

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICTWO I ŚRODOWISKO
MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK 3

GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2002



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2002

Rada Programowa ds. Wydawnictw: *prof. dr hab. inż. Henryk Filcek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Jerzy Sadowski (zastępca przewodniczącego), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. Sławomir Gibowicz, prof. dr hab. Jerzy Gustkiewicz, prof. dr hab. med. Danuta Koradecka, prof. dr hab. inż. Joanna Krajewska-Pinińska, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański*

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

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redakcja wydawnicza i korekta

Ewa Gliwa

Małgorzata Kuśmirek

Barbara Jarosz

Skład i łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Adres Redakcji:

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych
Głównego Instytutu Górnictwa, 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1
tel. (0-32) 259-24-03, 259-24-04, 259-24-05
fax 032/259-65-33
e-mail: cintexmk@gig.katowice.pl

Spis treści

ANDRZEJ NIEROBISZ

Badania modelowe dynamicznej odporności kotwi	5
Model tests of bolt dynamic resistance	

MALGORZATA WYSOCKA

Zależność stężeń radonu od warunków geologiczno-górnictwowych na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego	25
Dependence of radon concentrations on the area of the upper silesian coal basin on geological and mining conditions	

KRYSTYNA STEC

Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego	43
Seismic activity of the upper Silesian Coal Basin	

RYSZARD BOGUCKI

Program komputerowy do ilościowej analizy obrazów termograficznych dla przegród budowlanych	59
Computer program for the quantitative analysis of thermographic images for building partitions	

OLGA KASZOWSKA

Metoda prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach na terenach górniczych	69
Method of cost prediction of damage removal in buildings and mining areas	

Vacat

Andrzej Nierobisz

BADANIA MODELOWE DYNAMICZNEJ ODPORNOŚCI KOTWI

Streszczenie

W polskich kopalniach rud miedzi rejestruje się kilka tysięcy zjawisk sejsmicznych rocznie. Są to wstrząsy o energii dochodzącej do 10^9 J. W większości przypadków po zaistniałych wstrząsach nie stwierdza

się widocznych zmian w stropie i obudowie. Obserwuje się jednak szereg niekorzystnych zjawisk będących skutkami wstrząsów. Mając na uwadze powyższe w Głównym Instytucie Górnictwa rozpoczęto badania nad dostosowaniem obudowy kotwiowej do warunków wzmożonej aktywności sejsmicznej górotworu [10].

Dostępne informacje z zakresu teorii stateczności dynamicznej konstrukcji oraz zagraniczne wyniki badań kotwi pozwalają na stwierdzenie, że dynamiczna charakterystyka wytrzymałościowa kotwi różni się od charakterystyki statycznej. W niniejszym opracowaniu dokonano analizy wytrzymałości dynamicznej kotwi z wykorzystaniem modelu obciążenia wywołanego udarem spadającej masy oraz opracowano założenia i skale podobieństwa do badań modelowych. Przeprowadzone obliczenia spodziewanych wartości sił dynamicznych były podstawą do zaprojektowania stoiska do badań kotwi wykonanych w skali geometrycznej 1:2. Opisano przeprowadzone badania, wykonano ich analizę oraz przedstawiono wnioski, które można streścić w sposób następujący:

1. Rozbieżności między statycznymi a dynamicznymi parametrami wytrzymałościowymi kotwi wynikają z następujących zjawisk:
 - przy zwiększaniu prędkości obciążenia następuje zmiana granicy plastyczności i wytrzymałości; dynamiczna granica plastyczności i wytrzymałości jest większa od statycznej,
 - nagłe naprężenia o wartości przekraczającej statyczną wytrzymałość doraźną powodują zniszczenie materiału dopiero po upływie określonego czasu, odkształcenia i naprężenia w dynamicznie obciążonym ustroju zależą od sprężystości jego podatności i stopni swobody układu,
 - naprężenia i odkształcenia rozchodzą się w postaci fal.
2. Badania modelowe w skali 1:2 pozwoliły na zmierzenie wartości sił dynamicznych występujących w czasie obciążania kotwi ekspansyjnych typu KSpn-18 udarem spadającej masy w fazie odkształceń sprężystych i plastycznych. W warunkach naturalnych jedna kotew rozprężna podwiesza górotwór o masie około 4 ton. Ważniejsze wyniki badań modelowych dla przypadku zniszczenia podkładki przy pierwszym udarze, przeniesione na powyższe kotwie w skali 1:1 wynosiłyby:
 - masa spadająca – 4077 kg,
 - wysokość udaru – 0,3 m,
 - energia kinetyczna udaru – 12 kJ,
 - siła dynamiczna udaru – 384 kN.
3. Systematyczne obciążenia udarowe kotwi w wyniku wstrząsów lub robót strzałowych w kopalniach rud miedzi, prowadzonych w niewielkiej odległości od tychże kotwi, powodują kumulowanie się odkształceń plastycznych, w efekcie kotwie rozprężne są szczególnie podatne na zerwanie. Przykładami występowania takiego zjawiska są przypadki zerwania kotwi przy opadaniu skał stropowych o grubości zaledwie kilkudziesięciu centymetrów, których ciężar przypadający na jedną kotew jest niewspółmiernie mały.
4. Powyższe wyniki badań modelowych wymagają weryfikacji za pomocą badań w skali 1:1.

Model tests of bolt dynamic resistance

Summary

In Polish copper mines annually several thousand of seismic phenomena are recorded. These are tremors with energy reaching 10^9 J. In the majority of events after occurred tremors visible changes as concerns the roof and support have not been ascertained. However, one observes a number of unfavourable phenomena being the effects of tremors. Considering the above-mentioned fact, at the Central Mining Institute investigations relating to the adaptation of roof bolting to conditions of increased seismic activity of the rock mass were started.

Owing to available information with respect to the theory of the dynamic stability of construction and the results of foreign investigations relating to bolts, it is possible to ascertain that the strength dynamic characteristic of bolts differs from the static characteristic. In the present article an analysis of the dynamic strength of bolts was carried out, using the model of load caused by the impact of falling mass, moreover, assumptions and similarity scales to model tests were worked out. The carried out calculations of anticipated values of dynamic forces constituted the basis to design a stand for bolt testing, performed on a geometric scale equal to 1:2. The carried out investigations were described; one has prepared their analysis and has presented conclusions, which can be summarized as follows:

The discrepancy between static and dynamic strength characteristics of bolts result from the following phenomena:

- when increasing the load velocity, a change of the limit of plasticity and strength follows, the dynamic plasticity and strength limit is higher than the static one,
- sudden stresses of value exceeding the immediate static strength cause the destruction of the material only after a determined time, the deformations and stresses in a dynamically loaded structure depend on its elastic flexibility and degrees of structure freedom,
- stresses and deformations propagate in the form of waves.

Model tests on a 1:2 scale enabled to measure the values of dynamic forces occurring during the loading of expansive bolts of KSpn-18 type by the impact of falling mass in the phase of elastic and plastic deformations. In natural conditions one expansive bolt suspends rock mass of about 4 tons of mass. The results of model tests of major importance in the case of destruction of the washer during the first impact, transmitted to the above-mentioned bolts on a 1:1 scale, would amount to:

- falling mass – 4077 kg,
- impact height – 0.3 m,
- impact kinetic energy – 12 kJ,
- impact dynamic force – 384 kN.

