wartość γ nie jest znana – należy „rozwiązać”, względem niewiadomych (E, γ) (znając wartości $EU(i), d(i), L, h, C_2$), za pomocą odpowiedniego programu komputerowego, znajdując takie wartości (E, γ), dla których suma błędów kwadratowych osiąga minimum.

W języku matematycznym mówi się, że należy znaleźć wartości (E, γ) optymalizujące przyjętą miarę jakości

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left\{ E \frac{C_2 d(i) I(L, d(i), \gamma)}{Lh} - EU(i) \right\}^2 \quad i = 1 \dots N \quad (25)$$

gdzie $I(L, d(i), \gamma)$ jest określone równaniem (19c), a C_2 – równaniem (13). Należy powtórzyć, że $I(L, d, \gamma)$ jest „nieelementarną” całką, która musi być obliczana numerycznie i że jedna z niewiadomych (współczynnik absorpcji γ) występuje wewnątrz funkcji podcałkowej.

Danymi wejściowymi do programu liczącego E i γ są:

- wartości $EU(i)$ energii umownej, odczytane z komputerowego wyjścia systemu obserwacji AE, z co najmniej dwóch kanałów obserwujących daną ścianę,
- aktualne odległości $d(i)$ tych geofonów od skrzyżowania,

- wartości L (długość ściany, m), h (wysokość ściany, m) oraz C_2 , która (np.) dla aparatury ARES-5/TSA i dla pokładu, gdzie $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$ i $V = 1800 \text{ m/s}$, ma wartość 187,3131.

W przypadku ogólnym $C_{pb} = k^{TSA}/k''$, gdzie k^{TSA} to wzmocnienie toru TSA (w Instrukcji metody AE oznaczone k'_{500}), a k'' to wzmocnienie TSA deklarowane przez obsługę systemu. Zazwyczaj $k^{TSA}/k'' = 10^4$, $C_{AP}^e = 850$ dla aparatury ARES-5, dla innych typów aparatury wartość tę należy zmierzyć – uśrednione wartości podano w książce (Kornowski, Kurzeja 2008).

Zagadnienia obliczeniowe nie są przedmiotem tego artykułu, więc je pominięto. Aby zorientować Czytelnika w zakresie wartości energii (E^{AE} [J]) i współczynnika absorpcji ($\gamma = 2\alpha$, [m^{-1}], gdzie α jest współczynnikiem tłumienia amplitudy fal), które występują w praktyce, w tablicy 3 pokazano – dla ośmiu kolejnych godzin obserwacji jednej ze ścian w kopalni „Wesoła” z pomocą dwu geofonów – rejestrowane wartości energii umownej $\{EU_1(i), EU_2(i), i = 1 \dots 8\}$ i odpowiadające im estymowane opisaną poprzednio metodą (i filtrowane prostym filtrem dolnoprzepustowym) wartości $\{E(i)$, [J] oraz $\gamma(i)$ [m^{-1}], $i = 1 \dots 8\}$.

Tablica 3. Przykładowe wartości energii umownej (EU) oraz odpowiadające im wartości E i współczynnika absorpcji γ , w przypadku obserwacji za pomocą dwu geofonów jednej ze ścian w kopalni „Wesoła”

i	$EU_1(i)$	$EU_2(i)$	$E(i)$, J	$\gamma(i)$, m^{-1}
1	16	10	1,88	0,0108
2	23	5	2,45	0,0135
3	14	27	3,84	0,0118
4	29	7	3,41	0,0141
5	66	4	9,27	0,0186
6	137	22	29,91	0,0211
7	240	97	74,66	0,0209
8	514	52	136,30	0,0243

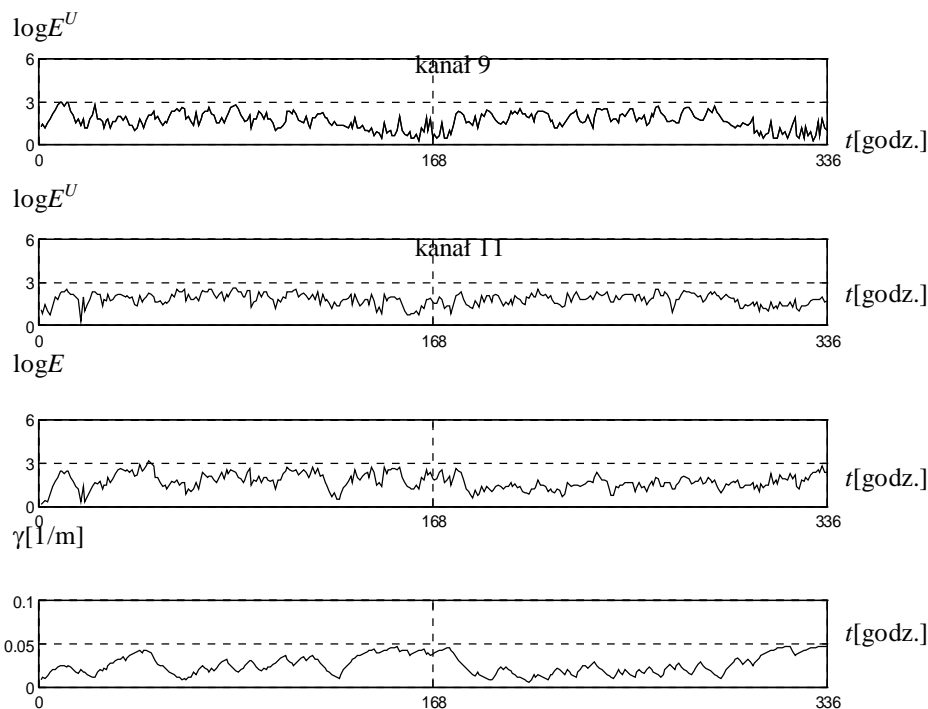
O wynikach tych można powiedzieć, że są jednoznaczne, stabilne i realistyczne (tzn. wartości γ są typowe i zbliżone do wartości otrzymywanych w bezpośrednich pomiarach tłumienia) oraz przedstawiają bezproblemowe działanie estymatora (2). Z uwagi na to, że w zagadnieniu występują dwie niewiadome (E oraz γ), a obserwacje prowadzono za pomocą dwu geofonów, żadna ocena błędu pomiaru nie jest możliwa.

Graficzny przykład dwutygodniowych (godzinowych) obserwacji $EU_1(i)$, $EU_2(i)$, $i = 1 \dots 336$ i odpowiadających im wyników estymacji $E(i)$, $\gamma(i)$ – energii emitowanej z frontu ściany w godzinowych przedziałach czasu oraz efektywnego współczynnika absorpcji przed frontem ściany – pokazano na rysunku 3 dla przypadku ściany 37 w kopalni „Wesoła”, obserwowanej (w tym czasie) za pomocą dwóch geofonów. W celu ułatwienia werbalnego opisu przyjęto, że rysunek 3 składa się z czterech „linii”. Na osiach poziomych zawsze jest czas w godzinach, 336 godzin to dwa tygodnie. Dwie górne linie przedstawiają wartość logarytmu energii umownej, w linii trzeciej przedstawiono logarytm energii emitowanej z frontu ściany, w linii czwartej pokazano wartość γ współczynnika absorpcji energii ($\gamma = 2\alpha$, gdzie α to współczynnik tłumienia amplitudy) w pokładzie, przed frontem ściany. Wartości energii emitowanej

z frontu ściany oscylują w przedziale $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$ J, wartości współczynnika γ – w przedziale $0,01 - 0,05$ m^{-1} .

Warto dodać, że sekwencyjna, automatyczna estymacja współczynnika absorpcji przed frontem skrawanej ściany bywa nazywana – może nieco na wyrost – tomografią tłumieniową i może stać się kolejnym elementem nowej metody oceny zagrożenia sejsmicznego.

Rozdzielczość takiej tomografii w dziedzinie czasu jest nadzwyczajna (wynika z częstości obserwacji AE), rozdzielczość przestrzenna wynika z liczby parametrów występujących w modelu, zatem z liczby geofonów stosowanych do obserwacji sejsmoakustycznej.



Rys. 3. Przykład dwutygodniowej obserwacji $EU_1(t)$, $EU_2(t)$ energii umownej i wyników estymacji emitowanej energii oraz współczynnika tłumienia; energię przedstawiono na skali logarytmicznej

Fig. 3. Two-weeks of AE observation and processing: input data (two upper lines) and estimated values of emission energy (third line) and absorption coefficient (lowest line); energies on log scale, horizontal axes scaled in hours

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Prognozowanie zagrożenia sejsmicznego Z^S – w szczególności znaną metodą prognozy liniowej – (Kornowski 2003; Kurzeja 2005; Kornowski, Kurzeja 2008) wymaga obliczania energii całkowitej E^C , która jest sumą energii E^w wstrząsów i energii E^{AE} AE, a warunkiem sumowania jest addytywność tych wielkości. Konieczne jest więc liczenie („fizycznej”, a nie „umownej”) energii (E^{AE}) AE (z tego samego okresu

i w przybliżeniu z tego samego obszaru co E^w), także wyrażonej w dżulach. Obliczenia te muszą być wykonywane na podstawie rutynowych rejestracji energii umownej EU i bez lokalizowania ognisk AE. Sposób rozwiązania tego zadania opisano w niniejszym artykule.

Najważniejsze wnioski wynikające z opisanych analiz można sformułować następująco:

1. Estymacja wielkości opisujących źródła lub parametrów emisji źródłowej (w tym energii E^{AE}), zawsze wymaga – oprócz obserwacji EU – silnych założeń do modelu źródła lub pola źródłowego i ośrodka. **W tym sensie jest możliwa tylko warunkowa estymacja energii E^{AE} , a jakość tej estymacji zawsze zależy od jakości modelu.**
2. Nawet w najprostszym przypadku źródła punktowego o znanej lokalizacji (x, y, z), założenia dotyczące modelu są konieczne: sam punktowy charakter źródła jest jednym z takich założeń. Dla przypadku tego równania (12) wiąże E z EU , a w przypadku obserwacji wieloczuJNIKOWYCH układ równań typu (12) umożliwia estymację wartości E oraz γ .
3. Równania (22a, b) wiążą obserwowane wartości EU z E^{AE} , energią emitowaną w ustalonej jednostce czasu z pola emisji na froncie eksploatowanej ściany, bez konieczności lokalizowania ognisk AE.
4. **Optymalizacja zadania (2) umożliwia** – na podstawie wartości EU z N czujników (w okresie Δt obserwujących obszar S ściany) – **estymację energii („fizycznej”) E^{AE} oraz współczynnika γ absorpcji bez lokalizowania ognisk AE; stanowi więc warunkowe rozwiązanie odwrotnego zadania sejsmoakustyki górniczej.**
5. Zwiększając liczbę geofonów stosowanych do obserwacji zagrożonej ściany można albo zwiększyć wiarygodność (i zmniejszyć średni błąd) obliczonych wartości E, γ , albo, wprowadzając bardziej złożony model przestrzenny pola emisji, poprawić przestrzenną rozdzielczość metody, traktowanej jako prosta sekwencyjna „tomografia tłumieniowa”.

Praca, na podstawie której napisano niniejszy artykuł, była częściowo finansowana w ramach projektu (MNiSW) R09030030 pt. „Metoda oceny stanu zagrożenia tąpnięciami wyrobisk górniczych w zakładach wydobywających węgiel kamienny”.

Literatura

1. Barański A., Drzewiecki J., Kabiesz J., Konopko W., Kornowski J., Krzyżowski A., Mutke G. (2007): Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa Seria Instrukcje nr 20.
2. Cianciara B., Grzybowski A., Kornowski J., Marczak H., Pilecki Z., Trombik M., Zuberek W. (1988): Instrukcja stosowania metody sejsmoakustycznej do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. Katowice, Wspólnota Węgla Kamiennego.
3. Konopko W. (1994): Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tąpnięciami. Prace Naukowe GIG nr 795.
4. Kornowski J. (2002): Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Katowice, GIG.

5. Kornowski J. (2003): Linear Prediction of Aggregated Seismic and Seismoacoustic Energy Emitted from a Mining Longwall. *Acta Montana ser. A*, No. 22 (129), s. 5–14.
6. Kornowski J., Kurzeja J. (2008): Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Katowice, GIG.
7. Kurzeja J. (2005): Sekwencyjna prognoza energii sejsmicznej generowanej eksploatacją pokładu węgla. *Prace Naukowe GIG nr 867*.
8. Kurzeja J. (2008): Weryfikacja wybranych estymatorów maksymalnych przyspieszeń a_{\max} drgań na powierzchni terenów górniczych na Górnym Śląsku. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi T. 24, z. 2/3*, s. 291–302.
9. Kurzeja J. (2009): Energia emisji sejsmoakustycznej i sejsmologicznej jako podstawa liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa (w druku)*.
10. Kurzeja J., Kornowski J. (2009): Energia emisji, strumień energii i energia umowna w sejsmoakustyce górniczej. *Warsztaty 2009*. Kraków, Wydaw. IGSMiE PAN, s. 142–163.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz

Magdalena Mitera*^{*}

ANALIZA NARAŻENIA PRACOWNIKÓW GÓRNICTwo NA TRWAŁE USZKODZENIA SŁUCHU

Streszczenie

Artykuł dotyczy uszkodzeń słuchu spowodowanych pracą w warunkach szkodliwych – w hałasie. Omówiono w nim narażenie na chorobę zawodową w górnictwie – obustronny trwały ubytek słuchu typu ślimakowego. Porównano narażenie na hałas pracowników w krajach dawnej UE i w nowych krajach członkowskich. Przedstawiono (na podstawie materiałów Instytutu Medycyny Pracy) dane dotyczące zawodowych uszkodzeń słuchu w latach 2004–2007. Porównano narażenie na zawodowy ubytek słuchu w poszczególnych województwach, a także według czasu narażenia na czynnik szkodliwy.

W celu przybliżenia zagadnienia wyjaśniono niezbędne pojęcia z dziedziny hałasu oraz teorię słyszenia. Podano przykładowe wyniki badań audiometrycznych pracowników narażonych na hałas w miejscu pracy. Omówiono metody zapobiegania urazom akustycznym.

Analysis of the exposition of mining workers to permanent damage of hearing

Abstract

The paper presents the hazard related to an occupational disease: bilateral permanent noise-induced hearing loss of cochlear type, amounting to at least 45 dB in better ear as a pure tone average for 1.2 and 3 kHz audiometric frequencies in the mining industry. The data have been presented based on the material obtained from the Institute of Occupational Medicine, relating to the loss of hearing over the years 2004–2007. With the aim to introduce the problem the necessary concepts from the domain of noise and theory of hearing have been presented.

WPROWADZENIE

Z danych dotyczących zatrudnienia w Polsce wynika, że w latach 2004–2007 u ponad 10% pracowników zdiagnozowano zawodowe uszkodzenie słuchu. Większość z tych przypadków dotyczyła robotników zatrudnionych w różnych gałęziach przemysłu, a także rzemieślników. W grupie tej dominowali górnicy oraz robotnicy budowlani, robotnicy z zakładów obróbki metali, mechanicy maszyn i urządzeń, a także robotnicy przemysłu włókienniczego.

Zawodowe uszkodzenie słuchu występuje u znacznie większej liczby zatrudnionych niż wynika to z oficjalnych danych. Przyczyną braku wykrywania uszkodzeń słuchu jest niewiedza i bagatelizowanie problemu przez pracowników, niedokładnie wykonywane badania okresowe, obawa pracodawców przed zaskarżaniem przez pracowników, strach przed utratą pracy.

Należy jednak stwierdzić, że w ostatnich kilku latach sytuacja ta zaczęła ulegać poprawie. Jest to spowodowane zarówno pozytywnymi czynnikami, na przykład dba-

* Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa.

łością o przepisy BHP, jak i czynnikami negatywnymi: pogorszeniem funkcjonowania zakładowej służby zdrowia oraz zmniejszeniem zatrudnienia w górnictwie.

1. HAŁAS W GÓRNICTWIE, TEORIA SŁYSZENIA, USZKODZENIA SŁUCHU

1.1. Hałas, podstawowe parametry

Hałas to wszelkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe, uciążliwe lub szkodliwe drgania ośrodka sprężystego, oddziałujące za pomocą powietrza na narząd słuchu i inne zmysły oraz części organizmu człowieka (Koradecka 1999).

Propagację fali akustycznej w przestrzeni opisują:

- prędkość akustyczna v , m/s;
- ciśnienie akustyczne p , Pa.

Wartość ciśnienia akustycznego stanowi na ogół małą część ciśnienia atmosferycznego. Do obliczania wartości ciśnienia akustycznego, ze względu na szeroki zakres jego zmian, jest stosowana skala logarytmiczna

$$L = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \quad (1)$$

gdzie:

- L – poziom ciśnienia akustycznego;
- p – wartość ciśnienia akustycznego, Pa;
- p_0 – progowa wartość skuteczna ciśnienia akustycznego wynosząca 20 μ Pa.

W celu scharakteryzowania hałasu zmieniającego się w czasie lub zmiennej ekspozycji na hałas stosuje się równoważny poziom dźwięku A $L_{Aeq,T}$. Jest to średnia wartość poziomu dźwięku A zmiennego w czasie, odpowiadająca reakcji narządu słuchu narażonego na działanie hałasu o stałym poziomie, w równoważnym przedziale czasu

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad (2)$$

gdzie:

- T – czas obserwacji, s;
- p_A – wartość chwilowa ciśnienia akustycznego skorygowana, według charakterystyki częstotliwościowej A , Pa.

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do ośmiogodzinnego dnia pracy $L_{EX,8h}$ lub tygodnia pracy $L_{EX,w}$, dany jest wzorami (Koradecka 1999):

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,T_e} + 10 \lg \frac{T_e}{T_o} \quad (3)$$

$$L_{EX,w} = 10 \lg \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{EX,sh})_i} \right] \quad (4)$$

gdzie:

- L_{Aeg,T_e} – równoważny poziom dźwięku A wyznaczony dla czasu ekspozycji T_e ,
 T_o – czas odniesienia, 8 h = 28 800 s,
 i – kolejny dzień roboczy w rozpatrywanym tygodniu,
 n – liczba dni roboczych w rozpatrywanym tygodniu.

Wielkością charakteryzującą dawkę energii akustycznej, przekazanej do organizmu w określonym przedziale czasu, jest ekspozycja na hałas E_{A,T_e} określona wzorem

$$E_{A,T_e} = \int_0^{T_e} p_A^2(t) dt \quad (5)$$

gdzie:

- p_A – wartość chwilowa ciśnienia akustycznego skorygowana według charakterystyki częstotliwościowej A, Pa;
 T_e – czas ekspozycji, s.