Systematic impact loads of bolts as a result of tremors and blasting operations in copper ore mines conducted not far away from these bolts cause accumulation of plastic deformations; the result is that expansive bolts are particularly susceptible to break. Examples of occurrence of such a phenomenon constitute cases of bolt break in the event of fall of roof rocks with thickness of merely of several dozen of centimetres, the weight of which per one bolt is incommensurably low.

The above-mentioned results require verification by means of tests on a 1:1 scale.

1. WPROWADZENIE

W polskich kopalniach rud miedzi rejestruje się kilka tysięcy zjawisk sejsmicznych rocznie. Są to wstrząsy o energii dochodzącej do 10^9 J. W większości przypadków po zaistniałych wstrząsach nie stwierdza się widocznych zmian w stropie i obudowie. Skutki destrukcji stropu pojawiają się stosunkowo rzadko i zwykle widoczne są dopiero po pewnym czasie. Tym niemniej obserwuje się następujące zjawiska będące skutkiem wstrząsów [2]:

- spadek naciągu wstępnego kotwi rozprężnych w granicach 30÷50%,

- przypadki zerwania kotwi podczas opadania skał stropowych o grubości zaledwie kilkudziesięciu centymetrów, których ciężar przypadający na jedną kotwę jest niewspółmiernie mały w porównaniu z jej nośnością,
- obwały skał stropowych,
- powstawanie szczelin między skotwionymi warstwami, a następnie pękanie i opadanie skał,
- obsypywanie się skał wokół podkładki,
- wypadanie drobnych odłamków skalnych między kotwiami, pociągające za sobą proces dalszych destrukcji.

Mając na uwadze powyższe zjawiska w Głównym Instytucie Górnictwa rozpoczęto badania nad dostosowaniem obudowy kotwionej do warunków wzmożonej aktywności sejsmicznej [10].

Informacje z zakresu teorii stateczności dynamicznej konstrukcji [3, 4] oraz zagraniczne wyniki badań kotwi [12] pozwalają na stwierdzenie, że dynamiczna charakterystyka wytrzymałościowa kotwi różni się od charakterystyki statycznej. Rozbieżności te wynikają z następujących zjawisk:

- przy zwiększaniu prędkości odkształcenia następuje przesunięcie granicy plastyczności,
- wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia następuje zwiększenie doraźnej wytrzymałości i zwiększenie naprężeń niszczących,
- deformacje i naprężenia kotwi zależne są od wielkości masy uderzającej (uderzenie sprężyste lub niesprężyste),
- naprężenia i odkształcenia rozchodzą się w postaci fal.

W celu weryfikacji powyższych stwierdzeń przeprowadzono badania na modelach kotwi w skali 1:2. Zakres badań obejmował:

- teoretyczną analizę dynamicznej odporności kotwi,
- określenie skali podobieństwa modelowego,
- obliczenia spodziewanych wielkości sił dynamicznych,
- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska do badań modelowych kotwi w skali 1:2,
- wykonanie badań i analizę wyników.

2. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI DYNAMICZNEJ KOTWI

Wynikiem działania obciążeń dynamicznych modelowanych udarem spadającej masy mogą być:

- sprężyste odkształcenie kotwi i powrót układu do stanu pierwotnego,
- plastyczne odkształcenie kotwi, podkładki i pojawienie się pęknięć w żerdzi,
- zerwanie żerdzi, zniszczenie podkładki i nakrętki.

W rozważaniach teoretycznych rozpatrzono przypadek pierwszy, przy założeniu, że kotwę jest ustrojem o jednym stopniu swobody. Założono, że na końcówkę kotwi

z podkładką i nakrętką z wysokości h spada ciało o masie m z prędkością V . Nadając kotwi umownie cechy układu sprężystego (sprężyny) o pomijalnie małej masie własnej i współczynniku sztywności k oznacza się przemieszczenie spowodowane jednostkowym obciążeniem przez x . Dynamiczne równanie ruchu układu, jak na rysunku 1, ma w tym przypadku postać [1, 8]

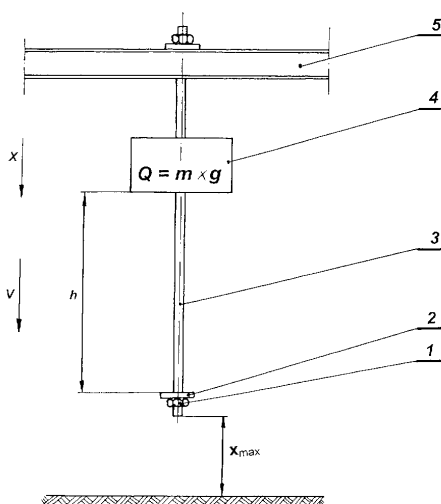
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (1)$$

gdzie:

m – spadająca masa, kg;

x – przemieszczenie, m;

ω – częstość drgań własnych masy uderzającej, s^{-1} .



Rys. 1. Schemat badania kotwi udarem masy: 1 – nakrętka, 2 – podkładka, 3 – badana kotew, 4 – spadający ciężar, 5 – belka wspornika, $x_{\max}$ – deformacja żerdzi kotwiowej

Fig. 1. Scheme of bolt testing by mass impact: 1 – nut, 2 – washer, 3 – tested bolt, 4 – falling weight, 5 – cantilever beam, $x_{\max}$ – bolt rod deformation

Częstość drgań własnych masy uderzającej określona jest zależnością [11]

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

gdzie:

k – współczynnik sztywności rozciągania żerdzi kotwiowej

$$k = \frac{ES}{l} \quad (3)$$

- E – moduł Younga materiału żerdzi, Pa;
 S – pole powierzchni przekroju poprzecznego żerdzi, m²;
 l – długość żerdzi, m.

Rozwiązanie ogólne równania (1) można przedstawić w postaci

$$x(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (4)$$

Różniczkując równanie (4) względem czasu, uzyskuje się

$$\frac{dx}{dt} = A \omega \cos \omega t - B \omega \sin \omega t \quad (5)$$

Stałe A i B wyznacza się z warunków początkowych.

Warunki brzegowe, do których należy chwila zetknięcia się masy uderzającej z podkładką kotwi, mają postać

$$x(0) = 0, \text{ m i } \frac{dx}{dt}(0) = V \neq 0, \text{ m/s} \quad (6)$$

Po wstawieniu warunków (6) do (4) i (5) otrzymuje się

$$x(0) = A \sin 0 + B \cos 0 = 0 \text{ stąd } B = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = A \omega \cos \omega t - B \omega \sin \omega t = V, \text{ po wykonaniu obliczeń otrzymuje się } A = \frac{V}{\omega}.$$

Uzyskane wartości stałych A i B podstawia się do równania (4), otrzymując ogólne równanie przemieszczeń masy uderzającej

$$x = \frac{V}{\omega} \sin \omega t \quad (7)$$

Analiza wyrażenia (7) wskazuje, że podczas uderzenia, masa uderzająca przemieszcza się sinusoidalnie, osiągając największe przemieszczenie

$$x_{\max} = \frac{V}{\omega} \quad (8)$$

po upływie okresu drgań własnych od początku uderzenia, czyli po czasie

$$t = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{k}{m}}} \quad (9)$$

Natomiast po przejściu połowy okresu drgań własnych, to jest przy

$$t = \frac{\pi}{\omega} \quad (10)$$

masa uderzająca oddziela się od powierzchni styku z podkładką kotwi, przy czym jej prędkość jest równa prędkości początkowej ze znakiem przeciwnym. Wynika stąd, że

największa siła oddziaływania masy uderzającej na kotew występuje w chwili wyrażonej równaniem (10) największego przemieszczenia (8) masy, a więc odkształcenia żerdzi. Wartość tej największej siły wynosi

$$F_{\text{dyn max}} = x_{\text{max}} k = \frac{V}{\omega} k \quad (11)$$

Zważywszy, że energia kinetyczna masy uderzającej

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad (12)$$

zmienia się w całości w energię potencjalną odkształcenia (jeden stopień swobody)

$$E_p = \frac{x_{\text{max}}^2}{2} k = \frac{F_{\text{max}}^2}{2k} \quad (13)$$

to z porównania (12) i (13) wynika, że

$$F_{\text{dyn max}} = \sqrt{mV^2 k} = \sqrt{2E_k k} \quad (14)$$

$$x_{\text{max}} = \sqrt{\frac{mV^2}{k}} = \sqrt{\frac{2E_k}{k}} \quad (15)$$

Naprężenia w żerdzi kotwi pochodzące od obciążenia siłą dynamiczną (14) określa się z zależności

$$\delta_{\text{dyn max}} = \frac{F_{\text{dyn max}}}{S} \quad (16)$$

Po podstawieniu do (16) zależności (14) otrzymuje się

$$\delta_{\text{dyn max}} = \frac{\sqrt{2E_k k}}{S} \quad (17)$$

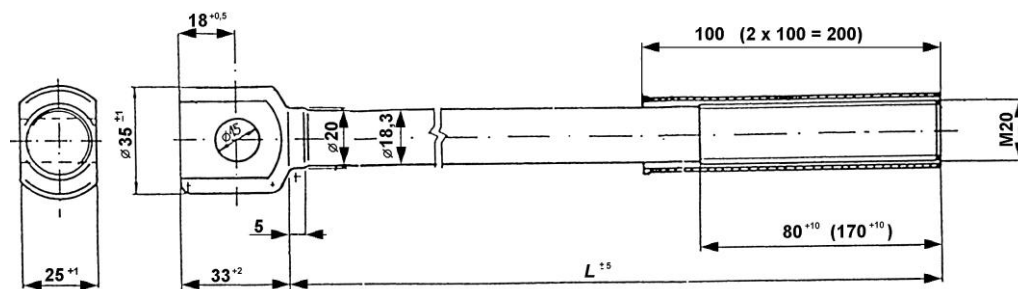
Równania (14) i (15) upoważniają do stwierdzenia, że największa siła i największe wydłużenie żerdzi przy dynamicznym jej obciążeniu masą m zależą od energii kinetycznej masy a nie od wielkości masy lub prędkości z osobna. Zależności (14) i (15) pozwalają na wstępne określenie tylko maksymalnych wartości przemieszczeń i obciążeń dynamicznych, bez wnikania w ich przebieg. Powyższe zależności zostały wyprowadzone dla sytuacji, kiedy występuje sprężyste odkształcenie żerdzi kotwi i powrót układu do stanu pierwotnego.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Założenia do badań modelowych

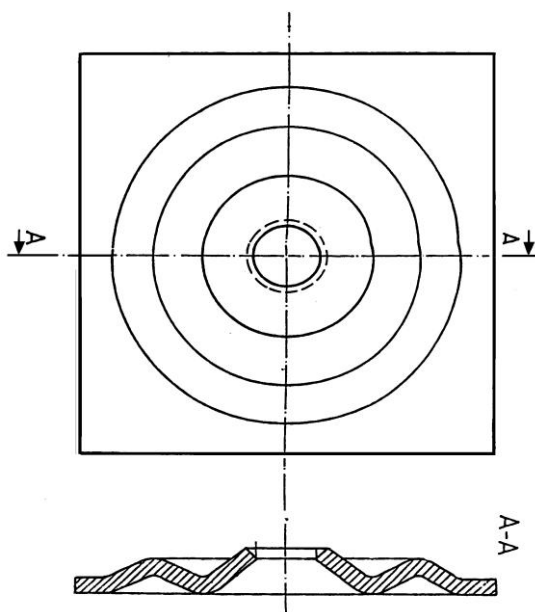
W badaniach modelowych kotwi na stanowisku przyjęto następujące założenia:

- skala geometryczna 1:2 podobieństwa mechanicznego została uwarunkowana możliwościami stanowiska związanymi z wielkością masy i maksymalną wysokością, z jakiej jest możliwe jej opuszczanie,
- średnica nominalna modeli kotwi oraz wymiar podkładki jest dwukrotnie mniejszy od typowych wymiarów kotwi ekspansyjnych KSpn-18 (rys. 2 i 3),



Rys. 2. Żerdź kotwi rozprężnej typu KSpn-18

Fig. 2. Rod of expansive bolt of KSpn-18 type



Rys. 3. Podkładka kształtowa kotwi KSpn-18

Fig. 3. Shape washer of KSpn-18 bolt

- głównym parametrem determinującym wytrzymałość żerdzi kotwi modelowej i rzeczywistej jest średnica nominalna żerdzi (przez średnicę nominalną rozumie się najmniejszą średnicę przekroju żerdzi),
- wpływ podkładki na nośność kotwi w obliczeniach teoretycznych i badaniach został pominięty,
- kotwie rzeczywiste i modelowe wykonane są z tego samego gatunku stali, ich charakterystyka wytrzymałościowa w zakresie sprężystym jest zgodna z uogólnionym prawem Hooke’a,
- dynamiczne właściwości materiału kotwi modelowych i rzeczywistych są równe, co najmniej ich statycznym odpowiednikom,
- dynamiczne właściwości wytrzymałościowe materiału kotwi, a zwłaszcza dynamiczna granica plastyczności i dynamiczna wytrzymałość doraźna, nie zmieniają się w czasie badań i są niezależne od współrzędnych położenia rozważanego punktu tego materiału,
- rozrzuty i tolerancje wymiarów kotwi modelowej i rzeczywistej oraz wymiarów poprzecznego przekroju nie wpływają na dynamiczną charakterystykę obudowy,
- na graniczne wartości parametrów wytrzymałościowych żerdzi kotwionych pod obciążeniem dynamicznym nie wpływają takie czynniki jak: naprężenia własne materiału, temperatura otoczenia, masa własna (modelowych i rzeczywistych) kotwi,

Celem badań było wyznaczenie siły dynamicznej powodującej zniszczenie kotwi.

3.2. Skale podobieństwa modelowego

Zjawiska, zachodzące w geometrycznie podobnych układach nazywa się podobnymi, jeżeli w nich, we wszystkich odpowiadających sobie punktach, stosunki jednoimiennych wartości tworzą liczby stałe. Stosunki te zwane są stałymi podobieństwa lub współczynnikami (skalami) podobieństwa modelowego [5, 7, 9].

W opisywanych badaniach układem naturalnym (rzeczywistym) był układ kotwi rozprężnych typu KSpn-18 zabudowanych w stropie wyrobiska podziemnego wraz z układem obciążeń górotworu działającym na kotwie.