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do ośmiogodzinnego dnia pracy lub do tygodnia pracy i odpowiadająca mu dzienna lub tygodniowa ekspozycja na hałas są jednymi z podstawowych wartości służących do oceny skutków narażenia na hałas pracowników w środowisku pracy. Zgodnie z przyjętymi normami, dopuszczalna wartość hałasu wynosi maksymalnie 85 dB przy ośmiogodzinnym dniu pracy.

Efekt biologiczny działania hałasu zależy od ciśnienia akustycznego dźwięku i efektywnego czasu ekspozycji. Zależność ta stanowi podstawę zasady równej energii – zmniejszenie jednego z tych parametrów przy zwiększeniu drugiego powoduje takie same skutki. Zwiększenie poziomu dźwięku o 3 dB oznacza podwojenie energii akustycznej. Ekspozycja 105 dB przez 4,8 min powoduje takie same skutki jak 85 dB przez 8 godzin. Dodatkowymi czynnikami zwiększającymi ryzyko uszkodzenia słuchu jest rodzaj hałasu, a mianowicie:

- wysokie tony – bardziej szkodliwe,
- hałas impulsowy – bardziej szkodliwy,
- czyste tony – bardziej szkodliwe niż szумы,
- bardziej szkodzi hałas ciągły niż ta sama ilość energii rozdzielona przerwami.

1.2. Zagrożenie w górnictwie

Uszkodzenia słuchu są chorobą zawodową często spotykaną w górnictwie. Wynika to z przekroczeń najwyższych dopuszczalnych natężeń hałasu na stanowiskach pracy. Przekroczenia są powodowane przez stosowanie maszyn i urządzeń o coraz większych mocach, a także przestarzałym parkiem maszynowym.

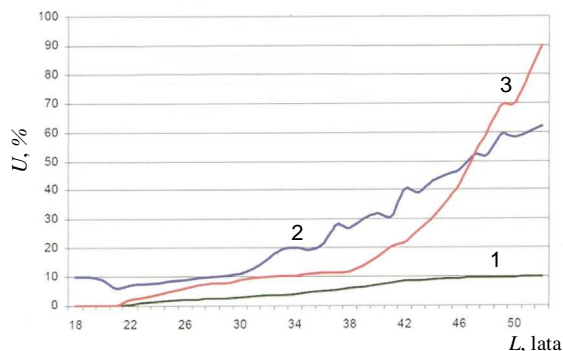
Narażenie pracowników na hałas jest znacznie mniejsze w krajach „starej” Unii Europejskiej (UE-15) niż w nowych krajach członkowskich (UE-12) – tablica 1.

Tablica 1. Narażenie pracowników krajów UE na różne zagrożenia w porównaniu z zagrożeniem hałasem (Kompala, Świder 2009)

Zagrożenie	UE-15, %	UE-12, %
Hałas	11	18
Wibracje	11	13
Wysoka temperatura	6	9
Zanieczyszczenie powietrza	9	14
Promieniowanie	2	3

Pracownicy UE-15 są lepiej poinformowani o potencjalnych zagrożeniach występujących na stanowisku pracy; korzystają również z lepszej ochrony osobistej.

W krajach UE-12 znacznie częściej pracownicy odczuwają zagrożenie zdrowia i bezpieczeństwa z racji wykonywanej pracy. Dla przykładu na rysunku 1 przedstawiono zależność ubytku słuchu od wieku pracownika.



Rys. 1. Ubytek słuchu U u pracowników górnictwa węgla kamiennego i innych surowców w porównaniu z grupą nigdy nienarażoną na hałas w zależności od wieku; pracownicy: 1 – nienarażeni na hałas, 2 – górnictwa węgla kamiennego, 3 – górnictwa innych surowców (Kompala, Świder 2009)

Fig. 1. Loss of hearing U in workers of coal mining industry and of other raw materials as compared to the group that has never been exposed to noise, depending on the age; workers: 1 – unexposed to noise, 2 – of coal mining, 3 – of other raw materials mining (Kompala, Świder 2009)

Podstawowym warunkiem skutecznej ochrony przed uszkodzeniami słuchu w górnictwie jest wiedza dotycząca stanu aktualnego oraz prognoz zapadalności na choroby zawodowe. Na tej podstawie można zarządzać bezpieczeństwem pracy.

1.3. Teoria słyszenia

Fala akustyczna zostaje przekazana przez ucho zewnętrzne i ucho środkowe do ucha wewnętrznego. Ucho zewnętrzne i środkowe przewodzą energię na drodze mechanicznej.

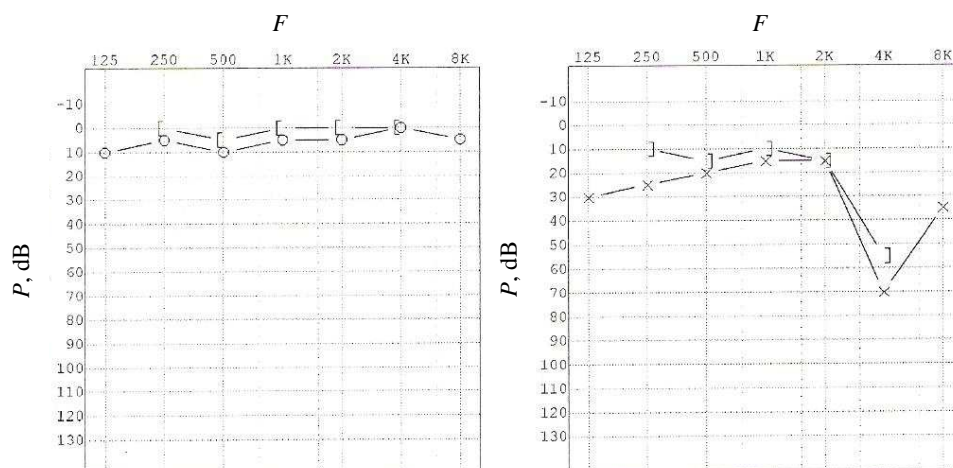
Ucho wewnętrzne zamienia energię mechaniczną w bioelektryczną. Ucho wewnętrzne składa się z błędnika kostnego, błędnika błoniastego i nerwu przedsionkowo-ślimakowego. Błędnik kostny składa się ze ślimaka, przedsionka i trzech kanałów półkolistych. Główną rolą ślimaka jest analiza częstotliwości. Budowa błony podstawnej w ślimaku warunkuje selektywny odbiór częstotliwości: tonów wysokich u podstawy, średnich w części środkowej, a niskich w części szczytowej ślimaka.

Tony o dużej częstotliwości są odbierane jako dźwięki wysokie, tony o małej częstotliwości – jako dźwięki niskie.

Fala dźwiękowa rozchodzi się od podstawy do wierzchołka, dlatego też początkowe uszkodzenie słuchu wywołane hałasem dotyczy wysokich częstotliwości.

1.4. Uszkodzenia słuchu

Ucho ludzkie jest w stanie odbierać dźwięki z zakresu 16–20 000 Hz. Obszarem najbardziej wrażliwym na występowanie ubytku słuchu jest częstotliwość 4000 Hz. Przykładowe wyniki badania audiometrycznego przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



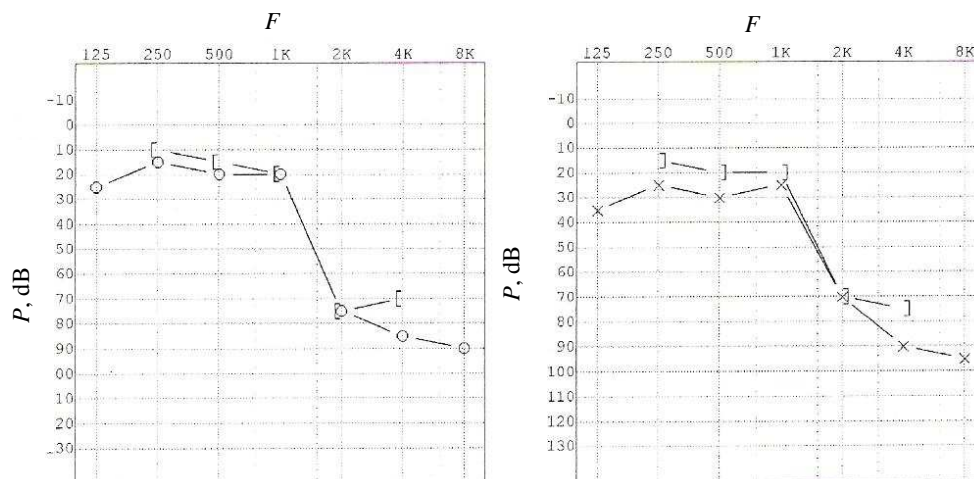
Rys. 2. Przykładowe wyniki badania audiometrycznego (diagnoza: ostry uraz akustyczny ucha lewego):
F – częstotliwość, P – poziom słyszenia

Fig. 2. A model results of the audiometric test (diagnosis: an acute acoustic injury of the left ear):
F – frequency, P – the level of hearing

W następnej kolejności uszkodzenie słuchu dotyczy tonów o częstotliwości najbliższej 4000 Hz, to znaczy od 2000 do 8000 Hz.

Ostatecznie dochodzi do pogorszenia odbioru niskich częstotliwości.

Nierzadko pracownicy, którzy doznali ostrego urazu akustycznego, nie zdają sobie sprawy z tego, że nastąpiło u nich uszkodzenie słuchu. Dzieje się tak, ponieważ uraz ten nie ma wpływu na zrozumienie mowy. Często osoby zwracają uwagę na problem niedosłuchu dopiero wtedy, gdy mają trudności ze zrozumieniem słów. Tymczasem mowa ludzka obejmuje częstotliwość 300–3000 Hz, co oznacza, że u osób tych ubytek słuchu musi istnieć już od jakiegoś czasu.



Rys. 3. Przykładowe wyniki badania audiometrycznego (diagnoza: obustronny wysokoczęstotliwościowy ubytek słuchu): F – częstotliwość, P – poziom słyszenia

Fig. 3. Model results of the audiometric test (diagnosis: double-sided high-frequency hearing loss): F – frequency, P – the level of hearing

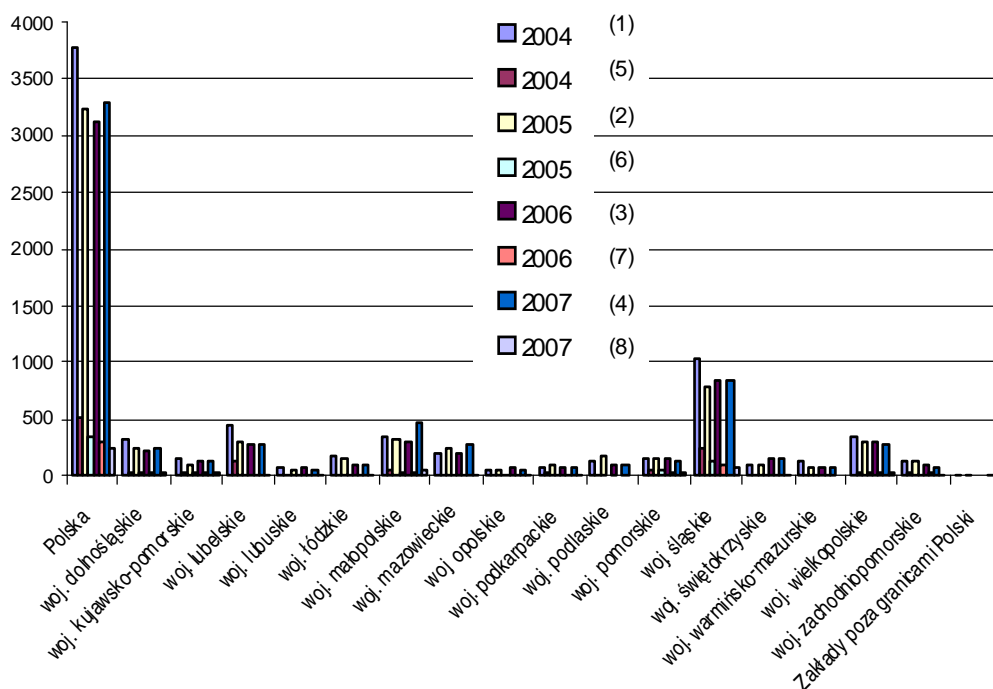
2. USZKODZENIE SŁUCHU JAKO CHOROBA ZAWODOWA

Za chorobę zawodową uznaje się: „Obustronny trwały ubytek słuchu typu ślimakowego podwyższający próg słyszenia o co najmniej 45 dB w uchu lepiej słyszącym, obliczony jako średnia arytmetyczna dla częstotliwości 1,2 i 3 kHz” (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r.). Ostry uraz akustyczny nie jest chorobą zawodową.

Rejestrowanie i analiza występowania chorób zawodowych w Polsce są prowadzone na podstawie „kart stwierdzenia choroby zawodowej”, przesyłanych przez placówki orzekające do Centralnego Rejestru Chorób Zawodowych Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi. Dane dotyczą wyłącznie pracowników zatrudnionych na podstawie stosunku pracy.

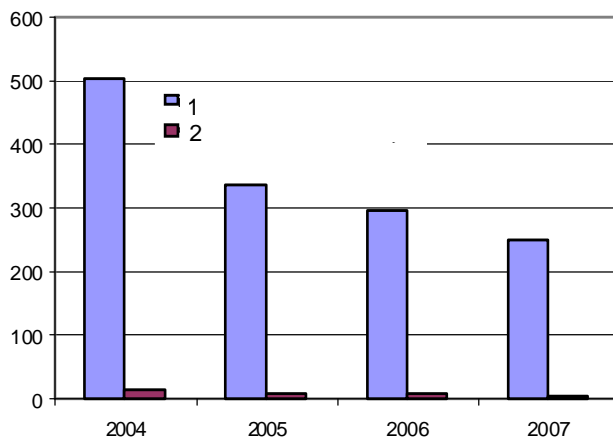
Terytorialne zróżnicowanie zapadalności na choroby zawodowe jest związane ze zróżnicowanym rozwojem przemysłu. Sporządzono listę przedsiębiorstw, które były głównymi źródłami chorób zawodowych. Na liście znalazły się głównie kopalnie węgla kamiennego. Na rysunku 4 przedstawiono stosunek ogólnej liczby chorób zawodowych do liczby przypadków trwałego obustronnego ubytku słuchu typu ślimakowego. Dane dotyczą całego kraju i poszczególnych województw. Obustronny ubytek słuchu pracowników ogółem w stosunku do występujących chorób zawodowych przedstawiono na rysunku 5.

Większość stwierdzonych w Polsce chorób zawodowych powstała w wyniku wieloletniej ekspozycji na czynniki szkodliwe. Najliczniejsza była grupa pracowników z dwudziestoletnim stażem pracy (rys. 6). Znalazło to również odzwierciedlenie w strukturze chorób zawodowych według wieku (rys. 7).



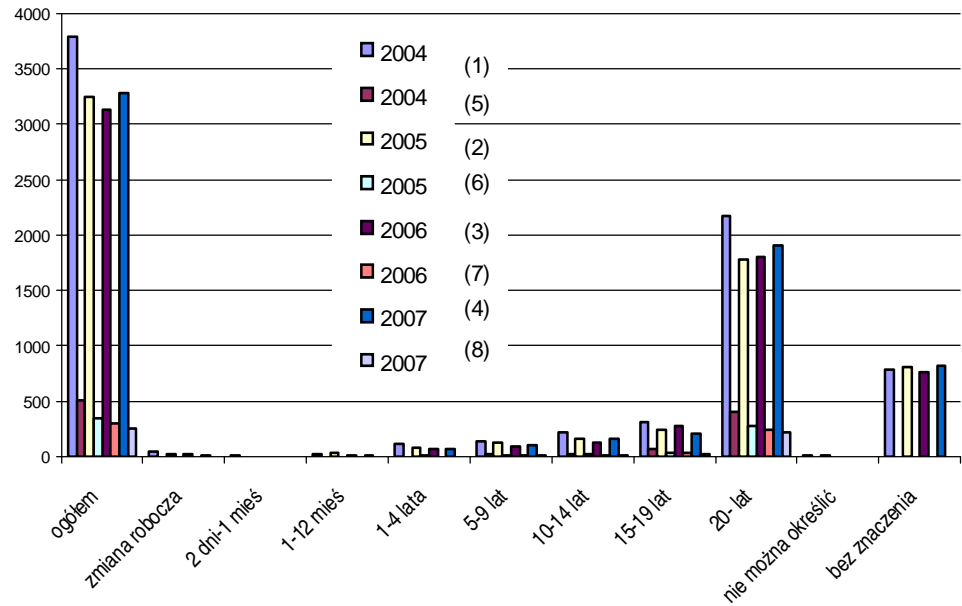
Rys. 4. Choroby zawodowe w Polsce według podziału na województwa: 1, 2, 3, 4 – liczba chorób zawodowych ogółem w latach 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – liczba przypadków uszkodzenia słuchu [1, 2, 3, 4]

Fig. 4. Occupational diseases in Poland according to division into voivodeships 1, 2, 3, 4 – number of occupational diseases in total in the years: 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – number of cases of hearing injuries [1, 2, 3, 4]



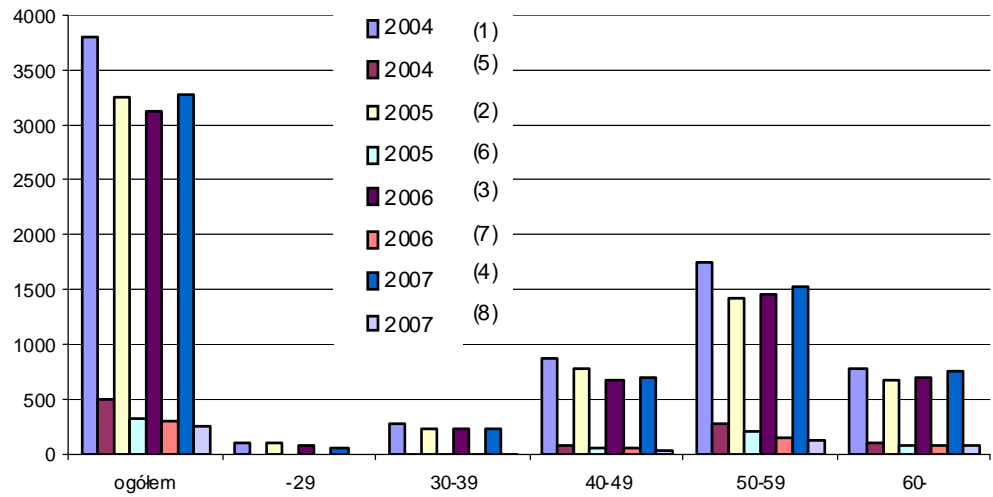
Rys. 5. Obustronny ubytek słuchu typu ślimakowego: 1 – liczba przypadków, 2 – procentowy udział w chorobach zawodowych [1, 2, 3, 4]

Fig. 5. A double-sided hearing loss of the cochlea type: 1 – number of cases, 2 – percentage participation in occupational diseases [1, 2, 3, 4]



Rys. 6. Choroby zawodowe w Polsce według okresu narażenia na czynnik szkodliwy: 1, 2, 3, 4 – liczba chorób zawodowych ogółem w latach 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – liczba przypadków uszkodzenia słuchu [1, 2, 3, 4]

Fig. 6. Occupational diseases in Poland according to disease entities and age: 1, 2, 3, 4 – number of occupational diseases in total in the years: 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – number of cases of hearing injuries [1, 2, 3, 4]



Rys. 7. Choroby zawodowe w Polsce według jednostek chorobowych i wieku: 1, 2, 3, 4 – liczba chorób zawodowych ogółem w latach 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – liczba przypadków uszkodzenia słuchu [1, 2, 3, 4]

Fig. 7. Occupational diseases in Poland according to the time of exposition to harmful factor: 1, 2, 3, 4 – number of occupational diseases in total in the years: 2004–2007; 5, 6, 7, 8 – number of cases of hearing injuries [1, 2, 3, 4]

PODSUMOWANIE

Istnieje udowodniona zależność między wykonywaną pracą a narażeniem na choroby zawodowe. W przypadku uszkodzenia słuchu objawy choroby występują z opóźnieniem, dlatego niezwykle ważna jest ciągła kontrola oraz korekty natężenia dźwięku na stanowiskach pracy. Profilaktyce urazów akustycznych służy poprawa procesów technologicznych, zapobieganie rozprzestrzenianiu się hałasu oraz osobista ochrona pracowników.