Układem modelowym był natomiast układ kotwi miniaturowych, wykonanych w skali geometrycznej 1:2 zabudowanych oraz obciążanych w stoisku badawczym, według schematu zbliżonego do warunków rzeczywistych.

Zgodnie z techniczną teorią uderzenia [6], siła dynamiczna lub energia kinetyczna mogą być zastąpione ich obliczeniowymi równoważnikami statycznymi, powodującymi zbliżone do dynamicznych efekty. Zgodnie z takim tokiem rozumowania, każdy układ obciążony dynamicznie może być przekształcony w równoważny układ statyczny. Wynika stąd, że w przypadku modelowania obudowy kotwionej pod obciążeniem dynamicznym, obowiązywać będą również skale podobieństwa mechanicznego, przyjęte lub określone w badaniach obudowy kotwionej pod obciążeniem statycznym.

Niezależnie od tego, do odwzorowania parametrów dynamicznych, konieczne jest określenie skal, charakteryzujących zjawisko uderowego wymuszania obciążeń w modelu, co zgodnie z przyjętą koncepcją odbywać się będzie w postaci uderu masy spadającej z określonej wysokości i mającej określoną energię kinetyczną. Podkreślić należy, że te skale dynamicznego podobieństwa dotyczą układu zewnętrznego i nie odnoszą się do parametrów wewnętrznych samych kotwi modelowych.

Przyjmując, że **skalą podobieństwa** jest stosunek danej wartości modelu do odpowiadającej wartości naturalnej, otrzymuje się następujące wartości skal podobieństwa:

- Skala geometryczna podobieństwa średnic nominalnych żerdzi kotwowych

$$\alpha_S = 9 \text{ mm} : 18 \text{ mm} = 1 : 2 \quad (18)$$

- Skala podobieństwa pól powierzchni przekrojów poprzecznych

$$\alpha_F = \frac{3,14 \cdot 9^2}{4} : \frac{3,14 \cdot 18^2}{4} = 9^2 : 18^2 = \alpha_S^2 = 1 : 4 \quad (19)$$

- Skala podobieństwa masy spadającej (działającej uderowo na kotew). Można ją określić ze wzoru

$$m = V_o \rho \quad (20)$$

gdzie:

- V_o – objętość masy spadającej (bijak), m^3 ;
- ρ – gęstość masy spadającej, kg/m^3 .

Przechodząc do skal, otrzymuje się

$$\alpha_m = \alpha_{V_o} \alpha_p \quad (21)$$

Ponieważ założona skala geometryczna $\alpha_S = 1 : 2$ więc $\alpha_{V_o} = \alpha_S^3 = 1 : 2^3 = 1 : 8$. Przyjmując, że bijak rzeczywisty i modelowy wykonane są z tego samego materiału, otrzymuje się skalę podobieństwa mas uderowych

$$\alpha_p = 1 : 1 = 1 \quad (22)$$

$$\alpha_m = \alpha_S^3 = 1 : 8 \quad (23)$$

- Skala podobieństwa przyspieszeń mas uderzających.

W rzeczywistości i w modelu, spadek pionowy mas uderzających zachodzi w ziemskim polu grawitacyjnym. Stąd skala przyspieszenia ziemskiego bijaka wynosi

$$\alpha_g = 1 : 1 = 1 \quad (24)$$

- Skala podobieństwa ciężarów przyłożonych do kotwi statycznie. Określić ją można z zależności

$$Q = mg = F_{st}$$

czyli

$$\alpha_Q = \alpha_m \alpha_g = \alpha_{st} \quad (25)$$

co po wstawieniu (23) i (24) daje

$$\alpha_Q = \alpha_{st} = \alpha_s^3 = 1:8 \quad (26)$$

- Skala podobieństwa czasu trwania uderu zewnętrznego.

Czas swobodnego spadku ciała w ziemskim polu grawitacyjnym z wysokości h określa następujące równanie (bez prędkości początkowej)

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Przechodząc do skali podobieństwa przy $\alpha_h = \alpha_s$

$$\alpha_t = \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_g}} \quad (27)$$

co po wstawieniu (24) prowadzi do zależności

$$\alpha_t = \sqrt{\alpha_s} = 1:1,41 \quad (28)$$

- Skala podobieństwa energii potencjalnej masy uderzającej.

Na podstawie równania

$$E_p = mgh$$

jest

$$\alpha_{Ep} = \alpha_m \alpha_g \alpha_h \quad (29)$$

co po uwzględnieniu (23), (24) i (27) daje

$$\alpha_{Ep} = \alpha_s^4 = 1:16 \quad (30)$$

- Skala podobieństwa prędkości przemieszczania się masy uderzającej

Może być określona na podstawie równania

$$V = \sqrt{2gh}$$

Przy przejściu na skale podobieństwa, otrzymuje się

$$\alpha_V = \sqrt{\alpha_g \alpha_h} \quad (31)$$

Po uwzględnieniu $\alpha_g = 1$ i $\alpha_h = \alpha_s$, otrzymuje się

$$\alpha_V = \sqrt{\alpha_s} = \sqrt{\frac{1}{2}} = 1:1,41 \quad (32)$$

- Skala podobieństwa energii kinetycznej masy uderzającej.
Może być obliczona na podstawie wzoru

$$E_K = \frac{mV^2}{2}$$

Przy przejściu na skalę podobieństwa, otrzymuje się

$$\alpha_{Ek} = \alpha_m \alpha_v^2 \quad (33)$$

Po wstawieniu (23) i (32), otrzymuje się

$$\alpha_{Ek} = \alpha_s^3 \sqrt{\alpha_s}^2 = \alpha_s^4 = 1:16 \quad (34)$$

co jest zgodne ze skalą podobieństwa energii potencjalnej (30).

- Skala podobieństwa współczynnika sztywności żerdzi.
Określana jest równaniem (3)

$$k = \frac{ES}{1}$$

Przechodząc na skalę podobieństwa, otrzymuje się

$$\alpha_k = \alpha_F = \alpha_s^2 = 1:4 \quad (35)$$

- Skala podobieństwa częstości i okresu drgań własnych układu złożonego z masy uderzającej i kotwi może być określona równaniem (2)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Po wstawieniu odpowiednich skal, otrzymuje się

$$\alpha_\omega = \sqrt{\frac{\alpha_k}{\alpha_m}} = \sqrt{\frac{\alpha_s^2}{\alpha_s^3}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_s}} = 1,41:1 \quad (36)$$

Analogicznie

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\alpha_T = \frac{1}{\alpha_\omega} = 1:1,41 \quad (37)$$

- Skala podobieństwa odkształceń dynamicznych żerdzi kotwowej określana jest równaniem (15)

$$x_{\max} = \sqrt{\frac{mV^2}{k}} = \sqrt{\frac{2E_k}{k}}$$

Wstawiając odpowiednie skale (34) i (35) uzyskuje się

$$\alpha_{x_{\max}} = \sqrt{\frac{\alpha_S^4}{\alpha_S^2}} = \sqrt{\alpha_S^2} = 1:2 \quad (38)$$

- Skala podobieństwa sił dynamicznych (masowych) przyłożonych do kotwi udarowo może być określona równaniem (14)

$$F_{\text{dyn max}} = \sqrt{mV^2k} = \sqrt{2E_k k}$$

Po podstawieniu odpowiednich skal (34) i (35) do powyższego równania, otrzymuje się

$$\alpha_{F_{\text{dyn max}}} = \sqrt{\alpha_S^4 \alpha_S^2} = \sqrt{\alpha_S^6} = \alpha_S^3 = 1:8 \quad (39)$$

- Skala podobieństwa naprężeń wywołanych masowymi siłami dynamicznymi według równania (16)

$$\delta_{\text{dyn max}} = \frac{F_{\text{dyn max}}}{S}$$

wynosi

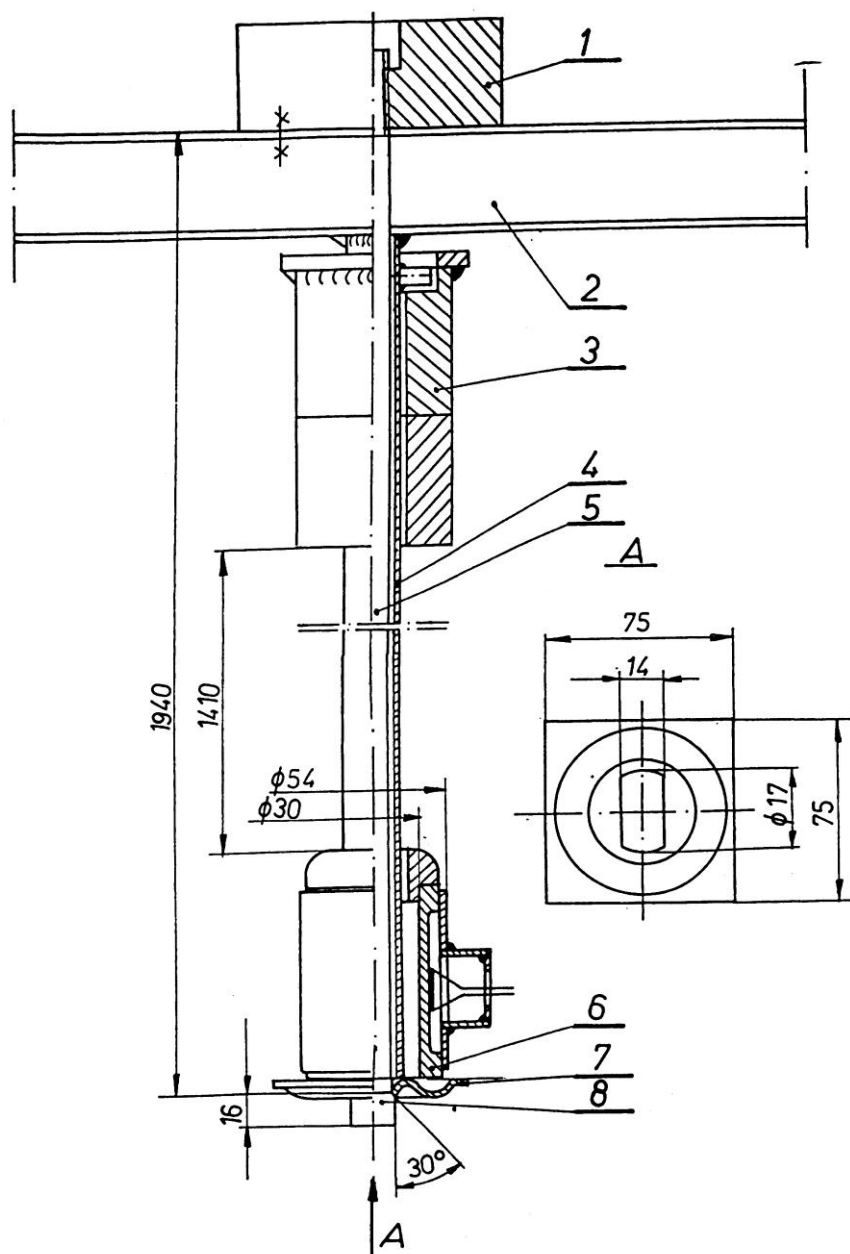
$$\alpha_{\delta_{\text{dyn max}}} = \frac{\alpha_{F_{\text{dyn max}}}}{\alpha_F} = \frac{\alpha_S^3}{\alpha_S^2} = \alpha_S = 1:2 \quad (40)$$

3.3. Stanowisko do badań modelowych

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano i wykonano stanowisko (rys. 4) składające się z konstrukcji, na której spoczywał blok metalowy modelujący górotwór. Do bloku wkręcano model kotwi zakładając, że wkręcenie kotwi odpowiada mocowaniu jej za pomocą głowicy rozprężnej. Z drugiej strony znajdowała się podkładka kształtowa, na której spoczywał czujnik siły. Na końcówkę kotwi z różnych wysokości opuszczano obciążnik o zmiennej masie. Celem tych badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie jaką masę i z jakiej wysokości należy opuścić, aby uzyskać zniszczenie podkładki za pierwszym udarem?

3.4. Wyniki badań

Na przedstawionym stanowisku (rys. 4) wykonano 11 serii badań. W czasie badań mierzono siłę dynamiczną za pomocą tensometrycznego czujnika siły, wydłużenie żerdzi oraz deformację podkładki.



Rys. 4. Schemat badania kotwi typu KSpn-18 udarem masy przez czujnik siły: 1 – blok metalowy, 2 – belka nośna, 3 – spadający ciężar o masie m , 4 – rura przewodnicza, 5 – model badanej kotwi w skali 1:2, 6 – czujnik siły 80 kN, 7 – podkładka kształtowa, 8 – łeb kotwi

Fig. 4. Testing scheme of bolt of KSpn-18 type by mass impact through force sensor: 1 – metal block, 2 – bearing beam, 3 – falling weight of mass, 4 – conductor pipe, 5 – model of tested bolt on 1:2 scale, 6 – force sensor 80 kN, 7 – shape washer, 8 – bolt head

W pierwszej serii na podkładkę kotwi opuszczano obciążnik o masie 19,5 kg. Wysokość z jakiej go opuszczono wynosiła 0,6 m, a następnie była ona przy kolejnych uderzeniach zwiększana do 0,9, 1,2 i 1,41 m. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 9,37 mm. Żerdź kotwiowa nie uległa deformacji. Przy kolejnych uderzeniach wartości sił dynamicznych wyniosły: 7,41; 8,74; 11,64; 9,36 kN.

W drugiej serii pomiary wykonano odwrotnie, to znaczy obciążnik o masie 19,5 kg opuszczano z wysokości 1,41 m zmniejszając następnie wysokość do 1,2; 0,9; 0,6; 0,3 m. Odkształcenie podkładki było równe 8,42 mm. Żerdź kotwiowa nie uległa deformacji. Przy kolejnych uderzeniach uzyskano następujące wartości sił dynamicznych: 12,3; 11,55; 9,27; 8,0; 5,65 kN.

W trzeciej serii pomiary wykonano w ten sposób, że obciążnik o masie 19,5 kg opuszczano z wysokości równej 1,41 m, mierząc siły przy kolejnych uderzeniach. Odkształcenie podkładki wyniosło 7,45 mm. Żerdź kotwiowa nie uległa deformacji. Przy kolejnych uderzeniach uzyskano następujące wartości sił dynamicznych: 12,44; 10,77; 9,04 kN.