Hałas przyczynia się do zmniejszenia bezpieczeństwa pracy między innymi w wyniku: niesłyszania sygnałów alarmowych o wysokich częstotliwościach i zmniejszenia.

Hałas działa nie tylko bezpośrednio na ucho środkowe i wewnętrzne, działa również na układ nerwowy i psychikę. Hałas o małym natężeniu powoduje złe samopoczucie. Podczas jego nasilenia dochodzi do odczucia niepokoju. Silny hałas powoduje rozdrażnienie, pobudzenie. W końcu może dojść do apatii, zwolnienia podejmowania decyzji, możliwości zwiększenia popełniania błędów w pracy oraz obniżenia wydajności.

W celu zmniejszenia natężenia dźwięku maszyn stosuje się różnego rodzaju zasłony i izolacje. Często nie ma jednak możliwości zmniejszenia hałasu pochodzącego z procesów technologicznych. Pracownicy, zgodnie z przepisami BHP, są zobowiązani do używania różnego rodzaju ochronników akustycznych: hełmów, słuchawek, wkładek wewnątrzusznych.

Literatura

1. Choroby zawodowe w Polsce w 2004 roku (2005). Łódź, Instytut Medycyny Pracy.
2. Choroby zawodowe w Polsce w 2005 roku (2006). Łódź, Instytut Medycyny Pracy.
3. Choroby zawodowe w Polsce w 2006 roku (2007). Łódź, Instytut Medycyny Pracy.
4. Choroby zawodowe w Polsce w 2007 roku (2008). Łódź, Instytut Medycyny Pracy.
5. Kompała J., Świder J. (2009): Zagrożenie hałasem i drganiami w górnictwie. Materiały XXXVII Zimowej Szkoły Zwalczania Zagrożeń Wibroakustycznych.
6. Koradecka D. (1999): Bezpieczeństwo pracy i ergonomia. Tom 1. Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy.
7. Pruszczyk A. (2000): Zarys audiologii klinicznej. Wyd. II. Poznań, Wydaw. Akademii Medycznej (Praca zbiorowa).
8. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu chorób zawodowych, szczegółowych zasad postępowania w sprawach zgłaszania, podejrzenia, rozpoznawania i stwierdzenia chorób zawodowych oraz podmiotów właściwych w tych sprawach (Dz. U. z dnia 19 sierpnia 2002 r.).
9. Śliwińska-Kowalska M., red. (2005): Audiologia kliniczna. Praca zbiorowa. Łódź, Wydaw. Mediton.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

*Henryk Passia**

ANALIZA MOŻLIWOŚCI POMIARU KONCENTRACJI CZĄSTEK NIESFERYCZNYCH W POWIETRZU Z ZASTOSOWANIEM UKŁADU DOPPLEROWSKIEGO ANEMOMETRU LASEROWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania charakterystyk sygnału zmiennego (dokładnie: stosunku sygnału do szumu), generowanego w układzie dopplerowskiego anemometru laserowego, do selektywnego pomiaru koncentracji stałych cząstek niesferycznych unoszonych w powietrzu lub innym medium. Własności sygnału dopplerowskiego generowanego w przypadku cząstek sferycznych lub quasi-sferycznych zostały dokładnie omówione we wcześniejszych pracach autora (Passia i in. 1978; Passia 2003) zarówno pod względem eksperymentalnym, jak i uzasadnienia teoretycznego. Przedstawiona w artykule analiza sposobu wykonywania pomiarów koncentracji cząstek niesferycznych dotyczy cząstek azbestu zawieszonych w powietrzu. Wykorzystanie charakterystyk sygnału zmiennego, takiego jaki jest generowany w dopplerowskim anemometrze laserowym, umożliwia eliminację niekorzystnych efektów pochodzących od przypadkowo rozproszonego światła i związanego z tym wysokiego poziomu tła w detekcji z sygnałem stałym (przykład takiego rozwiązania z wykorzystaniem światłowodów przedstawiono w publikacji: Passia, Rożkowicz 2007). W cytowanej publikacji omówiono przede wszystkim szczegółowo charakterystyki wymiarowe i materiałowe włókien azbestu.

An analysis of possibilities for measuring concentration of non-spherical particles in air using the structure of laser Doppler anemometer

Abstract

The paper presents an analysis of possibilities of using the characteristics of the AC signal (precisely: signal-to-noise ratio) generated in the structure of the laser Doppler anemometer to make selective measurement of non-spherical solid particles suspended in the air or other medium. The properties of the Doppler signal being generated in the case of spherical or quasi-spherical particles have been presented in detail in the previous author's publications (Passia et al. 1978; Passia 2003), both from the experimental side, and its theoretical justification. The analysis presented in the paper relative to realisation of concentration measurements of non-spherical particles is oriented towards the problem of optical measurement of airborne asbestos particles. The use of the AC signal characteristics, such as generated in the laser Doppler anemometer enables to eliminate adverse effects coming from stray light, and related to this high background level in the DC detection process (an example of such a solution, using optical fibres have been given in the publication: Passia, Rożkowicz 2007). In the work mentioned, first of all a detailed discussion of dimensional and material characteristics of asbestos fibres has been presented.

WPROWADZENIE

Wielkość i kształt cząstek rozpraszających unoszonych przez medium (gaz lub ciecz), przepływających przez obszar pomiarowy (tj. wspólne ognisko dwóch wiązek laserowych: oświetlającej i referencyjnej) w dopplerowskim anemometrze laserowym, oddziałują na charakter sygnału uzyskiwanego w procesie optycznego mieszania tych

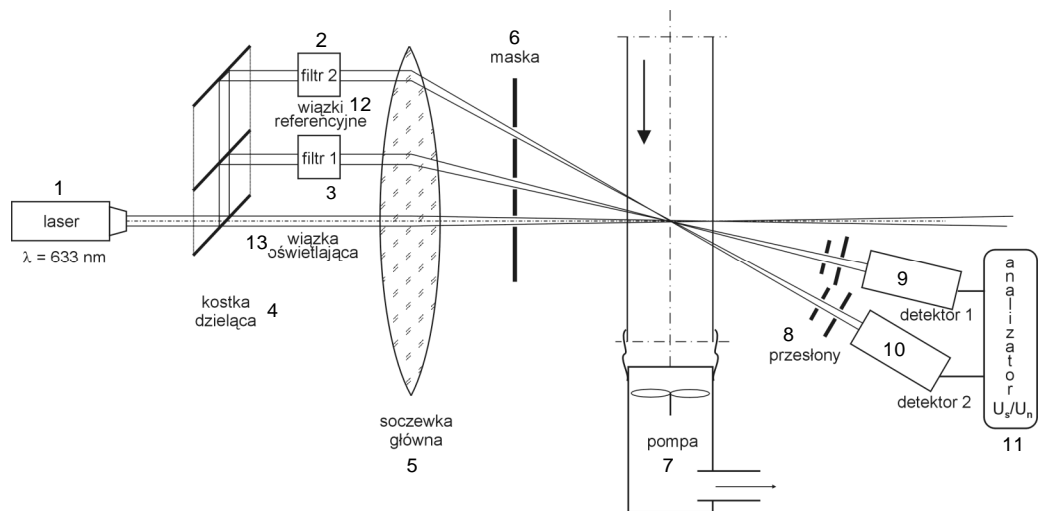
* Główny Instytut Górnictwa.

dwóch wiązek. W przypadku przepływu laminarnego badanego medium sygnał uzyskiwany na wyjściu z detektora jest w bardzo dużym przybliżeniu sinusoidalny i jest nałożony na tło szerokopasmowego szumu (białego). W takim przypadku stosunek sygnału do szumu, gdy cząstki rozpraszające mają kształt sferyczny lub zbliżony do sferycznego, jest wyraźnie związany ze średnim ich wymiarem (Passia i in. 1978; Passia 2002).

Wiadomo także, że charakterystyki kątowe rozpraszania światła, bazujące na ścisłych zależnościach wynikających z teorii Mie (van de Hulst 1957; Born, Wolf 1964), stwarzają podstawę do wnioskowania o możliwości uzyskania informacji o kształcie cząstek, na podstawie określenia własności sygnału dopplerowskiego, przy czym układ anemometru dopplerowskiego musi być wtedy rozbudowany o dodatkowe kanały pomiarowe, natomiast sam sygnał może mieć w każdym z kanałów określoną częstotliwość, co stworzyłoby łatwiejsze warunki do rejestracji samego stosunku sygnału do szumu, parametru związanego z własnościami wymiarowymi cząstek rozpraszających.

1. ROZBUDOWANY UKŁAD ANEMOMETRU DOPPLEROWSKIEGO

Wykorzystanie różnic w rozkładach kątowych natężenia światła rozproszonego na cząstkach unoszonych w badanym medium będzie wymagało zbudowania układu anemometru o powielonej strukturze, przynajmniej podwojonej. Schemat takiego podwojonego układu przedstawiono na rysunku 1.

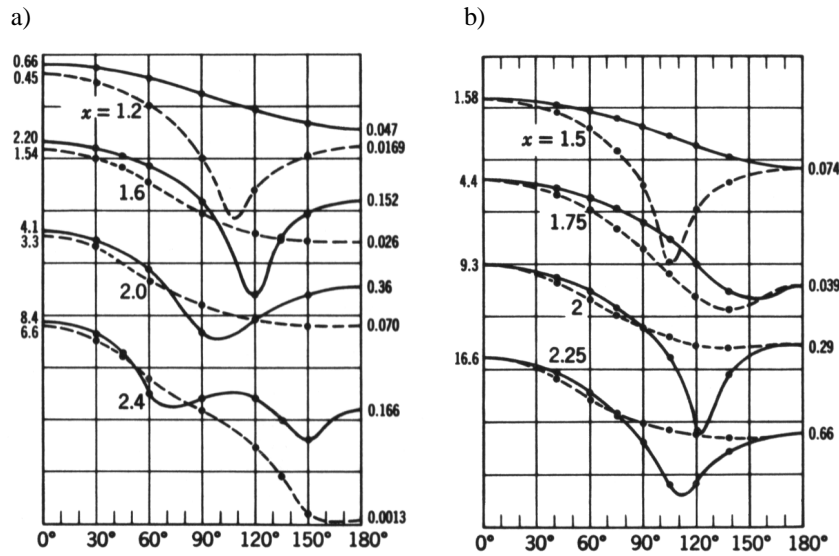


Rys. 1. Podwojona struktura pomiarowa dopplerowskiego anemometru laserowego

Fig. 1. Doubled structure of laser Doppler anemometer: 1 – laser, 2, 3 – filter, 4 – beam splitter, 5 – main lens, 6 – mask, 7 – pump, 8 – diaphragms, 9 – detector 1, 10 – detector 2, 11 – analyser, 12 – reference beams, 13 – illuminating beam

Podwojenie układu anemometru laserowego jest podyktowane, jak już wyżej zaznaczono, potrzebą wykorzystania różnic w charakterystykach kątowych natężenia

światła rozproszonego na cząstkach w zależności od ich kształtu. Rysunek 2 (van de Hulst 1957) stanowi ilustrację takiej różnicy w przebiegu charakterystyk kątowych dla cząstek sferycznych i wydłużonych (cylindrycznych).



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki kątowe w procesie rozpraszania światła na cząstkach sferycznych (a) i wydłużonych (b)

Fig. 2. Theoretical angular characteristics in the process of light scattering on spherical (a) and elongated (b) particles

Sygnal zmienny generowany na wyjściu anemometru laserowego jest produktem mieszania na fotokatodzie detektora, dwóch wiązek laserowych; pomiarowej i referencyjnej. Zawiera on człon interferencyjny mający postać (Siegman 1966):

$$j = \int \eta \vec{E} \vec{E}^* dA \quad (1)$$

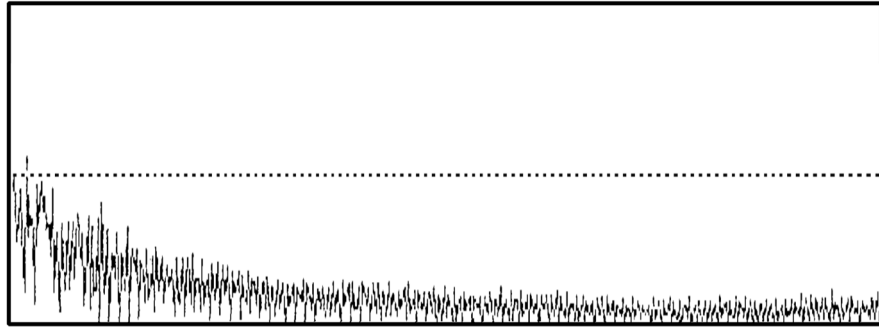
$$\frac{1}{2} j_{SI,LO} = \int \eta \vec{E}_{SI} \vec{E}_{LO} dA \quad (2)$$

gdzie:

- j – prąd na wyjściu fotokatody,
- E – wektor natężenia pola elektrycznego wiązki laserowej, indeksy SI oraz LO odnoszą się odpowiednio do wiązki pomiarowej (*signal*) i referencyjnej (*local oscillator*),
- η – wydajność kwantowa fotokatody,
- A – powierzchnia fotokatody.

Jak wspomniano, sygnał wychodzący z detektora jest sygnałem w bardzo dużym stopniu zbliżonym do sinusoidalnego w przypadku, gdy przepływ jest laminarny. Cha-

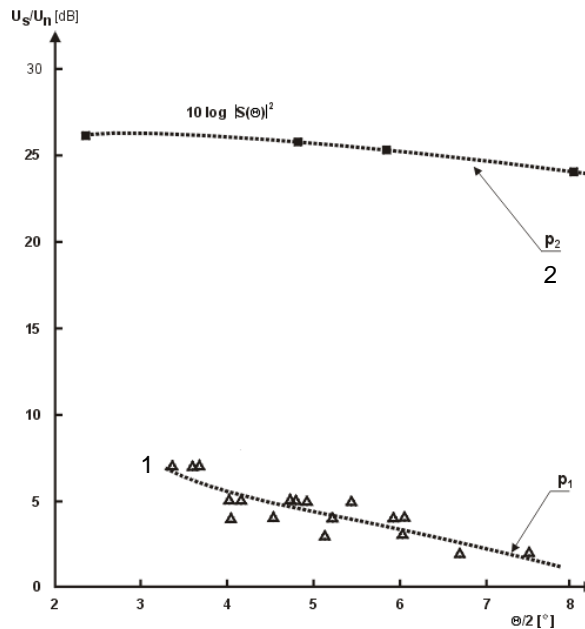
rakter szumu nałożonego na generowany sygnał przedstawiono w postaci transformaty FFT na rysunku 3. Przebieg o większej amplitudzie, widoczny z lewej strony, zawiera fragment sygnału zarejestrowanego przy przepływie turbulentnym.



Rys. 3. Widmo szumu generowanego w anemometrze laserowym

Fig. 3. Spectrum of noise generated in laser Doppler anemometer

Charakterystykę stosunku sygnału do szumu uzyskiwanego w anemometrze dopplerowskim, w zależności od kąta rozpraszania (kąta między wiązkami ogniskowanymi w punkcie pomiarowym), dla monodispersyjnych cząstek polistyrenu zawieszonych w wodzie, przedstawiono na rysunku 4. Średnica cząstek wynosiła $0,45 \mu\text{m}$. Kształt krzywej eksperymentalnej (1) odniesiono do formy krzywej teoretycznej (2)

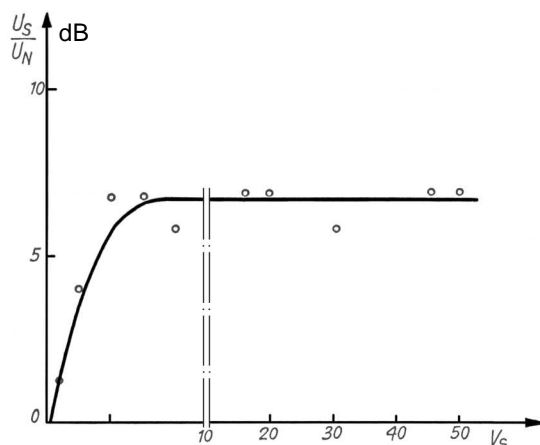


otrzymanej dla tego przypadku ze ścisłych zależności wynikających z teorii Mie (Passia 2002). Dobrą zgodność potwierdzają podobne wykresy dla cząstek (sferycznych i quasi-sferycznych) o innych rozmiarach (Passia 2002).