Kolejne serie badań starano się tak przeprowadzić, aby podkładka uległa zniszczeniu przy pierwszym uderzeniu. Dlatego też **w czwartej i piątej** serii badań zwiększono opadającą masę do 39,5 kg, opuszczając ją z wysokości 1,355 m. Podkładka została zniszczona przy drugim uderzeniu. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 7,3 mm, a maksymalna wartość siły dynamicznej – 50,01 kN. Żerdź kotwiowa wydłużyła się o 6 mm.

W szóstej i siódmej serii badań zwiększono opadającą masę do 44,5 kg. Wysokość z jakiej opuszczano obciążnik wynosiła 1,285 m. Podkładka uległa zniszczeniu przy drugim uderzeniu. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 6,72 mm, a maksymalna wartość siły dynamicznej – 49,7 kN. Żerdź kotwiowa wydłużyła się o 27 mm.

W ósmej serii badań z wysokości 1,285 m opuszczono ciężar 52 kg, uzyskując zniszczenie podkładki przy drugim uderzeniu. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 7,05 mm, a maksymalna wartość siły dynamicznej – 48,4 kN. Żerdź kotwiowa wydłużyła się o 37 mm.

Dziewiątą serię badań wykonano opuszczając masę 59,5 kg z wysokości 1,285 m. Podkładka została zniszczona przy pierwszym uderzeniu. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 6,25 mm, a maksymalna wartość siły dynamicznej – 48,1 kN. Żerdź kotwiowa wydłużyła się o 52 mm.

Dziesiątą serię badań wykonano opuszczając masę 59,5 kg z wysokości 1,285 m. Łeb kotwi został zerwany przy pierwszym uderzeniu. Podkładka nie uległa odkształceniu. Wartość siły dynamicznej, przy której nastąpiło zerwanie żerdzi wynosiła 35,6 kN.

Po zmianie żerdzi **jedenastą serię** badań wykonano, opuszczając masę 59,5 kg z wysokości 1,285 m. Spodziewano się, że wystąpi zniszczenie podkładki przy pierwszym uderzeniu, tymczasem obserwowano odkształcenia żerdzi przy kolejnych uderzeniach. Przy szóstym uderzeniu nastąpiło zerwanie łba kotwi. Maksymalne odkształcenie podkładki wyniosło 2 mm, a maksymalna wartość siły dynamicznej – 40 kN. Żerdź kotwiowa do momentu zerwania wydłużyła się o 55 mm. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 1.

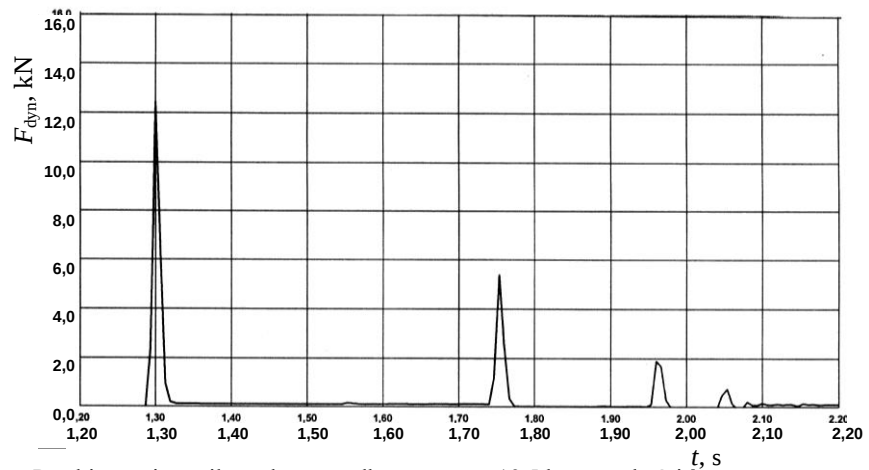
Tablica 1. Wyniki badań dynamicznych kotwi na stanowisku symulującym warunki in situ

Nr serii	Wyróżnik	Numer uderu (wysokość)	Max siła dynamiczna F_{dmax} , kN	Max deformacje podkładki x_{1max} , m	Deformacja żerdzi x_{max} , m	Uwagi
1	wysokość uderu $h = 0,6-1,41$ m masa $m = 19,5$ kg	1 (0,6 m)	7,41		0	
		2 (0,9 m)	8,74		0	
		3 (1,2 m)	11,64		0	
		4 (1,42 m)	9,36	0,00937	0	odkształcenie podkładki
2	wysokość uderu $h = 1,41-0,3$ m masa $m = 19,5$ kg	1 (1,41 m)	12,30		0	
		2 (1,2 m)	11,55		0	
		3 (0,9 m)	9,27		0	
		4 (0,6 m)	8,00		0	
		5 (0,3 m)	5,65	0,00842	0	odkształcenie podkładki
3	wysokość uderu $h = 1,41$ m masa $m = 19,5$ kg	1	12,44		0	
		2	10,77		0	odkształcenie
		3	9,04	0,00745	0	podkładki
4	wysokość uderu $h = 1,355$ m masa $m = 39,5$ kg	1	48,00		0,002	
		2	38,8	0,0073	0,004	zniszczenie podkładki
5	wysokość uderu $h = 1,355$ m masa $m = 39,5$ kg	1	50,1	0,00275	0,006	uszkodzony
		2	45,1	-	-	czujnik
6	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 44,5$ kg	1	49,70		0,008	zniszczenie
		2	41,90	0,00662	0,014	podkładki
7	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 44,5$ kg	1	49,3		0,019	zniszczenie
		2	39,30	0,00672	0,027	podkładki
8	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 52$ kg	1	48,40		0,031	zniszczenie
		2	25,80	0,00705	0,037	podkładki
9	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 59,5$ kg	1	48,10	0,00625	0,052	zniszczenie
						podkładki
10	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 59,5$ kg	1	35,6	0	-	zerwany łeb
						kotwi
11	wysokość uderu $h = 1,285$ m masa $m = 59,5$ kg	1	40,0		0,010	założono
		2	35,0		0,020	nową żerdź
		3	34,6			obserwowano
		4	37,7		0,035	wydłużenie aż
		5	39,1	0,002	0,050	do zerwania
		6	31,7		0,055	

3.5. Analiza uzyskanych wyników

Analiza powyższych wyników upoważnia do sformułowania następujących stwierdzeń:

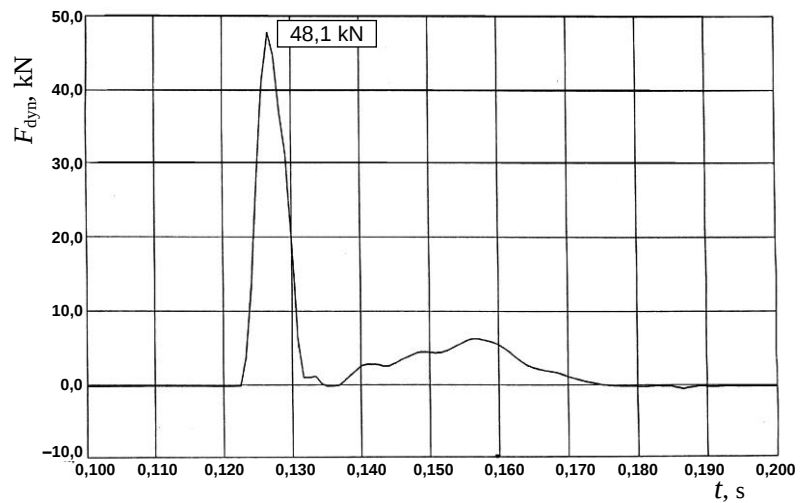
1. Pierwsze trzy serie badań przeprowadzono opuszczając obciążnik o masie 19,5 kg z wysokości od 0,3 do 1,42 m. Następowo sprężyste odkształcenie żerdzi (rys. 5), podkładka uległa deformacji plastycznej przy ostatnim uderze. Zmierzona wartość siły dynamicznej wahała się w granicach od 5,65 do 12,44 kN, a maksymalna deformacja podkładki osiągnęła wartość 9,37 mm.



Rys. 5. Przebieg zmiany siły podczas spadku masy $m = 19,5$ kg, wysokości $h = 141$ cm: t – czas, F_{dyn} – siła dynamiczna

Fig. 5. Course of force change during mass $m = 19,5$ fall from height $h = 141$ cm: t – time, F_{dyn} – dynamic force

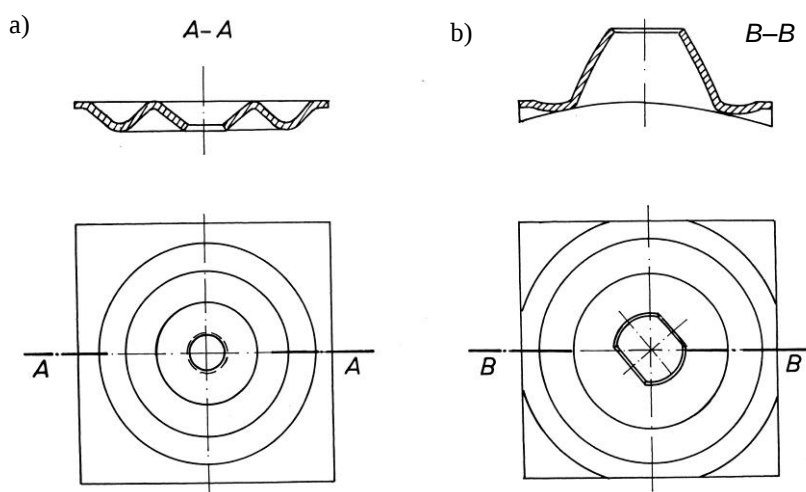
2. W dwóch następnych seriach zwiększono prawie dwukrotnie masę uderową, uzyskując po pierwszym uderze deformację plastyczną żerdzi i podkładki, nie doprowadzając jednak do zniszczenia kotwi.
3. W kolejnych seriach zwiększano masę uderową, starając się zniszczyć kotew za pierwszym udarem, co udało się w serii 9 i 10 przy opuszczeniu masy 59,5 kg z wysokości 1,285 m. Maksymalna wartość siły dynamicznej jaką określono, wynosiła 48,1 i 35,6 kN (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg zmiany siły podczas spadku masy $m = 59,5$ kg z wysokości $h = 1,285$ m: t – czas, F_{dyn} – siła dynamiczna

Fig. 6. Course of force change during fall of mass $m = 59.5$ kg from height $h = 1.285$ m: t – time, F_{dyn} – dynamic force

4. W czasie badań obserwowano odkształcenie podkładki do jej zniszczenia włącznie. Odkształcenie to polegało na prostowaniu wytłoczeń i wygięciu podkładki w kształt „kapelusza”. W skrajnym przypadku następowało zniszczenie podkładki polegające na tym, że łeb kotwi był przeciągany przez podkładkę (rys. 7).



Rys. 7. Podkładka kształtowa: a – przed badaniem, b – po badaniu

Fig. 7. Shape washer: a – before testing, b – after testing

5. Czas przebiegu zjawiska wahał się od 0,85 do 0,053 sekundy.
6. Porównanie wartości siły dynamicznej uzyskanej z obliczeń teoretycznych wzorem (14) z wartością pomierzonej siły dynamicznej wskazują, że różnica bezwzględna uzyskanych wyników nie jest większa niż 1,2%, co przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Porównanie wartości siły dynamicznej uzyskanej z obliczeń teoretycznych i na podstawie przeprowadzonych badań

Nr serii	Nr uderu	Energia kinetyczna uderu, J	Max siła dynamiczna F_{dmax} , kN z obliczeń teoretycznych	Max siła dynamiczna F_{dmax} , kN z badań	Różnica bezwzględna %	Średnia siła dynamiczna F_{dsr} , kN
1	1	114,8	8,13	7,41	0,7	7,77
1	2	172,2	9,96	8,74	1,2	9,35
1	3	229,6	11,50	11,64	0,1	11,57
2	1	269,7	12,46	12,30	0,2	12,38
2	2	229,6	11,49	11,55	0,06	11,52
2	3	172,2	9,96	9,27	0,7	9,62
2	4	114,8	8,13	8,00	0,13	8,07
2	5	57,4	5,75	5,65	0,1	5,7
3	1	269,7	12,46	12,44	0,02	12,45

7. Wzór (14) oraz przeprowadzone badania wskazują, że zasadniczym parametrem charakteryzującym odporność dynamiczną kotwi może być współczynnik sztywności kotwi k , rozumiany jako miara zdolności zespołu elementów kotwi do przeciwstawienia się odkształceniu wskutek działania siły zewnętrznej. Współczynnik ten powinien być rozpatrywany jako suma oddziaływań żerdzi k_z i podkładki wraz z nakrętką k_p , czyli

$$k = k_z + k_p$$

gdzie:

$$k_z = \frac{E_d S}{l};$$

E_d – dynamiczny moduł sztywności materiału żerdzi, kN/m;

$$E_d = c^2 \rho;$$

c – prędkość propagacji fali podłużnej w materiale żerdzi, m/s;

ρ – gęstość materiału żerdzi, kg/m³;

S – pole przekroju żerdzi kotwi, m²;

l – długość swobodna żerdzi, m;

$$k_p = \frac{F_{d\max}}{d_p};$$

$F_{d\max}$ – maksymalna pomierzona siła dynamiczna, kN;

d_p – deformacja podkładki z nakrętką na granicy wytrzymałości.