Rys. 4. Charakterystyki kątowe stosunku sygnału dopplerowskiego do szumu (u góry krzywa obliczona według teorii Mie); cząstki polistyrenu $0,45 \mu\text{m}$ zamieszczone w wodzie: 1 – krzywa eksperymentalna, 2 – krzywa teoretyczna

Fig. 4. Angular characteristics of Doppler signal-to-noise ratio (top-curve computed from Mie theory); polystyrene $0,45 \mu\text{m}$ in water: 1 – experimental curve, 2 – theoretical curve

Zmiana koncentracji cząstek w obszarze pomiarowym (w punkcie przecięcia wiązek, faktycznie elipsoidzie) powoduje równoległe przesuwanie się charakterystyki kątowej w górę lub w dół wykresu, zależnie od zmniejszania się lub wzrostu koncentracji. Tendencję tę ilustruje rysunek 5. Obszar liniowej zmiany stosunku sygnału do szumu może być, jak widać, efektywnie wykorzystany do wyznaczenia koncentracji cząstek rozpraszających na podstawie analizy stosunku sygnału do szumu w anemometrze. Zakrzywienie się tej charakterystyki wynika z ekstynkcji dającej w efekcie zmniejszenie mocy wiązek docierających do detektora, w kierunku wiązki referencyjnej.



Rys. 5. Zależność stosunku sygnału do szumu U_s/U_n w laserowym anemometrze dopplerowskim od koncentracji cząstek (polistyren $0,45 \mu\text{m}$ w wodzie); V_s – objętość standardowa odpowiadająca koncentracji $6 \cdot 10^6$ cząstek w 1 cm^3

Fig. 5. Signal-to-noise ratio vs. concentration of particles (polystyrene $0.45 \mu\text{m}$ in water); V_s standard volume corresponding to concentration of $6 \cdot 10^6$ particles 1 cm^3

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiona w artykule analiza charakterystyk stosunku sygnału do szumu dla cząstek sferycznych unoszonych przez medium (gaz lub ciecz) odnośnie do możliwości ich wykorzystania do pomiaru koncentracji cząstek w tym medium, pozwala pozytywnie wnioskować co do pomiarów cząstek w kształcie wydłużonym, docelowo cząstek azbestu. W przypadku pozytywnej weryfikacji eksperymentalnej takiego wniosku, technika pomiarowa z wykorzystaniem własności sygnału zmiennego miałaby istotne zalety w odniesieniu do detekcji stałoprądowej, ze względu na możliwość eliminacji niechcianych efektów generowanych przez światło rozproszone w układzie pomiarowym, wpływające negatywnie na analizę amplitudową światła rozproszonego.

Układ pomiarowy, którego podstawę stanowiłaby analiza własności sygnału dopplerowskiego pracowałby na dwóch częstotliwościach (w zakresie kiloherców) nieco różniących się od siebie w kanałach pomiarowych, utworzonych przez wiązki laserowe, ze względu na różnice w kątach rozpraszania, wpływających na wartość częstotliwości sygnału dopplerowskiego.

Literatura

1. Born M., Wolf E. (1964): Principles of Optics. Pergamon Press.
2. Passia H. (2002): Metrologia emisji metanu z rozciągniętych obiektów środowiskowych z wykorzystaniem selektywnej absorpcji promieniowania laserowego w średniej podczerwieni. Prace Naukowe GIG nr 851.
3. Passia H., Pawlak J., Piaseczki S. (1978): Lasery w górnictwie. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
4. Passia H., Rożkowicz M. (2007): Laserowa detekcja i pomiar koncentracji cząstek azbestu w powietrzu. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
5. Siegman A.E. (1966): Proc. IEEE, 54.
6. van de Hulst H.C. (1957): Light Scattering by Small Particles. Wiley and Sons.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Witalij Skoropacki*, Stanisław Trzcionka**

OPIS MATEMATYCZNY WPŁYWU INDUKCYJNOŚCI WEWNĘTRZNEJ ŹRÓDŁA ZASILANIA NA ISKROBEZPIECZEŃSTWO OBCIĄŻENIA

Streszczenie

Indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania występuje w postaci konkretnych skupionych elementów, na przykład uzwojenia transformatorów separujących, cewki filtrów przeciwzakłóceńowych itp. W niektórych przypadkach oddziaływanie negatywne tych elementów indukcyjnych na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego można kompensować lub nawet wykorzystać do zwiększenia iskrobezpieczeństwa obwodu zewnętrznego źródła zasilania, szczególnie przy zastosowaniu nieliniowych układów ochronnych, zapewniających iskrobezpieczeństwo, ze względu na ich większy współczynnik przenoszenia energii elektrycznej w porównaniu z liniowymi układami ochronnymi.

W artykule opisano modele matematyczne do estymacji wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego przy stosowaniu układów ochronnych z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu *fold-back*, dla różnych impedancji obciążenia. Uzyskane analityczne wyrażenia do estymacji energii elektrycznej wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego, wskutek oddziaływania źródła zasilania, jego indukcyjności wewnętrznej oraz parametrów obciążenia, pozwalają z wykorzystaniem wspomagania komputerowego a priori określić stopień iskrobezpieczeństwa obwodu elektrycznego, jak również dokonać analizy wrażliwości iskrobezpieczeństwa tego obwodu w zależności od zmian parametrów elektrycznych poszczególnych elementów.

Stwierdzono, że wpływ indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania zależy od impedancji wejściowej obwodu chronionego, jak również od charakteru komutacji awaryjnej, zwarcia lub rozwarcia w tym obwodzie.

Przy pojemnościowym charakterze obciążenia w chwili powstania zwarcia na wyjściu źródła zasilania obecność indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania łagodzi jego oddziaływanie, zmniejszając szybkość wzrostu prądu i wartości energii elektrycznej, wyzwalanej w punkcie zwarcia, nowelizując przy tym skutki opóźnienia zadziałania układu ochronnego.

Przy obciążeniu typu *RL* w chwili powstania rozwarcia na wyjściu źródła zasilania około 20% energii magnetycznej, zgromadzonej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania, jest wydzielane w kanale wyładowania elektrycznego, natomiast przy zadziałaniu układu ochronnego, dokonującego zwarcia zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej, wartość ta jest do pominięcia. W warunkach rzeczywistych występuje opóźnienie zadziałania układu ochronnego od chwili powstania komutacji awaryjnej, które powinno być uwzględnione przy symulacji zmiany w czasie rezystancji układu ochronnego lub przy obliczeniu odpowiednich całek w sposób numeryczny.

Mathematical description of the effect of internal inductance of the supply source on the intrinsic safety of the load

Abstract

The internal inductance of the supply source appears in the form of defined self-contained elements, for example winding of separating transformers, coil of anti-interference filters and the like. In some

* Główny Instytut Górnictwa.

** Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”.

cases the negative influence of these inductive elements on the intrinsic safety of the output circuit can be compensated or even used to increase the intrinsic safety of the external circuit of supply source, particularly by applying non-linear protective systems that guarantee the intrinsic safety, on account of their higher coefficient of electric energy transfer, as compared to the linear protective systems.

The paper presents mathematical models for estimation of the effect of internal inductance of the supply source on intrinsic safety of the output circuit, when applying protective systems with non-linear fold-back type current-voltage characteristics, for various impedances of the load. The analytic expressions obtained for estimation of electric energy generated in a channel of electrical discharge, as a result of the effect of the supply source, its internal inductance and load parameters, enable, by using computer assistance, to determine a priori the level of intrinsic safety of the electric circuit, as well as to carry out an analysis of this circuit intrinsic safety sensitivity, depending on the changes of electrical parameters of individual parameters.

It has been found that the effect of internal inductance of the supply source depends on the input impedance of the protected circuit, as well as on the nature of emergency commutation, short-circuit or break in this circuit.

With the capacitive character of load at the moment of short-circuit occurrence at the output of the supply source, the presence of the internal inductance of the supply source mitigates its effect, by reducing the rate of rise and the value of electric energy liberated in the point of short-circuit, at the same time modifying the effects of the delay of the protective system activation.

With the load of RL type at the moment of circuit breaking occurrence, at the output of the supply source, about 20% of magnetic energy accumulated in the internal inductance of the supply source is being liberated into the electrical discharge channel, whereas with the of protective system operating, causing short-circuiting of the output clamps of the supply source at the moment of emergency commutation, this value can be omitted. In the real conditions there is a delay in activation of the protective system since the moment of emergency commutation occurrence that should be taken into consideration when simulating the time change of the protective system resistance, or when computing appropriate integrals.

WPROWADZENIE

Indukcyjność wewnętrzna, w różnym stopniu, występuje praktycznie we wszystkich źródłach zasilania, od zasilaczy z zastosowaniem przetwornic AC/DC lub DC/DC do źródeł elektrochemicznych.

Przy organizacji iskrobezpiecznego zasilania maksymalny stosunek zewnętrznych indukcyjności do rezystancji L_o/R_o , jakie mogą być podłączone do źródła zasilania z liniową charakterystyką prądowo-napięciową, określa się za pomocą znanego wzoru empirycznego, podanego w p. 6.2.3 normy PN-EN 60079-11. Wzór ten określa zależność tego stosunku od rezystancji i indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania, minimalnej energii zapłonu medium palnego oraz od maksymalnej wartości napięcia źródła zasilania bez obciążenia. Uwzględniono w nim także współczynnik bezpieczeństwa 1,5 dotyczący prądu obciążenia. Jednak stosowanie tego wzoru ogranicza się do warunku, gdy maksymalna pojemność wewnętrzna C_i odniesiona do zacisków wyjściowych źródła zasilania nie przekracza 1% wartości maksymalnej pojemności zewnętrznej C_o .

W związku z tym, że indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania występuje w postaci konkretnych skupionych elementów, na przykład uzwojenia transformatorów separujących, cewki filtrów przeciwzakłóceń itp., to w niektórych przypadkach oddziaływanie negatywne tych elementów indukcyjnych na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego można kompensować lub nawet wykorzystać w celu podniesienia

poziomu iskrobezpieczeństwa obwodu zewnętrznego źródła zasilania, szczególnie przy zastosowaniu nieliniowych układów ochronnych, zapewniających iskrobezpieczeństwo, ze względu na ich większy współczynnik przenoszenia energii elektrycznej w porównaniu z liniowymi układami ochronnymi.

W artykule opisano modele matematyczne do estymacji wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego przy stosowaniu układów ochronnych z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu *fold-back*, dla różnych impedancji obciążenia.

1. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PRZY POWSTANIU ZWARCIA W OBWODZIE WYJŚCIOWYM ŹRÓDŁA ZASILANIA

Analizę wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na zależności energetyczne przy powstaniu zwarcia w układzie: źródło zasilania – układ ochronny z nieliniową charakterystyką wyjściową – obciążenie, przeprowadzono na podstawie elektrycznych schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1.

Dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1a i 1c, przy powstaniu zwarcia za pomocą klucza K , prąd I_k , napięcie U_k i R_k kanału wyładowania elektrycznego wynosi

$$\left. \begin{aligned} I_k &= 0, U_k = U_{C_0}, R_k = \infty \text{ dla } t = 0 \\ I_k &= I_k(t), U_k = U_k(t), R_k = R_k(t) \text{ dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k &= I_{ust}, U_k \approx 0, R_k \approx 0, \text{ dla } t > t_w \end{aligned} \right\} (1)$$

gdzie:

t_w – czas trwania wyładowania elektrycznego,

$I_k = I_{ust} = E/2r$ – prąd ustalony dla $t > t_w$,

U_{C_0} – wartość napięcia naładowanego kondensatora, dla $t = 0$ $U_{C_0} = E$.

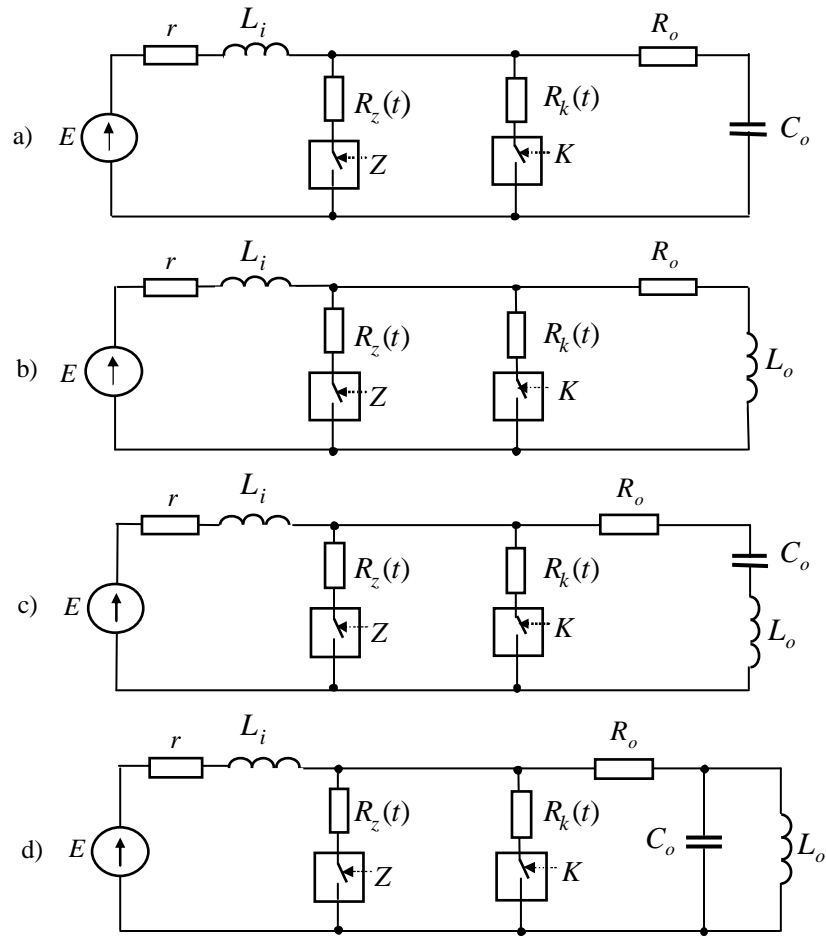
Z kolei, dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunkach 1b i 1d:

$$\left. \begin{aligned} I_k &= 0, U_k = U_{k_0}, R_k = \infty \text{ dla } t = 0 \\ I_k &= I_k(t), U_k = U_k(t), R_k = R_k(t) \text{ dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k &= I_{ust}, U_k = 0, R_k \approx 0, \text{ dla } t > t_w \end{aligned} \right\} (2)$$

przy czym dla $t = 0$ $U_k = U_{k_0} = E - Er/(r + R_0)$, a dla $t > t_w$, zakładając że $R_k \approx R_z \approx 0$, $I_k = I_{ust} = E/2r$.

Zmiana $R_k(t)$ dla $0 \leq t \leq t_w$ jest procesem losowym zależnym od różnych czynników. Zachowanie się „przeźreni międzyelektrodowej” w momencie wystąpienia iskry opisał wielu autorów. Na przykład Ciok (1983) omówił modelowanie matematyczne łuku przeprowadzone dla warunków, kiedy energia elektryczna doprowadzona do łuku z zewnętrznego źródła zasilania była wielokrotnie większa od energii elektrycznej zgromadzonej w elementach reaktancyjnych obwodu elektrycznego. Omówił także modelowanie przeprowadzone dla styków dociskanych przed rozwarciem.

Z kolei z publikacji Lindmanowskiego (1988) wynika, że w zależności od wartości średniej prądu wyładowania mogą wystąpić niezupełne (np. jarzeniowe) oraz zupełne wyładowania, przy wartości średniej prądu powyżej 10^{-3} A, w postaci łuku elektrycznego.



Rys. 1. Podstawowe schematy zastępcze układu elektrycznego w trybie zwarcia: E – źródło zasilania, K – klucz symulujący punkt komutacji awaryjnej (zwarcie), Z – klucz (zwiernik) symulujący układ ochronny o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, r i L_i – odpowiednio rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania, R_o , L_o , C_o – odpowiednio rezystancja, indukcyjność i pojemność obciążenia, $R_k(t)$ – funkcja symulująca zmianę rezystancji kanału wyładowania w czasie, $R_z(t)$ – funkcja symulująca zmianę rezystancji układu ochronnego w czasie

Fig. 1. The basic substitute schemes of the electric system in the short-circuit mode: E – supply source, K – key simulating the point of emergency commutation (short-circuit), Z – key (short circuiting switch) simulating the protective system with the non-linear current-voltage characteristics, r and L_i – appropriately resistance and the internal inductance of supply source, R_o , L_o , C_o – resistance, inductance and load capacitance, respectively, $R_k(t)$ – function simulating the change of resistance of the discharge channel in time, $R_z(t)$ – function simulating the change of resistance of the protective system in time

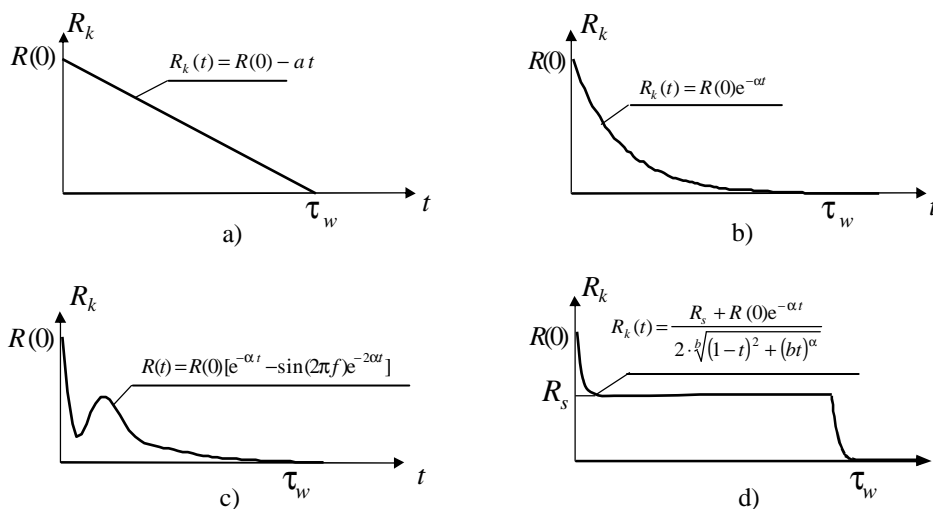
Po wystąpieniu krótkotrwałego łuku elektrycznego w postaci iskry decydującym czynnikiem, pod względem iskrobezpieczeństwa jest wartość wyzwalanej energii w kanale wyładowania. Zgodnie z cieplnym modelem zapłonu opisanym w publikacji Frączka (1995) energia wyładowania jest konwertowana w energię ciepłą, przy czym wartość tej energii i czas konwertowania są charakterystyczne dla konkretnej mieszanki wybuchowej w określonych warunkach stężenia, temperatury i ciśnienia. Mają na to wpływ, tzw. odległość krytyczna (odstęp międzyelektrodowy), po przekroczeniu której jądro zapłonu zanika, materiały z których są wykonane elektrody, ich kształt oraz szybkość ich przemieszczania się w chwili powstania komutacji awaryjnej. Wszystkie te czynniki trudno jednocześnie uwzględnić w analitycznym modelu zachowania się „przestrzeni międzyelektrodowej”.

Jeżeli założy się następane prawdopodobne warianty symulacji przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania zapoczątkowanego zwieraniem obwodu elektrycznego (rys. 2), a mianowicie:

- charakter liniowy $R_k(t) = R(0) - at$,
- charakter wykładniczy $R_k(t) = R(0)e^{-at}$,
- charakter wykładniczo-oscylicyjny, według zależności
 $R_k(t) = R(0)[e^{-at} \cdot \sin(2\pi ft) + 1](1 - e^{-2at})$,
- charakter z uwzględnieniem „samodopasowania” impedancji wejściowej kanału wyładowania do impedancji wyjściowej źródła energii elektrycznej

$$R_k(t) = (R_s + R(0)e^{\alpha t}) / 2 \cdot \sqrt{(1-t)^2 + (bt)^\alpha},$$

gdzie przez R_s oznaczono wartość rezystancji kanału wyładowania w trybie dopasowania, a i b są współczynnikami aproksymacji.



Rys. 2. Warianty przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania podczas zwierania obwodu elektrycznego
Fig. 2. Variants of the course of $R_k(t)$ function in a discharge process during short-circuiting of the electric circuit

W celu uproszczenia, do estymacji energii pochłanianej w kanale wyładowania elektrycznego można zastosować metodę superpozycji. A więc, w odniesieniu do schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1, można zapisać

$$W_k = W_E + W_{L_i} + W_{L_o} + W_{C_o} \quad (3)$$

gdzie:

W_k – energia pochłaniana w kanale wyładowania elektrycznego,

W_E – energia dostarczona do kanału wyładowania ze źródła E w okresie $0-t_w$,

W_{L_i} – energia wyzwalana w kanale wyładowania wskutek transformacji elektromagnetycznej energii zmagazynowanej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania L_i ,

W_{L_o} – energia wyzwalana w kanale wyładowania za rachunek transformacji energii elektromagnetycznej zgromadzonej w indukcyjności obciążenia L_o ,

W_{C_o} – energia wyzwalana w kanale wyładowania wskutek energii elektrycznej zmagazynowanej w pojemności obciążenia C_o .

Jeżeli założy się również, że rezystancja aktywna indukcyjności wewnętrznej L_i i indukcyjności obciążenia L_o może być pominięta lub potraktowana jako część składowa rezystancji wewnętrznej źródła zasilania r i rezystancji obciążenia R_o (rys. 1), to w odniesieniu do schematów zastępczych, przedstawionych na rysunku 1, energia W_E dla wariantów a–c jest równa

$$W_E = \int_0^{t_w} \frac{[I_E(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (4)$$

gdzie $I_E(t)$ jest prądem pobieranym ze źródła E

$$I_E(t) = \frac{E}{r + R_{\Sigma}(t)} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{r + R_{\Sigma}(t)}{L_i} t \right] \right\} \quad (5)$$

$$R_{\Sigma}(t) = \frac{R_o(t)R_k(t)}{R_o(t) + R_k(t)} \quad (6)$$

Z kolei, dla schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 1a $W_{L_o} = 0$ i $W_{L_i} = 0$, a

$$W_{C_o} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{C_o}(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (7)$$

gdzie $I_{C_o}(t)$ jest prądem rozładowania pojemności C_o .

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{R_o + R_{\Sigma}(t)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{[R_o + R_{\Sigma}(t)]C_o} \cdot t \right\} \quad (8)$$

W odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1b, $W_{C_o} = 0$, zaś

$$W_{L_o} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{L_o}(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (9)$$

$$W_{L_i} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{L_i}(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (10)$$

gdzie: $I_{L_o}(t)$ i $I_{L_i}(t)$ – prąd w kanale wyładowania wskutek oddziaływania energii elektromagnetycznej zgromadzonej w indukcyjności odpowiednio L_o i L_i :

$$I_{L_o}(t) = \frac{E}{R_o + r} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} \cdot [R_o + R_{\Sigma}(t)] t \right\} \quad (11)$$

$$I_{L_i}(t) = \frac{E}{R_o + r} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} [r + R_{\Sigma}(t)] t \right\} \quad (12)$$

Z kolei, w odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1c $W_{L_o} = 0$ i $W_{L_i} = 0$.

Prąd rozładowania $I_{C_o}(t)$ pojemności C_o (Osikowski 1981)

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{\beta L_o} [1 - \exp(-\alpha t)] \operatorname{sh} \beta t \quad (13)$$

gdzie: $\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2}$; $\omega_o = 1/\sqrt{L_o C_o}$; $\alpha = [R_o + R_{\Sigma}(t)]/2 L_o$.

Charakter prądu rozładowania pojemności C_o zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_{\Sigma}(t)$. Rozpatrzenie wszystkich wariantów przekracza ramy niniejszego artykułu. Z tej przyczyny ograniczono się do rozpatrzenia tylko aperiodycznego procesu rozładowania pojemności C_o . Prąd rozładowania $I_{C_o}(t)$ pojemności C_o ma charakter aperiodyczny, jeżeli $R_o + R_{\Sigma}(t) > 2\sqrt{L_o/C_o}$. W takim przypadku

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{L_o} t [1 - \exp(-\alpha t)] \quad (14)$$

a energię W_{C_o} określa się wzorem (7).

W odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1d, energia W_{L_i} i prąd $I_{L_i}(t)$ są określane wzorami odpowiednio (10) i (12). Z kolei wartość energii elektrycznej doprowadzonej do kanału wyładowania elektrycznego wskutek wyzwalaania energii elektrycznej zmagazynowanej w pojemności C_o oraz energii pola

magnetycznego zmagazynowanego w indukcyjności L_o również zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_\Sigma(t)$. Najbardziej „wydajnym” procesem wyzwiania energii elektrycznej w kanale wyładowania elektrycznego jest proces aperiodyczny. W chwili komutacji awaryjnej $t = 0$ $I_{L_i}(0^-) = I_{L_o}(0^-) = E / (R_o + r + r_{L_o})$ a $U_{C_o}(0^-) = E r_{L_o} / (R_o + r + r_{L_o})$, gdzie r_{L_o} – rezystancja indukcyjności L_o . Wtedy

$$I_{C_o}(t) = \frac{E r_{L_o}}{(R_o + r + r_{L_o}) [R_o + R_\Sigma(t)]} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{[R_o + R_\Sigma(t)] C_o} t \right\} \quad (15)$$

$$I_{L_i}(t) = \frac{E}{R_o + r + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} [r + R_\Sigma(t)] t \right\} \quad (16)$$

$$I_{L_o}(t) = \frac{E}{(R_o + r + r_{L_o})} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} [R_o + r_{L_o} + R_\Sigma(t)] t \right\} \quad (17)$$

a wartości W_{C_o} , W_{L_i} i W_{L_o} określają wzory odpowiednio (7), (9) i (10).

2. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PRZY POWSTANIU ROZWARCIA W OBWODZIE WYJSCIOWYM ŹRÓDŁA ZASILANIA

Analizę wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na zależności energetyczne przy powstaniu rozwarcia w układzie: źródło zasilania – układ ochronny z nieliniową charakterystyką wyjściową – obciążenie, przeprowadzono na podstawie elektrycznych schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 3.

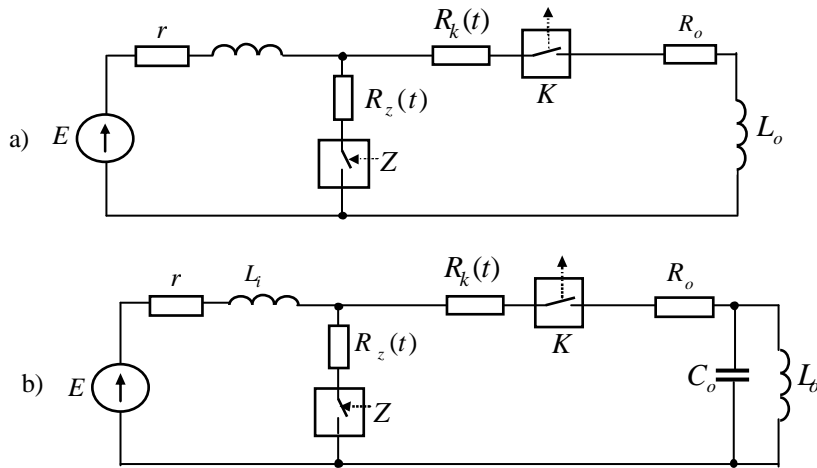
Przy rozwarciu za pomocą klucza K prąd I_k , napięcia U_k w kanale rozładowania i rezystancja R_k kanału wyładowania elektrycznego są następujące:

$$\left. \begin{aligned} I_k &= I_{ust}, & U_k &= U_{k_0}, & R_k &\approx 0 & \text{dla } t=0 \\ I_k &= I_k(t), & U_k &= U_k(t), & R_k &= R_k(t) & \text{dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k &= 0, & U_k &= 0, & R_k &\approx \infty & \text{dla } t > t_w \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

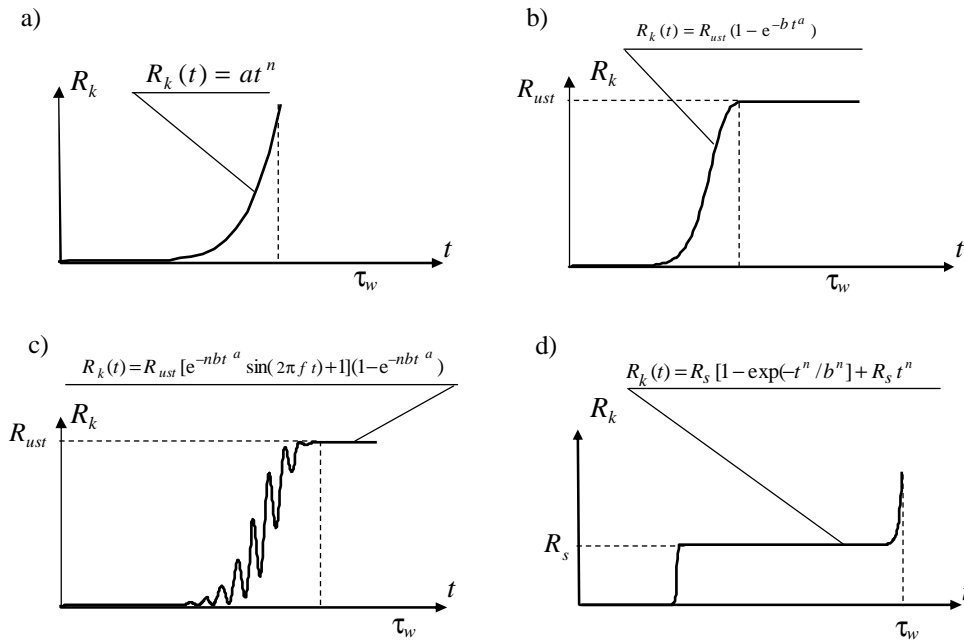
W celu uproszczenia analizy założono następujące prawdopodobne warianty symulacji przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania (rys. 4), a mianowicie:

- charakter potęgowy $R_k(t) = at^n$,
- charakter wykładniczy $R_k(t) = R_{ust} (1 - e^{-bt^a})$,
- charakter wykładniczo-oscylacyjny według zależności $R_k(t) = R_{ust} [e^{-nbt^a} \sin 2\pi f t + 1] (1 - e^{-nbt^a})$,
- charakter z uwzględnieniem „samodopasowania” impedancji wejściowej kanału wyładowania do impedancji wyjściowej źródła energii elektrycznej $R_k(t) = R_s [1 - \exp(-t^n/b^n)] + R_s t^n$, gdzie przez R_{ust} oznaczono wartość rezystancji kanału wyła-

dowania dla $t > t_w$, R_s jest wartością rezystancji kanału wyładowania w trybie dopasowania, a , b i n są współczynnikami aproksymacji.



Rys. 3. Podstawowe schematy zastępcze układu elektrycznego w trybie rozwarcia
Fig. 3. Basic substitute schemes of the electric system in breaking mode



Rys. 4. Warianty przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania podczas rozwierania obwodu elektrycznego
Fig. 4. Variants of the course of $R_k(t)$ function in a discharge process during breaking the electric circuit

Dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 3 wartość energii elektrycznej pochłanianej w kanale jest również determinowana sumą wartości energii pochodzącej od źródła zasilania i energii zgromadzonej w poszczególnych elementach reaktancyjnych L_o , L_i , C_o .

W odniesieniu do schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 3a można zapisać

$$W_E = \int_0^{t_w} [I_E(t)]^2 R_k(t) dt \quad (19)$$

gdzie $I_E(t)$ – prąd w kanale wyładowania elektrycznego wymuszony przez oddziaływanie źródła zasilania.

W chwili $t=0^-$ $R_z(0^-) \approx \infty$, $R_k(0^-) \approx 0$, a prąd pobierany ze źródła zasilania $I_{zz}(0^-) = E/r + R_o + r_{L_o}$. W dalszym ciągu można zapisać

$$I_{zz}(t) = \frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i + L_o} \cdot [r + R_z(t)] \right\} t \quad (20)$$

$$I_E(t) = \frac{E - I_{zz}(t)r}{R_k(t) + R_o + r_{L_o}} \quad (21)$$

a następnie

$$W_{L_o} = \int_0^{t_w} [I_{L_o}(t)]^2 R_k(t) dt \quad (22)$$

$$I_{L_o}(t) = -\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} \cdot [R_o + r_{L_o} + R_k(t) + R_z(t)] \right\} t \quad (23)$$

$$W_{L_i} = \int_0^{t_w} \left[\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} - I_{L_i}(t)r \right]^2 \cdot \frac{1}{R_k(t)} dt \quad (24)$$

$$I_{L_i}(t) = -\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} \cdot [r + R_z(t)] \right\} t \quad (25)$$

We wzorach (20) i (25)

$$R_z(t) = \frac{R_z(t) [R_k(t) + R_o + r_{L_o}]}{R_z(t) + R_k(t) + R_o + r_{L_o}} \quad (26)$$

Z kolei, w odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 3b, charakter prądu rozładowania zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_z(t)$. Ograniczono się do rozpatrzenia tylko aperiodycznego, tzn. najbardziej „wydajnego”, procesu wyzwiania energii elektromagnetycznej zgromadzonej w pojemności C_o i indukcyjności L_o .

W chwili $t=0^-$ prąd pobierany ze źródła zasilania $I_{ZZ}(0^-)=I_{L_i}(0^-)=I_{L_o}(0^-)=E/r+R_o+r_{L_o}$, $U_{C_o}=E$. Energię dostarczoną do kanału wyładowania ze źródła zasilania W_E określa się z wykorzystaniem wzorów (19), (20), (21) i (26), natomiast W_{L_o} i W_{L_i} określa się za pomocą wzorów (22), (23), (24) i (25), a W_{C_o} w tym przypadku można określić za pomocą wzorów:

$$W_{C_o} = \int_0^{t_w} [I_{C_o}(t)]^2 R_k(t) dt \quad (27)$$

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{R_o + R_k(t) + R_z(t)} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{[R_o + R_k(t) + R_z(t)]C_o}t\right\} \quad (28)$$

3. PRZYKŁAD OKREŚLANIA WPŁYWU INDUKCYJNOŚCI WEWNĘTRZNEJ ŹRÓDŁA ZASILANIA PRZY POWSTANIU AWARYJNEGO ROZWARCIA W OBWODZIE WYJŚCIOWYM TYPU LR

W nawiązaniu do rysunku 3a można założyć następujące różne wartości parametrów obwodu elektrycznego:

$E = 12, 24, 36, 48$ i 60 VDC;

$r = 2 \Omega$;

$L_i = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ i 10^{-4} H;

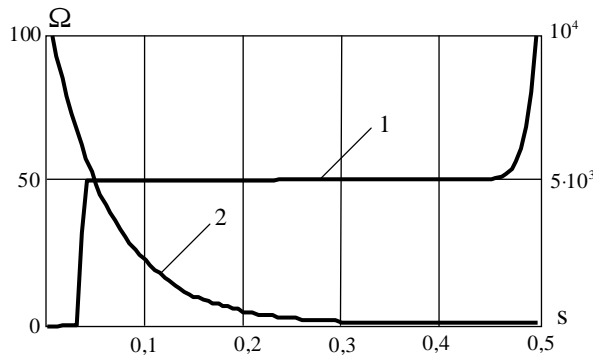
$R_o = 20, 50 \Omega$;

$r_{L_o} = 2 \Omega$;

$R_k(t) = R_s[1 - \exp(-t^n/b^n)] + R_s t^n$, $R_s = 50 \Omega$, $b = 0,1$, $n = 100$;

$R_z(t) = R(0) - \exp(-at)$, $R(0) = 10^4 \Omega$, $a = 10$.

Wykresy funkcji $R_k(t)$ (krzywa 1) i $R_z(t)$ (krzywa 2) dla założonych parametrów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 5. Wykresy funkcji: 1 – $R_k(t)$ i 2 – $R_z(t)$

Fig. 5. Graphs of functions: 1 – $R_k(t)$ and 2 – $R_z(t)$

Wartość energii dostarczonej do kanału wyładowania elektrycznego za okres od 0 do 0,5 s wskutek wyzwiania energii magnetycznej zgromadzonej w indukcyjności L_i określa się na podstawie wzorów (24), (25) i (26) jako

$$W_{L_i} = \int_0^{0,5} \left[\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \right]^2 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{L_i} [r + R_{\Sigma}(t)] t \right] \right\}^2 \frac{1}{R_k(t)} dt \quad (29)$$

Całkę (29) obliczono w sposób numeryczny z wykorzystaniem programu matematycznego Mathcad. Obliczenie W_{L_i} wykonano dla różnych wartości E , L_i , R_o , zaś wyniki obliczeń przedstawiono w tablicach 1 i 2.

Tablica 1. Wartość energii W_{L_i} wyzwianej w kanale wyładowania elektrycznego bez oddziaływania układu ochronnego zawierającego zaciski wyjściowe źródła zasilania

				E, VDC				
				12	24	36	48	60
R_o	20 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	2,5·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁵	2,2·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵
			10 ⁻³ H	2,5·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁴	2,2·10 ⁻⁴	4,1·10 ⁻⁴	6,2·10 ⁻⁴
			10 ⁻² H	2,5·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	2,2·10 ⁻³	4,1·10 ⁻³	6,2·10 ⁻³
			10 ⁻¹ H	2,5·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	2,2·10 ⁻²	4,1·10 ⁻²	6,2·10 ⁻²
	50 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	4,9·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁶	4,4·10 ⁻⁶	7,9·10 ⁻⁶	1,2·10 ⁻⁵
			10 ⁻³ H	4,9·10 ⁻⁶	1,9·10 ⁻⁵	4,4·10 ⁻⁵	7,9·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁴
			10 ⁻² H	4,9·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁴	4,4·10 ⁻⁴	7,9·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻³
			10 ⁻¹ H	4,9·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻³	4,4·10 ⁻³	7,9·10 ⁻³	1,2·10 ⁻²

Tablica 2. Wartość energii W_{L_i} wyzwianej w kanale wyładowania elektrycznego przy zwarciu zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej typu „rozwarcie”

				E, VDC				
				12	24	36	48	60
R_o	20 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	1,1·10 ⁻¹¹	2,2·10 ⁻¹¹	3,3·10 ⁻¹¹	4,4·10 ⁻¹¹	5,5·10 ⁻¹¹
			10 ⁻³ H	1,5·10 ⁻¹⁰	3,0·10 ⁻¹⁰	4,6·10 ⁻¹⁰	5,1·10 ⁻¹⁰	7,2·10 ⁻¹⁰
			10 ⁻² H	1,7·10 ⁻⁹	2,3·10 ⁻⁹	2,2·10 ⁻⁹	5,3·10 ⁻⁹	8,2·10 ⁻⁹
			10 ⁻¹ H	2,5·10 ⁻⁸	5,1·10 ⁻⁸	6,2·10 ⁻⁸	9,1·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁷
	50 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	2,6·10 ⁻¹²	5,0·10 ⁻¹²	6,6·10 ⁻¹²	9,9·10 ⁻¹²	1,1·10 ⁻¹¹
			10 ⁻³ H	1,7·10 ⁻¹¹	3,0·10 ⁻¹¹	5,0·10 ⁻¹¹	6,9·10 ⁻¹¹	8,1·10 ⁻¹¹
			10 ⁻² H	3,6·10 ⁻¹⁰	7,0·10 ⁻¹⁰	1,0·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻⁹	1,7·10 ⁻⁹
			10 ⁻¹ H	2,1·10 ⁻⁹	4,0·10 ⁻⁹	6,1·10 ⁻⁹	7,9·10 ⁻⁹	1,0·10 ⁻⁸

PODSUMOWANIE

Uzyskane analityczne wyrażenia do estymacji energii elektrycznej wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego wskutek oddziaływania źródła zasilania, jego indukcyjności wewnętrznej oraz parametrów obciążenia pozwalają, z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego, a priori określić stopień iskrobezpieczeństwa obwodu

elektrycznego, jak również dokonać analizy wrażliwości iskrobezpieczeństwa tego obwodu w zależności od zmian parametrów elektrycznych poszczególnych jego elementów.

Można stwierdzić, że wpływ indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania zależy od impedancji wejściowej obwodu chronionego, jak również od charakteru komutacji awaryjnej, zwarcia lub rozwarcia w tym obwodzie.

Przy pojemnościowym charakterze obciążenia w chwili powstania zwarcia na wyjściu źródła zasilania obecność indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania łagodzi jego oddziaływanie i zmniejsza szybkość wzrostu prądu i wartości energii elektrycznej wyzwalanej w punkcie zwarcia, zmniejszając także skutki opóźnienia zadziałania układu ochronnego.

Przy obciążeniu typu RL , w chwili powstania rozwarcia na wyjściu źródła zasilania około 20% energii magnetycznej, zgromadzonej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania jest wydzielane w kanale wyładowania elektrycznego, natomiast przy zadziałaniu układu ochronnego, dokonującego zwarcia zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej, wartość ta jest do pominięcia. Oczywiście w warunkach rzeczywistych występuje opóźnienie zadziałania układu ochronnego od chwili powstania komutacji awaryjnej.

Opóźnienie to powinno być uwzględnione przy symulacji zmiany w czasie rezystancji układu ochronnego lub przy obliczeniu odpowiednich całek w sposób numeryczny.

Literatura

1. Ciok Z. (1983): Procesy łączeniowe w układach energetycznych. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. Frączek J. (1995): Aparatura przeciwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne.
3. Lindmanowski W. (1988): Zarys teorii wyładowań w dielektrykach. Wyd. I. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
4. PN-EN 60079-11 Ed. 5.0: Electrical apparatus for explosive gas atmospheres Part 11: Intrinsic safety „i”.
5. PN-EN 60079-25. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 25: Systemy iskrobezpieczne.
6. Osowski J. (1981): Zarys rachunku operatorowego. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Henryk Passia

Adam Smoliński, Jerzy Świądrowski*, Natalia Howaniec**

NIEKONWENCJONALNE METODY ZAGOSPODAROWANIA DWUTLENKU WĘGLA

Streszczenie

Wzrost zapotrzebowania na energię oraz brak alternatywy dla paliw kopalnych, jako głównego surowca do jej produkcji, wymusza działania zmierzające do ograniczenia emisji dwutlenku węgla oraz poszukiwanie metod jego zagospodarowania. W artykule przedstawiono uzupełniające dla metod składowania w formacjach geologicznych sposoby zagospodarowania dwutlenku węgla, bazujące na koncepcjach synergii elektrowni węglowych, elektrowni jądrowej/wiatrowej/słonecznej i rafinerii wytwarzającej paliwa syntetyczne, metodach wykorzystywania dwutlenku węgla w syntezie chemicznej oraz składowania w postaci hydratów.

Unconventional methods of carbon dioxide management

Abstract

An increasing energy demand and the unquestionable leading role of fossil fuels in the energy mix enforce activities aiming at carbon dioxide emission reduction and new methods of its disposal. In the paper methods complementary to the sequestration of carbon dioxide in geological formations based on the concepts of synergy between coal power plants, nuclear/wind/solar power plants and refineries producing synthetic fuels as well as methods of carbon dioxide utilization in chemical synthesis and storage in the form of hydrates are presented.

WPROWADZENIE

Obecnie ponad 80% globalnej produkcji energii bazuje na procesie spalania paliw kopalnych, którego jednym z efektów ubocznych jest emisja dużej ilości zanieczyszczeń do atmosfery, zwłaszcza dwutlenku węgla. Pomimo braku jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o przyczyny ocieplenia klimatu o 0,4–0,6°C w ciągu ostatniego stulecia, istnieje zgoda co do konieczności podejmowania działań w celu zapobiegania emisji i redukcji ilości gazów cieplarnianych, w tym głównie dwutlenku węgla. Problem emisji dwutlenku węgla jest szczególnie istotny w przypadku polskiego sektora energetycznego wykorzystującego do produkcji energii elektrycznej, w ponad 95%, zasoby węgla.

Działania mające na celu ograniczenie stężenia dwutlenku węgla w atmosferze obejmują wprowadzenie nowych i udoskonalanie stosowanych obecnie technologii produkcji energii z paliw kopalnych, w celu podniesienia sprawności konwersji i wykorzystania energii elektrycznej oraz rozwój energetyki wykorzystującej paliwa jądrowe i źródła odnawialne. Z uwagi na to, że całkowite zastąpienie paliw kopalnych paliwem jądrowym i odnawialnymi źródłami energii, jest mało prawdopodobne, ko-

* Główny Instytut Górnictwa.

nieczne są działania zmierzające do unieszkodliwiania bądź zagospodarowywania dwutlenku węgla, powstającego w procesach stosowania do celów energetycznych gazu ziemnego, ropy naftowej i węgla. Obecnie wiele uwagi poświęca się składowaniu dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych w formacjach geologicznych (Smoliński, Howaniec 2007), takich jak między innymi:

- zbiorniki pozostałe po eksploatacji ropy naftowej i gazu ziemnego,
- wyeksploatowane złoża ropy naftowej, w przypadku których zatłaczanie dwutlenku węgla wspomaga wydobywanie (proces *Enhanced Oil Recovery* – EOR),
- głębokie poziomy wodonośne/solankowe,
- nieprzydatne ze względów technicznych i ekonomicznych głęboko zalegające złoża węgla oraz złoża pozostałe po zaprzestaniu eksploatacji; w takim przypadku zatłaczanie dwutlenku węgla może wspomagać odzysk metanu złożowego (proces *Enhanced Coal-Bed Methane* – ECBM).

Poza ryzykiem związanym z geologicznymi metodami unieszkodliwiania dwutlenku węgla, które wynika z prawdopodobieństwa przedostania się gazu do atmosfery, na przykład na skutek ruchów górotworu, istotną sprawą są ograniczone potencjalne pojemności, sekwestracyjne tych środowisk. W publikacji (Grimston i in. 2001) podano ilość i czas zatrzymywania dwutlenku węgla w zależności od miejsc składowania. I tak, ilość dwutlenku węgla, jaka może być składowana w formacjach geologicznych, w których jest prowadzony proces EOR szacuje się na 20–65 GtC. W przypadku pozabilansowych pokładów węglowych, wyeksploatowanych pokładów ropy naftowej i gazu ziemnego oraz głębokich poziomów wodonośnych, pojemności te są szacowane odpowiednio na 80–260, 130–500 i 30–650 GtC.

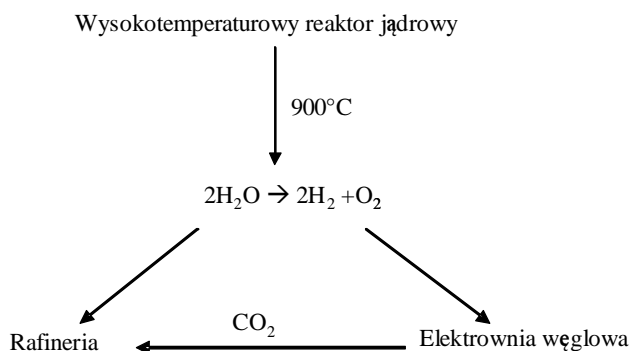
Na podstawie przedstawionych danych, jest zasadne poszukiwanie alternatywnych do składowania sposobów zagospodarowywania dwutlenku węgla. W artykule przedstawiono wybrane możliwości wykorzystania dwutlenku węgla do produkcji paliw i produktów syntezy chemicznej, bazując na koncepcjach synergii elektrowni jądrowej/wiatrowej/słonecznej, elektrowni węglowych oraz rafinerii wytwarzającej paliwa syntetyczne, metodach chemicznego zastosowania dwutlenku węgla oraz składowania w postaci hydratów.

1. METODA SYNERGII WYSOKOTEMPERATUROWYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH, ELEKTROWNI WĘGLOWYCH I RAFINERII WYTWARZAJĄCEJ PALIWA SYNTETYCZNE

Koncepcja synergii technologii produkcji paliw syntetycznych z węgla z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym została przedstawiona na rysunku 1 (Pieńkowski 2006; Taczanowski, Cetnar 2008; Taczanowski 2008; Sato i in. 1995; Hishida 1997).

W prezentowanej koncepcji surowcem do produkcji paliw jest powstający w elektrowni węglowej dwutlenek węgla oraz wodór pozyskiwany na drodze elektrolizy wody. Źródło energii stanowi ciepło odpadowe z wysokotemperaturowego reaktora jądrowego. Powstający w procesie tlen może być wykorzystany w procesie spalania węgla, co zwiększy efektywność procesu przemiany węgla w energię elektryczną

w porównaniu ze spalaniem węgla w powietrzu oraz pozwoli na eliminację emisji tlenków azotu.



Rys. 1. Synergia wysokotemperaturowego reaktora jądrowego, elektrowni węglowej i rafinerii produkującej paliwa syntetyczne; opracowanie własne na podstawie (Pieńkowski 2006)

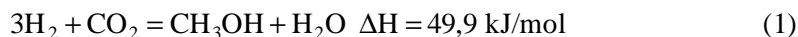
Fig. 1. Synergy of high-temperature nuclear reactor, coal-fired power station and refinery producing synthetic fuels; based on (Pieńkowski 2006)

Wysokotemperaturowe reaktory jądrowe znalazły się na liście tzw. reaktorów IV generacji, o wysokim stopniu bezpieczeństwa (Pieńkowski 2006; Taczanowski, Cetnar 2008). Reaktory te charakteryzują się małymi rozmiarami (niektóre typy mają wymiary 6×12 m) i są chłodzone helem. Obecnie ich moc cieplna nie przekracza kilkuset megawatów. Przy dużej wydajności zamiany ciepła w elektryczność, wynoszącej 45%, w reakcjach rozszczepienia jest spalane kilkadziesiąt ton paliwa rocznie. Prace nad budową wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych są prowadzone intensywnie między innymi w USA, Francji, Chinach, Japonii oraz RPA. Koszt otrzymania paliw silnikowych z węgla, z wykorzystaniem ciepła odpadowego z reaktora jądrowego, wynosi dla benzyny około 1 USD/dm³ i oleju napędowego 1,2 USD/dm³ (Taczanowski 2008). W procesie produkcji tych paliw z dwutlenku węgla pochodzącego z elektrowni węglowej należy uwzględnić dodatkowe korzyści wynikające ze zmniejszenia emisji dwutlenku węgla oraz z przychodu ze sprzedaży nadwyżek tlenu jako produktu ubocznego wytwarzania wodoru, co prowadzi do zmniejszenia kosztów do około 0,5 USD/dm³ (Taczanowski 2008).

2. KONCEPCJA SYNERGII ELEKTROWNI WĘGLOWYCH I RAFINERII WYTWARZAJĄCEJ PALIWA SYNTETYCZNE

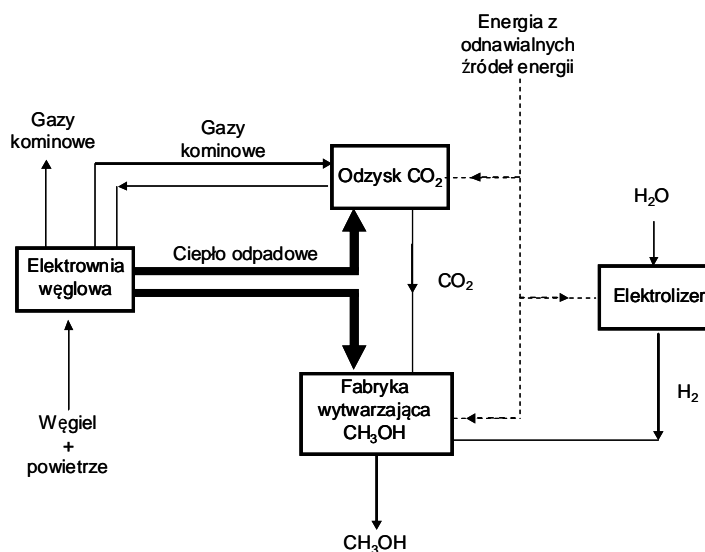
Roczna emisja dwutlenku węgla z wykorzystania energetycznego paliw kopalnych wynosi około 6 GtC, z czego około 20% przypada na produkcję energii elektrycznej w elektrowniach węglowych. Dla porównania światowe zapotrzebowanie na surowce dla przemysłu chemicznego do produkcji na przykład: etylenu, propylenu i metanolu wynosi tylko 0,09 GtC. Oznacza to, że tylko niewielka część dwutlenku węgla emitowanego przez elektrownie węglowe może być wykorzystana w syntezie chemicznej. Istotne z uwagi na redukcję emisji dwutlenku węgla, pochodzącego z elektrowni, może być jego wykorzystanie do produkcji metanolu jako paliwa trans-

portowego (Pruszek i in. 1997). Wodór potrzebny do produkcji metanu może być wytwarzany w procesie elektrolizy wody z użyciem energii ze źródeł odnawialnych (wodnej, wiatrowej) lub energii jądrowej:



Metanol może być następnie przetworzony na syntetyczną benzynę. Koszt produkcji paliw syntetycznych z dwutlenku węgla zależy w takim przypadku głównie od kosztu produkcji wodoru. Według obliczeń (Pruszek i in. 1997) cena metanolu wyprodukowanego z wykorzystaniem wodoru uzyskanego w najtańszym procesie – z reformingu gazu ziemnego parą wodną – nie jest obecnie konkurencyjna w Niemczech (cena rynkowa metanolu 0,125 USD/l), a cena benzyny syntetycznej może być konkurencyjna dla ceny rynkowej benzyny (0,9375 USD/l) tylko w przypadku zwolnienia z opodatkowania.

W publikacji (Mignard i in. 2003) przedstawiono analizę podobnego systemu produkcji metanolu do celów transportowych w warunkach Wielkiej Brytanii (rys. 2).



Rys. 2. Zastosowanie ciepła odpadowego i energii odnawialnej do produkcji metanolu z dwutlenku węgla uzyskiwanego z gazów wylotowych elektrowni węglowej; opracowanie własne na podstawie (Mignard i in. 2003)

Fig. 2. Application of waste heat and renewable energy to production of methanol based on carbon dioxide from coal-fired power plant exhaust gases (Mignard et al. 2003)

Analizie poddano system ciśnieniowych reaktorów zgazowania w powietrzu (cztery reaktory o łącznej mocy 1000 MW), zasilanych pyłem węglowym, z uwagi na większe o około 45% koszty produkcji energii elektrycznej w przypadku technologii zintegrowanego układu parowo-gazowego ze zgazowaniem węgla, IGCC – *Integrated Gasification Combined Cycle*. Do produkcji wodoru w procesie elektrolizy założono wykorzystanie nadwyżki energii ze źródeł odnawialnych poza godzinami szczytu. Energia elektryczna z paliw kopalnych była wykorzystywana wyłącznie w godzinach

szczytu w celu zapewnienia ciągłości procesu. Założono również możliwość wykorzystania ciepła odpadowego w przypadku starszych elektrowni o małej sprawności. Separacja dwutlenku węgla była prowadzona z zastosowaniem absorbenta MEA (monoetanolaminy). Produktem elektrolizy, oprócz sprężonego, schłodzonego i magazynowanego w zbiornikach wodoru, był również tlen, który mógł być wykorzystywany w procesie zgazowania lub do syntezy chemicznej w zakładach chemicznych, po przetransportowaniu rurociągiem pod ciśnieniem 3,0–5,0 MPa. Synteza metanolu była prowadzona z wykorzystaniem katalizatora Cu/ZnO/Al₂O₃ w procesie adiabatycznym, w temperaturze 230°C i pod ciśnieniem wejściowym 5,0 MPa. Układ rozdziału produktów procesu (metanol, woda, nieprzereagowany dwutlenek węgla i wodór) obejmował kolumny absorpcyjne i destylacyjne.

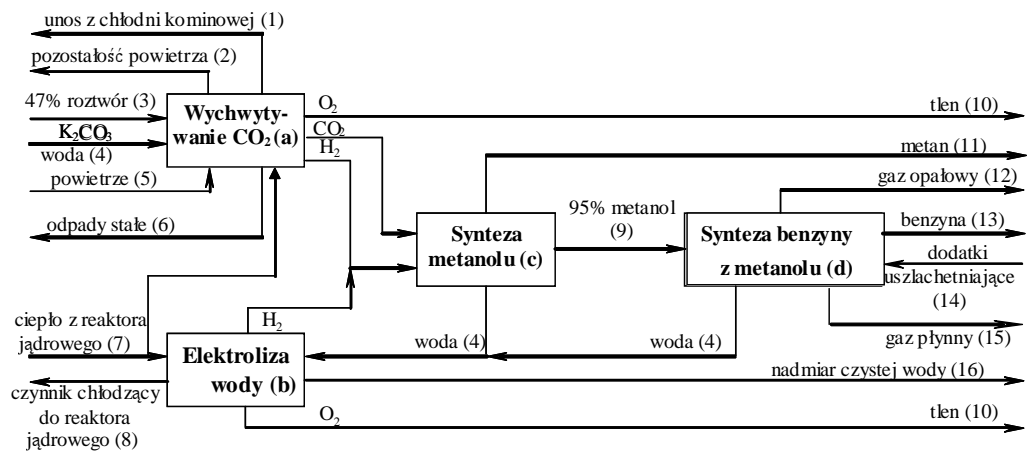
System taki pozwala na utylizację 1–3% dwutlenku węgla zawartego w gazach wylotowych z elektrowni, a ilość ta jest limitowana dostępnością energii ze źródeł odnawialnych w Wielkiej Brytanii. Całkowita sprawność systemu konwersji energii elektrycznej do metanolu (kW_{th}/kW_{el}) wynosi 58–68%, w przypadku wykorzystania ciepła odpadowego i zmniejsza się do 51–58%, jeśli jest konieczne zastosowanie procesowej pary wodnej. Minimalną cenę sprzedaży metanolu oszacowano na 0,27 GBP/litr. W przypadku możliwości sprzedaży tlenu z procesu elektrolizy koszt ten zmniejsza się o około 40%.

Metoda katalitycznego uwodorniania dwutlenku węgla do metanolu stanowi rozwiązanie interesujące dla przemysłu chemicznego jako alternatywa dla syntezy bazującej na gazie syntezy, który składa się głównie z tlenku węgla, wodoru i tylko niewielkich ilości dwutlenku węgla (Lachowska 2001; Fujita i in. 2001; Choi i in. 2001). Synteza ta wymaga jednak opracowania nowych katalizatorów, gdyż katalizatory tradycyjnie stosowane w przemyśle do syntezy metanolu (CuO/ZnO/Al₂O₃), stosowane w omawianym procesie, tracą aktywność wraz ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla w środowisku reakcyjnym. Badania nad nowymi katalizatorami są prowadzone w celu zmiany składu klasycznego katalizatora stosowanego w produkcji metanolu z gazu syntezy za pomocą różnych modyfikatorów, takich jak: Zr, Rh, Ti, Ga, Au, Mn, Mg (Lee i in. 1995) oraz innych metod jego preparatyki (Fujita i in. 2001; Carnes, Klabunde 2003). W Polsce w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach opracowano katalizator Cu/Zn/Al/Zr o składzie 66% wag. CuO, 27% wag. ZnO, 3% wag. Al₂O₃ i 4% wag. ZrO₂ (Lachowska 2001; Lachowska, Skrzypek, Krupa 2004). Jego skuteczność porównano ze skutecznością katalizatora przemysłowego (Cu/Zn/Al) oraz katalizatora o składzie katalizatora przemysłowego, otrzymanego za pomocą metody „cytrynianowej”. Badany proces syntezy metanolu był prowadzony w laboratoryjnym ciśnieniowym reaktorze rurowym ze złożem stałym. Na podstawie przeprowadzonych badań Autorka ta wykazała, że produkowany w procesie metanol nie zawierał żadnych, poza wodą, produktów ubocznych. Opracowany katalizator charakteryzuje się większą aktywnością niż katalizatory referencyjne oraz dużą stabilnością i selektywnością powyżej 80%.

3. METODA PRODUKCJI PALIW Z DWUTLENKU WĘGLA Z POWIETRZA (KONCEPCJA „ZIELONA WOLNOŚĆ”)

„Zielona Wolność” jest koncepcją produkcji na dużą skalę benzyny, paliwa lotniczego lub metanolu z dwutlenku węgla wychwytywanego z powietrza i wodoru pochodzącego z elektrolizy wody. Koncepcja ta została zaprezentowana przez naukowców z Narodowego Laboratorium w Los Alamos (Martin, Kubic 2007). Zaletą opracowanej koncepcji jest wykorzystanie znanych technologii, zaawansowanie technologiczne i duże szanse realizacji przemysłowej w niedalekiej przyszłości. Spotkała się ona z zainteresowaniem przemysłu i uzyskała pozytywne opinie niezależnych ekspertów. Podstawę opracowanej technologii stanowi nowo opracowany proces separacji i wychwytywania dwutlenku węgla z powietrza. Jego zintegrowanie z istniejącymi technologiami pozwoliłoby na produkcję wolnych od związków siarki, węglowo neutralnych ciekłych paliw i związków organicznych z konkurencyjnych cenowo surowców.

Schemat procesu produkcji syntetycznego paliwa z dwutlenku węgla z powietrza i wody (Martin, Kubic 2007) przedstawiono na rysunku 3. W koncepcji „Zielona Wolność” założono dzienną produkcję wynoszącą 3 mln litrów paliwa syntetycznego lub 5000 ton metanolu.



Rys. 3. Schemat procesu produkcji syntetycznych paliw z dwutlenku węgla z powietrza i wody; opracowanie własne na podstawie (Martin, Kubic 2007)

Fig. 3. Diagram of synthetic fuels production process from atmospheric carbon dioxide and water; based on (Martin, Kubic 2007): 1 – cooling tower drift, 2 – depleted air, 3 – 47% solution of K₂CO₃, 4 – raw water, 5 – air, 6 – solid wastes, 7 – hot medium from nuclear reactor, 8 – cool medium to nuclear reactor, 9 – 95% solution of methanol, 10 – oxygen, 11 – methane, 12 – fuel gas, 13 – gasoline, 14 – gasoline additives, 15 – LPG, 16 – excess clean water, a – CO₂ capture, b – water electrolysis, c – methanol synthesis, d – methanol-to-gasoline synthesis

Chemicznie dwutlenek węgla jest łatwo absorbowany w roztworze węglanu potasu, w którym reaguje z jonami CO_3^{2-} , tworząc HCO_3^- :



Stężenie dwutlenku węgla w atmosferze jest jednak bardzo małe, a opracowanie praktycznego systemu jego wychwytywania i odzysku stanowi duże wyzwanie. Powszechnie stosowane konwencjonalne metody absorpcji dwutlenku węgla nie nadają się do pozyskiwania go z powietrza, gdyż umożliwiają jego wychwytywanie w jednym cyklu, wynoszące 73%. W procesie stanowiącym podstawę omawianej koncepcji w pojedynczym cyklu jest wychwytywane ponad 95% dwutlenku węgla. Większa sprawność wychwytywania dwutlenku węgla wiąże się ze zmniejszonym wykorzystaniem energii przez redukcję ilości powietrza, która musi być użyta, aby otrzymać założoną ilość dwutlenku węgla.

Konwencjonalne termiczne procesy odzyskiwania zaabsorbowanego dwutlenku węgla wymagają dużych nakładów energii, co stanowi podstawową przeszkodę w ich praktycznym stosowaniu. W omawianej koncepcji opracowano nowy, bardzo selektywny, elektrolityczny proces odzyskiwania zaabsorbowanego dwutlenku węgla, w którym jest produkowany również wodór. Energia niezbędna do odzysku pochodzi ze sprzężonej z nowoczesną rafinerią elektrowni jądrowej, zapewniającej niższe koszty procesu niż elektrownia wiatrowa lub słoneczna. W celu redukcji kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, związanych z wychwytywaniem dwutlenku węgla, założono zastosowanie istniejącego systemu chłodzenia ewaporacyjnego wykorzystywanego w elektrowniach.

Analiza ekonomiczna kosztów uruchomienia zakładu produkującego 3 mln litrów syntetycznej benzyny jest szacowana na 5 mld USD, natomiast zakładu o wydajności 5000 ton metanolu na 4,6 mld USD. Około 50% całkowitych kosztów inwestycyjnych stanowi koszt budowy elektrowni jądrowej. Szacuje się, że koszt wyprodukowanej benzyny syntetycznej wyniesie 0,31 USD/l, natomiast metanolu 0,14 USD/l. Uwzględniając duże koszty inwestycji szacuje się, że na stacjach benzynowych koszt paliwa wyniesie 1,00 USD/l, natomiast metanolu 0,36 USD/l. Zredukowanie tych kosztów do 0,75 USD i 0,25 USD za litr odpowiednio benzyny i metanolu będzie jednak wymagało dalszego dopracowania koncepcji przez wprowadzenie nowszych, bardziej zaawansowanych technologii (Martin, Kubic 2007).

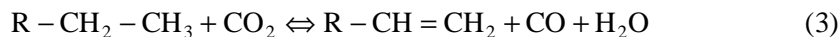
4. METODY CHEMICZNE WYKORZYSTYWANIA DWUTLENKU WĘGLA

Wśród metod chemicznych zagospodarowywania dwutlenku węgla są wymieniane procesy: odwodorniania lekkich alkanów, suchego reformingu metanu i produkcji poliwęglanów.

4.1. Metoda wykorzystania dwutlenku węgla w procesie odwodornienia lekkich alkanów

Wśród nowych, alternatywnych sposobów otrzymywania lekkich alkenów ($\text{C}_2\text{--C}_4$) zwraca uwagę metoda ich otrzymywania w obecności dwutlenku węgla

(Michorczyk, Ogonowski 2003a). Metoda ta ma dwie podstawowe zalety. Przede wszystkim pozwala na trwałe wiązanie dwutlenku węgla, a ponadto powstający w procesie tlenek węgla, stanowi surowiec w reakcji karbonylowania. Rola dwutlenku węgla w procesie otrzymywania lekkich alkenów nie jest jednoznacznie określona. Zakłada się dwie możliwości powstawania alkenów (Michorczyk, Ogonowski 2003a; 2003b). Według pierwszej alkeny powstają w wyniku utleniającego odwodornienia dwutlenkiem węgla, według następującej reakcji



Zgodnie z drugą metodą alkeny powstają w reakcji odwodornienia. Zwiększenie stopnia konwersji alkanu uzyskuje się przez wiązanie wodoru, powstającego w reakcji odwodornienia, w reakcji z dwutlenkiem węgla:



W procesie otrzymywania propenu w procesie odwodornienia propanu z parą wodną (stosunek para wodna: $C_3H_8 = 5:1$) w temperaturze $600^\circ C$ równowagowy stopień konwersji C_3H_8 wynosi 75%, podczas gdy ten sam proces prowadzony w obecności dwutlenku węgla powoduje wzrost stopnia konwersji do 92% (Michorczyk, Ogonowski 2001, 2003a).

Wykorzystanie dwutlenku węgla w procesach odwodornienia lekkich alkanów oraz alkiloaromatów czy w reakcjach utleniającego łączenia metanu, jest szeroko dyskutowane w literaturze (Wang i in. 2000a, 2000b; Dziembaj i in. 2000). Dużo uwagi poświęca się badaniom katalitycznym procesu odwodornienia alkanów w obecności dwutlenku węgla. Główne wysiłki skupiają się na wykorzystaniu do tego celu tlenków metali przejściowych, głównie żelaza i chromu (Michorczyk, Ogonowski 2003a). Badane są również możliwości zastosowania innych katalizatorów, takich jak na przykład Ga_2O_3 (reakcje odwodornienia etanu) czy mieszanych katalizatorów tlenkowych bazujących na tlenkach Cr, Mn, La, V i K (wykorzystywanych w procesach konwersji alkanów C2–C6 (Nakagawa i in. 2000; Krylov, Mamedov, Mirzabekova 1995). Systematyczne badania aktywności wybranych katalizatorów tlenkowych, takich jak: Cr_2O_3 , Ga_2O_3 , CeO_2 , V_2O_5 , ZrO_2 , SiO_2 i Al_2O_3 w procesie odwodorniania propanu do propenu w obecności dwutlenku węgla wykazały, że badane katalizatory procesu można uszeregować, według malejącej aktywności, w następujący sposób (Michorczyk, Ogonowski 2003a):



4.2. Metoda wykorzystywania dwutlenku węgla w procesie suchego reformingu metanu

Wśród stosowanych na świecie sposobów produkcji gazu syntezowego z metanu wymienia się:

- konwersję metanu parą wodną:



- częściowe utlenianie metanu:



- suchy reforming metanu:



W reakcji konwersji metanu parą wodną stosunek $\text{H}_2:\text{CO}$ w otrzymywanym gazie syntezowym wynosi 3:1. Gaz taki może być wykorzystany w procesie produkcji wodoru. W procesie częściowego utlenienia metanu stosunek $\text{H}_2:\text{CO}$ w powstającym gazie syntezowym wynosi 2:1 i może on być wykorzystany w syntezie Fischera i Tropscha.

W procesie suchego reformingu metanu z metanu i dwutlenku węgla jest produkowany gaz syntezowy o stosunku $\text{H}_2:\text{CO}$ wynoszącym 1:1. Reforming metanu dwutlenkiem węgla jest obecnie jednym z najintensywniej badanych procesów katalitycznych (Bradford, Vannice 1999; Lewicki i in. 2002; Nowosielska, Józwiak, Rynkowski 2003). Zaletą tego procesu jest produkcja gazu o dużej czystości w przeciwieństwie do procesu reformingu parowego, w którym produkt zawiera około 2% nieprzereagowanego metanu. W procesie suchego reformingu metanu wartość ta zmniejsza się poniżej 0,1% (Irusta, Cornaglia, Lombardo 2002; Nowosielska, Józwiak, Rynkowski 2003). Zmniejszenie stosunku $\text{H}_2:\text{CO}$ do 1:1 pozwala na bezpośrednie wykorzystanie produkowanego gazu syntezowego do dalszych syntez chemicznych, takich jak na przykład produkcja oksoalkoholi, poliwęglanów czy formaldehydu. Omawiając reakcje suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla trzeba uwzględnić również możliwość zachodzenia reakcji równoległych i następczych, co prowadzi do zmniejszenia stosunku $\text{H}_2:\text{CO}$. Wśród tych reakcji należy wymienić odwróconą reakcję konwersji parą wodną (odwrócona reakcja WGS):



oraz tzw. reakcję Sabatiera:



Zachodzenie reakcji równoległych bądź następczych sprawia, że skład otrzymywanej mieszaniny gazowej jest różny, zależnie od warunków prowadzenia procesu, takich jak: temperatura, ciśnienie, wyjściowy skład gazu, czynniki kinetyczne oraz rodzaj użytego katalizatora.

Szczegółowy przegląd badań nad katalizatorami stosowanymi w procesach suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla, ze wskazaniem ich wad i zalet oraz problemów w ich stosowaniu, przedstawiono w publikacjach (Bradford, Vannice 1999; Lewicki i in. 2002; Nowosielska, Józwiak, Rynkowski 2003; Pańczyk i in. 2003; Kasprzyk-Majak i in. 2003). Krótką charakterystykę katalizatorów suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla podano również w publikacji (Rynkowski 2003), w której wskazano na katalizatory niklowe jako najczęściej stosowane ze względu na konkurencyjność cenową oraz dużą aktywność w omawianej reakcji. Do

wad tych katalizatorów należy zaliczyć zawęglanie, prowadzące do ich dezaktywacji. Depozyt węglowy, odkładający się na powierzchni katalizatorów, pochodzi z reakcji rozkładu metanu i dysproporcjonowania tlenku węgla w reakcji Boudouarda, w wyniku której powstaje dwutlenek węgla i amorficzny węgiel, odkładający się na powierzchni katalizatora:



W literaturze można również znaleźć informacje na temat badań nad suchym reformingiem metanu dwutlenkiem węgla, z wykorzystaniem praktycznie wszystkich metali grup VIII–X układu okresowego, najczęściej naniesionych na nośniki nieredukowalne, takie jak na przykład Al_2O_3 , La_2O_3 , MgO , SiO_2 i częściowo redukowalne, na przykład ZrO_2 czy CeO_2 . Badane są również układy bimetaliczne, na przykład Pt-Sn, i wielometaliczne na przykład Ni-Rh-Pt. W publikacji (Nowosielska, Józwiak, Rynkowski 2003) wykazano, że bimetaliczne katalizatory Ni-Rh/ Al_2O_3 odznaczają się większą aktywnością w porównaniu z monometalicznymi katalizatorami Ni i Rh w temperaturze 500°C. Autorzy Ci stwierdzili ponadto, że katalizator Ni charakteryzuje się największą podatnością na dezaktywację spośród wszystkich badanych katalizatorów. Pańczyk i inni (2003) w badaniach wykazali ciekawe własności katalizatora NiO-MgO- Al_2O_3 , polegające na dużej odporności na zawęglanie w porównaniu z układami Ni/ Al_2O_3 .

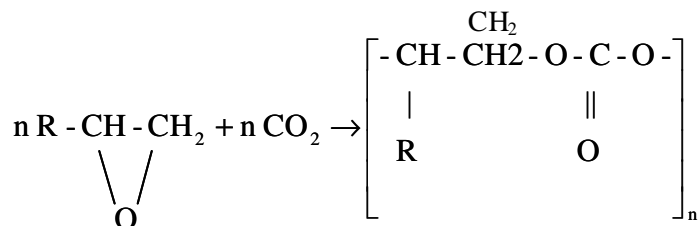
Pierwszą stosowaną technologią z wykorzystaniem suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla jest opracowana w Stanach Zjednoczonych w Sterling Chemical Inc. Process SPARG (*sulphur passivated reforming*) technologia otrzymywania gazu syntezowego o odpowiednim stosunku H_2 :CO. Inną technologią również z wykorzystaniem suchego reformingu metanu dwutlenkiem węgla jest technologia CALCOR otrzymywania tlenku węgla o dużym stopniu czystości z gazu ziemnego lub gazu płynnego (Rynkowski 2003).

4.3. Metoda wykorzystywania dwutlenku węgla jako monomeru w produkcji poliwęglanów

Poliwęglany są termoplastycznymi tworzywami sztucznymi o wielostronnych możliwościach zastosowania (Tokarzewski 1982). Charakteryzują się masą cząsteczkową około 100 000, topią się bez rozkładu w temperaturze 200–300°C (zależnie od masy cząsteczkowej i zastosowanego wielofunkcyjnego fenolu). Poliwęglany są formowane metodą wtrysku, stłaczania i wwalcowania. Czyste produkty z poliwęglanu są bezbarwne i przejrzyste przy jednoczesnej bardzo dobrej wytrzymałości mechanicznej. Charakteryzują się odpornością na działanie wody oraz doskonałą opornością dielektryczną (do ok. 100 kV/mm).

Interesującą metodą otrzymywania poliwęglanów jest bezfosgenowa metoda polegająca na reakcji dwutlenku węgla z epitenkami, prowadzona pod ciśnieniem rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset atmosfer w rozpuszczalnikach, na przykład w dioksanie

w zakresie temperatury 30–100°C, z zastosowaniem katalizatorów, głównie związków metaloorganicznych (Tokarzewski 1982):



Metoda ta stanowi alternatywę dla przemysłowej metody syntezy poliwęglanów polegającej na prowadzeniu reakcji polikondensacji na granicy rozdziału faz (Tokarzewski 1982), w której wodny roztwór dianu sodu jest mieszany z roztworem fosgenu w toluenie lub innym rozpuszczalniku organicznym.

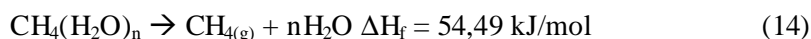
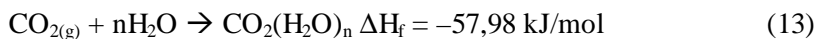
5. METODA POZYSKIWANIA METANU Z JEGO HYDRATÓW Z JEDNOCZESNĄ SEKWESTRACJĄ DWUTLENKU WĘGLA

Obserwowany na świecie stały wzrost zużycia energii spowodował zwiększone zainteresowanie sektora energetycznego paliwami kopalnymi, które traktowano do tej pory jako niedostępne lub nieekonomiczne w eksploatacji. Wśród nich na szczególną uwagę zasługują hydraty metanu (Lee, Holder 2001; Rice 2006; Rath, Marder 2007; Opara, Hupka 2007), w których cząsteczki metanu są uwięzione w strukturze krystalicznej tworzonej przez cząsteczki wody. Szacuje się, że w hydratách metanu znajduje się około 10 000 Gt węgla organicznego (Opara, Hupka 2007; Sloan, Koh 2007). Złoża hydratów metanu są wykrywane za pomocą metody sejsmiki refleksyjnej BSR (*Bottom Simulating Reflection*) (Singh, Minshull, Spence 1993). Na podstawie prowadzonych badań szacuje się, że wydobyć z pokładów sedimentacyjnych z dna oceanów mogłoby dostarczyć 160 m³ metanu z 1 m³ hydratów (Rath, Marder 2007; Kvenvolden 2002). Podstawową przeszkodę w eksploatacji tak zgromadzonych zasobów stanowi jednak sposób ich wydobywania.

Tworzenie się hydratów metanu i ich stabilność są uwarunkowane czynnikami zewnętrznymi, w tym temperaturą i ciśnieniem. Stabilność hydratów metanu wymaga zachowania odpowiednio wysokiego ciśnienia przy niskiej temperaturze (Opara, Hupka 2007). W rozważanych metodach wydobywania metanu ze złóż jego hydratów zakłada się destabilizację struktury hydratu przez zmniejszenie ciśnienia poniżej punktu stabilności hydratu lub podwyższenie temperatury powyżej tego punktu. Destabilizację złóż hydratów można osiągnąć przez wprowadzanie związków chemicznych o silnych wiązaniach wodorowych (glikolu etylenowego czy metanolu, które destabilizowałyby strukturę hydratu przez zmniejszenie ciśnienia poniżej punktu jego stabilności). Wiele uwagi poświęca się również koncepcji pozyskania metanu ze złóż jego hydratów z wykorzystaniem zdolności dwutlenku węgla do tworzenia hydratów. Zgodnie z tą koncepcją zakłada się wydobywanie metanu związanego w postaci hydratów przez jego zastąpienie dwutlenkiem węgla (Nakano, Yamamoto, Ohgaki 1998; Opara, Hupka 2007).

Realizacja konwersji hydratów metanu do hydratów dwutlenku węgla wymaga jednak zrozumienia procesu hydrodynamiki zatłaczania i transportu dwutlenku węgla do miejsc nagromadzenia hydratów metanu, termodynamiki tworzenia i dysocjacji hydratów metanu, dwutlenku węgla i ich mieszanin oraz kinetyki dysocjacji i tworzenia hydratów i ich konwersji. Warunki równowagowe dysocjacji hydratów metanu i tworzenia hydratów dwutlenku węgla są funkcją ciśnienia, temperatury, frakcji molowych dwutlenku węgla i metanu w mieszaninie i charakterystyki medium porowatego. Ze zmniejszeniem wielkości porów warunki równowagowe przesuwają się w kierunku wyższych ciśnień i niższych temperatur.

Reakcja tworzenia hydratu dwutlenku węgla jest reakcją egzotermiczną, a ciepło tworzenia hydratu dwutlenku węgla jest większe niż ciepło dysocjacji metanu, zapewniając energię potrzebną do rozkładu hydratów metanu (Nakano, Yamamoto, Ohgaki 1998; Sivaraman 2003):



Dwutlenek węgla wykazuje również względną selektywność w stosunku do metanu w fazie hydratów; wzrasta wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia. W badaniach Seo, Lee, Yoon (2001) zaobserwowano ponad 90% molowe stężenie hydratów dwutlenku węgla w fazie hydratów, przy utrzymywanym ponad 40% molowym stężeniu dwutlenku węgla w fazie gazowej. Istnieje jednak granica wymiany hydratów metanu na hydraty dwutlenku węgla związana z pozostawianiem cząsteczek metanu w małych przestrzeniach i zajmowaniem przez cząsteczki dwutlenku węgla większych przestrzeni (średnica Van der Waalsa dla dwutlenku węgla wynosi 0,47 nm, a dla metanu 0,43 nm). Z publikacji (Lee i in. 2003) wynika, że około 64% metanu może zostać odzyskane z hydratów o składzie $\text{CH}_4 \cdot 6,05\text{H}_2\text{O}$. Obecnie jednak informacje dotyczące badania mieszanin hydratów gazowych są znikome.

Istnieje niewielki zakres, w którym tworzenie hydratów dwutlenku węgla następuje w wyższej temperaturze i pod niższym ciśnieniem niż dysocjacja hydratów metanu. Na wielkość tego zakresu dodatkowo wpływa mieszanie dwutlenku węgla i metanu oraz obecność medium porowatego. Wraz ze wzrostem udziału molowego dwutlenku węgla w mieszaninie dwutlenek węgla-metan jest konieczne zapewnienie wyższych temperatur i niższych ciśnień do tworzenia hydratów dwutlenku węgla i dysocjacji hydratów metanu. Ze zmniejszeniem wielkości porów medium porowatego są wymagane wyższe ciśnienia i niższa temperatura do tworzenia/dysocjacji hydratów w mieszaninie.

W warunkach zwiększonego ciśnienia dwutlenek węgla może występować w formie ciekłej. Ciekły dwutlenek węgla tworzy hydraty w niższej temperaturze niż temperatura dysocjacji hydratów metanu. W związku z tym zatłaczany dwutlenek węgla może nie być wiązany w postaci hydratów, co może prowadzić do zakłócenia stabilności zbiornika wodnego oraz emisji dwutlenku węgla lub zdysocjowanego metanu.

W literaturze na temat różnic entalpii dla hydratów dwutlenku węgla i metanu w mediach porowatych można znaleźć sprzeczne dane. Kształt i wielkość porów również wpływa na warunki tworzenia i dysocjacji hydratów oraz ich właściwości termo-

dynamiczne. Błędne szacowanie wartości tych wielkości może mieć znaczący wpływ na efektywność konwersji hydratów metanu do hydratów dwutlenku węgla. Istnieje potrzeba dokładniejszego szacowania na podstawie danych eksperymentalnych procesów tworzenia i dysocjacji hydratów w naturalnych osadach. Obecnie metoda sekwestracji dwutlenku węgla z dysocjacją hydratów metanu znajduje się na etapie badań podstawowych zjawiska.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania prowadzone w różnych ośrodkach wskazują na znaczne możliwości stosowania różnych metod zagospodarowywania dwutlenku węgla, pochodzącego ze źródeł antropogenicznych, jako uzupełnienia składowania w strukturach geologicznych. W artykule wykazano korzyści związane z synergią energetyki jądrowej z energetyką węglową oraz możliwości wykorzystania dwutlenku węgla w różnych procesach chemicznych (np. w procesie odwodorniania lekkich alkanów, suchego reformingu metanu, katalitycznego uwodornienia do metanolu czy też jako monomeru w procesie produkcji poliwęglanów). Przedstawiono również nowatorską koncepcję produkcji paliw syntetycznych z wody i dwutlenku węgla pozyskiwanego z powietrza.

Biorąc pod uwagę skalę zagadnienia, większość metod chemicznych ma jednak małe znaczenie, ze względu na ograniczone zapotrzebowanie na produkty technologii (np. metanol, alkeny, poliwęglany), lecz należy je uwzględniać jako uzupełnienie wielkotonażowych metod składowania dwutlenku węgla. Opracowanie metody tworzenia hydratów dwutlenku węgla może w przyszłości zastąpić składowanie w strukturach geologicznych, choć w przypadku Polski metoda ta nie znajdzie bezpośredniego zastosowania ze względu na uwarunkowania geograficzne. Uwzględniając realia krajowe, zwłaszcza zasoby węgla i konieczność dywersyfikacji źródeł energii, jako najkorzystniejsze wydają się być metody redukcji emisji dwutlenku węgla, bazujące na synerгии węglowo-jądrowej.

Literatura

1. Bradford M.C.J., Vannice M.A. (1999): CO₂ reforming of CH₄, Catalysis reviews. Science and Engineering 41, s. 1–42.
2. Carnes C.L., Klabunde K.J. (2003): The catalytic methanol synthesis over nanoparticle metal oxide catalysts. Journal of Molecular Catalysis 194, s. 227–236.
3. Choi Y., Futagami K., Fujitani T., Nakamura J. (2001): The role of ZnO in Cu/ZnO methanol synthesis catalysts – morphology effect or active site model? Applied Catalysis 208, s. 163–167.
4. Dziembaj R., Kustrowski P., Badstube T., Papp H. (2000): On the deactivation of Fe,K/active carbon catalysts in the course of oxidative dehydrogenation of ethylbenzene with carbon dioxide. Topics in Catalysis 209, s. 317–326.
5. Fujita S.I., Moribe S., Kanamori Y., Kakudate M., Takezawa N. (2001): Preparation of a coprecipitated Cu/ZnO catalyst for the methanol synthesis from CO₂ – effects of the calcinations and reduction conditions of the catalytic performance. Applied Catalysis 207, s. 121–128.
6. Goel N. (2006): In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues. Journal of Petroleum Science and Engineering 51 s. 169–184.

7. Grimston M.C., Karakoussis V., Fouquet R., van der Vorst R., Pearson P., Leach M. (2001): The European and global potential of carbon dioxide sequestration in tackling climate change. *Climate Policy* 1, s. 155–171.
8. Hishida M. (1997): Nuclear energy conversion systems for arresting global warming. *Energy Conversion and Management* 38, s. 1365–1375.
9. Irusta S., Cornaglia L.M., Lombardo E.A. (2002): Hydrogen Production Using Ni–Rh on ZrO₂ as Potential Low-Temperature Catalysts for Membrane Reactors. *Journal of Catalysis* 210, s. 263–272.
10. Kasprzyk-Majak R., Góralski J., Ruppert A., Rynkowski J.M. (2003): Katalizatory platynowe na nośnikach bitlenkowych w reakcji reformingu metanu ditlenkiem węgla. *Przemysł Chemiczny* nr 8–9, s. 717–720.
11. Krylov O.V., Mamedov A.K., Mirzabekova S.R. (1995): Oxidation of Hydrocarbons and Alcohols by Carbon Dioxide on Oxide Catalysts. *Industral & Engineering Chemistry Research* 34, s. 474–482.
12. Kvenvolden K.A. (2002): Methane hydrate in the global organic carbon cycle. *Terra Nova* 14, s. 302–306.
13. Lachowska M., Skrzypek J., Krupa K. (2004): Uwodornienie dwutlenku węgla w kierunku metanolu na katalizatorze miedziowo-cynkowym z dodatkami Ga oraz Zr. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* nr 25, s. 1249–1253.
14. Lachowska M. (2001): Synteza metanolu z dwutlenkiem węgla i wodoru. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* 22(3D), s. 863–868.
15. Lee H., Seo Y.T., Moudrakovski I.L., Ripmeester J.A. (2003): Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide. *Angewandte Chemie* 115, s. 5202–5205.
16. Lee J.S., Moon I.K., Lee S.H., Lee S.Y., Kim Y.G. (1995): Modified Cu/ZnO/Al₂O₃ catalysts for methanol synthesis from CO₂/H₂ and CO/H₂. *Catalysis Letters* 34, s. 93–99.
17. Lee S.Y., Holder G.D. (2001): Methane hydrate potential as a future energy source. *Fuel Processing Technology* 71, s. 181–186.
18. Lewicki A., Paryjczak T., Józwiak W.K., Rynkowski J.M. (2002): Catalysts of carbon dioxide reforming of methane. *Wiadomości Chemiczne* nr 56, s. 279–313.
19. Martin F.J., Kubic W.L. (2007): Green Freedom. A Concept for Producing Carbon-Neutral Synthetic Fuels and Chemicals (Patent Pending), Los Alamos, <http://bioage.typepad.com/greencarcongress/docs/GreenFreedom.pdf> (dostęp 27.01.2009).
20. Michorczyk P., Ogonowski J. (2001): Analiza termodynamiczna reakcji konwersji propanu do propylenu w obecności ditlenku węgla. *Chemia* 98(4-Ch), s. 44–50.
21. Michorczyk P., Ogonowski J. (2003a): Aktywność katalizatorów heterogenicznych w reakcji konwersji propanu do propenu w obecności CO₂. *Przemysł Chemiczny* nr 8–9, s. 741–743.
22. Michorczyk P., Ogonowski J. (2003b): Dehydrogenation of propane in the presence of carbon dioxide over oxide-based catalysts. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, Vol. 78, s. 41–47.
23. Mignard D., Sahibzada M., Duthie J.M., Whittington H.W. (2003): Methanol synthesis from flue-gas CO₂ and renewable electricity: a feasibility study. *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 28, s. 455–464.
24. Nakagawa K., Kajita C., Ide Y., Okamura M., Kato S., Kasuya H., Ikenaga N., Kobayashi T., Suzuki T. (2000): Promoting effect of carbon dioxide on the dehydrogenation and aromatization of ethane over gallium-loaded catalysts. *Catalysis Letters* Vol. 64, s. 215–221.
25. Nakano S., Yamamoto K., Ohgaki K. (1998): Natural gas exploitation by carbon dioxide from gas hydrate fields-high-pressure phase equilibrium for an ethane hydrate system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A. Journal of Power and Energy* 212, s. 159–163.

26. Nowosielska M., Józwiak W.K., Rynkowski J.M. (2003): Bimetaliczne katalizatory Ni-Rh naniesione na Al_2O_3 w reakcji reformingu metanu ditlenkiem węgla. *Przemysł Chemiczny* nr 8–9, s. 744–747.
27. Opara A., Hupka J. (2007): Hydraty metanu jako źródło energii. *Czysta Energia* nr 7–8, s. 36–37.
28. Pańczyk M., Gac W., Denis A., Sikorska C., Czubryt-Idzik M., Gołębiowski A., Stołeczki K., Borowecki T. (2003): Katalizatory $\text{Ni}/\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ w reakcji reformingu metanu z parą wodną i/lub ditlenkiem węgla. *Przemysł Chemiczny* nr 8–9, s. 748–751.
29. Pieńkowski L. (2006): Energetyka jądrowa w Polsce. Synergia przemysłu węglowego i energii jądrowej. *Polityka Energetyczna* nr 9, s. 277–286.
30. Pruszek R., Oeljeklaus G., Haupt, G., Zimmermann G., Jansen D., Ribberink J.S. (1997): The role of IGCC in CO_2 abatement. *Energy Conversion and Management* Vol. 38, s. 153–158.
31. Rath B.B., Marder J. (2007): Methane hydrates – clean energy from the sea. *Advanced Materials & Processes* VI, s. 41–42.
32. Rice W. (2006): Hydrogen production from methane hydrate with sequestering of carbon dioxide. *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 31, s. 1955–1963.
33. Rynkowski J.M. (2003): Reforming metanu ditlenkiem węgla. *Przemysł Chemiczny* nr 8–9, s. 766–768.
34. Sato S., Nagata H., Notomi R., Minatsuki I., Uchida S. (1995): A study of a new electrical energy storage system in which nuclear energy is used for methanol production. *Progress in nuclear energy* Vol. 29, s. 217–223.
35. Seo Y.T., Lee H., Yoon J.-H. (2001): Hydrate phase equilibria of the carbon dioxide, methane and water system. *Journal of Chemical and Engineering Data* 46, s. 381–384.
36. Singh S.C., Minshull T.A., Spence G.D. (1993): Velocity Structure of a Gas Hydrate Reflector. *Science* Vol. 260, s. 204–207.
37. Sivaraman R. (2003): The potential role of hydrate technology in sequestering carbon dioxide. *Gas TIPS* Fall 2003, s. 4–7.
38. Sloan E.D., Koh C.A. (2007): *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. CRC Press.
39. Smoliński A., Howaniec N. (2007): Możliwości redukcji stężenia dwutlenku węgla w atmosferze w procesie sekwestracji z wykorzystaniem formacji geologicznych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* nr 44(1), s. 14–22.
40. Taczanowski S. (2008): Symbioza węgla z energią jądrową dla produkcji paliw płynnych. *Polityka Energetyczna* nr 11, s. 499–516.
41. Taczanowski S., Cetnar J. (2008): Węgiel z energią jądrową – symbioza dla produkcji paliw płynnych i gazowych, <http://www.ftj.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/combined.pdf> (dostęp dn. 27.01.2009).
42. Tokarzewski L. (1982): *Chemia i technologia związków wielkocząsteczkowych oraz półproduktów do ich syntezy*. Tom I: Tworzywa. Skrypt Uniwersytetu Śląskiego. Katowice, Wydaw. Uniw. Śląskiego.
43. Wang S., Murata K., Hayakawa T., Hamakawa S., Suzuki K. (2000a): Simultaneous dehydrogenation and isomerization of n-butane to isobutene over $\text{Cr}/\text{WO}_3-\text{ZrO}_2$ catalysts. *Catalysis Letters* Vol. 66, s. 13–17.
44. Wang S., Murata K., Hayakawa T., Hamakawa S., Suzuki K. (2000b): Dehydrogenation of ethane with carbon dioxide over supported chromium oxide catalysts. *Applied Catalysis A*, 196, s. 1–8.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Barbara Białecka