8. Korzystając ze skal podobieństwa modelowego (wzory (18)–(40)) otrzymane wyniki badań w skali 1:2 przeliczono na skalę rzeczywistą dla maksymalnej energii uderu, niepowodującej odkształcenia plastycznego ($E_k = 269,73\text{J}$). Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Skale podobieństwa modelowego określone dla badań kotwi pod obciążeniem dynamicznym wraz z wyliczonymi wartościami oznaczonych parametrów

Lp.	Nazwa oznaczanego parametru, symbol, wymiar	Oznaczenie skali podobieństwa	Wielkość skali	Wartość w skali	Wartość w rzeczywistości
1	średnica nominalna żerdzi d_n , m	α_S	1:2	0,009	0,018
2	pow. przekroju poprzeczn. żerdzi S , m ²	α_F	1:4	$63585 \cdot 10^{-8}$	$25434 \cdot 10^{-7}$
3	masa spadająca m , kg	α_m	1:8	19,5	156
4	przyspieszenie spadającej masy g , m/s ²	α_g	1:1	9,81	9,81
5	ciężar uderzający F_{st} , N	α_Q	1:8	191,3	1530,36
6	czas trwania uderu zewnętrznego t , s	α_t	1:1,41	0,013	0,018
7	energia pot. masy uderzającej E_P , N · m = J	α_{Ep}	1:16	269,73	4315,62
8	prędkość masy uderzającej V , m/s	α_v	1:2	5,25	10,52
9	energia kinetyczna masy uderzającej E_K , J	α_{Ek}	1:16	269,73	4315,62
10	wsp. sztywności żerdzi k , N/m	α_k	1:4	$288 \cdot 10^3$	$1152 \cdot 10^3$
11	częstość drgań układu ω , 1/s	α_{ω}	1,41:1	121,53	86,19
12	okres drgań układu T , s	α_T	1:1,41	0,052	0,0073
13	siła dynamiczna $F_{dyn\max}$, kN	α_{Fdyn}	1:8	12,46	99,68
14	odkształcenie dynamiczne $x_{\max}$, m		1:2	0,043	0,086
15	napężenie dynamiczne σ_{dyn} , MPa	$\alpha_{\sigma d}$	1:2	19,6	39,3

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i analizy upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Badania modelowe w skali 1:2 pozwoliły na zmierzenie wartości sił dynamicznych występujących w czasie obciążania kotwi ekspansywnych typu KSpn-18 udarem spadającej masy w fazie odkształceń sprężystych i plastycznych. Przy założeniu, że w warunkach naturalnych jedna kotew rozprężna podwiesza górotwór o masie 4 ton, ważniejsze wyniki badań modelowych dla przypadku zniszczenia podkładki przy pierwszym udarze, przeniesione na powyższe kotwie w skali 1:1, wynosiłyby:
 - masa spadająca – 4077 kg,
 - wysokość udaru – 0,3 m,
 - energia kinetyczna udaru – 12 kJ,
 - siła dynamiczna udaru – 384 kN.
2. Systematyczne obciążenia udarowe kotwi w wyniku wstrząsów lub robót strzałowych w kopalniach rud miedzi prowadzonych w niewielkiej odległości od tych kotwi powoduje kumulowanie się odkształceń plastycznych. W efekcie kotwie rozprężne są szczególnie podatne na zerwanie. Przykładem występowania takiego zjawiska są przypadki zerwania kotwi przy opadaniu skał stropowych o grubości zaledwie kilkudziesięciu centymetrów, których ciężar przypadający na jedną kotew jest niewspółmiernie mały.
3. Odporność dynamiczna kotwi zależy od:
 - sposobu zamocowania kotwi w górotworze,
 - rodzaju materiału użytego na kotwie,
 - konstrukcji kotwi.
4. Powyższe wyniki badań modelowych wymagają weryfikacji za pomocą badań w skali 1:1.

Literatura

1. Buchacz A., Świder J., Wojnarowski J.: *Podstawy teorii drgań układów mechanicznych z symulacją komputerową*. Gliwice, Politechnika Śląska 1997.
2. Bugajski W., Katulski A., Siewierski S.: *Wstępna ocena wpływu wstrząsów sejsmicznych na stateczność wyrobisk w obudowie kotwionej w kopalniach miedzi*. V Konferencja nt. Obudowa kotwiona w kopalniach. Główny Instytut Górnictwa. Seria Konferencje 1995 nr 1 s. 31-39.
3. Gryboś R.: *Stateczność konstrukcji pod obciążeniem uderzeniowym*. Warszawa, PWN 1980.
4. Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W.: *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, Wydaw. Arkady 1985.
5. Kidybiński A.: *Określenie własności wytrzymałościowych górotworu w drodze wykorzystania obserwacji modelowych*. Przegląd Górniczy 1962 nr 12.
6. Kurowski R., Niezgodziński M.E.: *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, PWN 1980.
7. Kuzniecowa G.N. i inni: *Modelirovanije projawlenij gornowo dawlienija*. Leningrad, Wydaw. Nedra 1968.

8. Misiak J.: *Zadania z mechaniki ogólnej*. Część III; Dynamika. Warszawa, WNT 1994.
9. Müller L.: *Teoria podobieństwa mechanicznego*. Warszawa, WNT 1961.
10. Nierobisz A.: *Badania kotwi dla warunków zagrożenia tąpnięciami*. Praca statutowa, Katowice, GIG 1998 (niepublikowana).
11. Walczak J.: *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności*, tom 1. Warszawa, PWN 1973.
12. Yi X., Kaiser P.K.: *Impact testing for rockbolt design in rockburst conditions*. Int. J. Rock Mech.Min.Sci.&Geomech. Abstr. 1994 Vol. 31. No. 6, s. 671-685.

Recenzent: *prof. dr hab. inż.* Antoni Kidybiński

Małgorzata Wysocka

ZALEŻNOŚĆ STĘŻEŃ RADONU OD WARUNKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH NA TERENIE GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

Streszczenie

Radon, promieniotwórczy gaz szlachetny, może być przyczyną zwiększonego ryzyka zachorowań na raka płuc i górnych dróg oddechowych. Stężenia tego gazu w budynkach mieszkalnych nierzadko osiągają wartości znacznie przekraczające dopuszczalny limit, czyli 200 Bq/m³.

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu stwierdzenie, czy w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) występują rejon o podwyższonym potencjale radonowym oraz wskazanie zależności między poziomem stężeń radonu a lokalnymi warunkami geologicznymi i działalnością górnictwem. W czasie realizacji badań wykonano ponad 900 długoterminowych (trwających do 6 miesięcy) pomiarów stężeń radonu w budynkach mieszkalnych usytuowanych na całym obszarze GZW. Podstawową metodą pomiarową była metoda pasywna pomiarów radonu z wykorzystaniem detektorów śladowych cząstek alfa. Ponadto prowadzono wstępne krótkoterminowe pomiary stężenia tego gazu za pomocą detektorów z węgla aktywnego. W celu dokładniejszego wyjaśnienia mechanizmów wpływających na migrację i przenikanie radonu do budynków wykonano pomiary stężenia radonu w powietrzu glebowym i jego ekshalacji z gleby. Budowę warstwy przypowierzchniowej w wybranych miejscach, charakteryzujących się podwyższonym potencjałem radonowym określono na podstawie badań geofizycznych (elektrooporowych).

Wyniki badań oraz analiza danych geologicznych i górnictwem pozwoliła na stwierdzenie, że średnie stężenie radonu w budynkach na obszarze GZW wynosi 46 Bq/m³, istnieje jednak zależność stężeń tego gazu od regionalnych i lokalnych warunków geologicznych. Niskie koncentracje radonu stwierdzono w obszarze występowania ilastych osadów miocenu, czyli w południowej i zachodniej części GZW. Wyższy poziom radonu obserwowano w obszarze pozbawionym izolującej warstwy ilów trzeciorzędowych. Najwyższe stężenia radonu występują w obrębie triasowych niecek (rys. 1 i 2). Stwierdzono, że utworami szczególnie sprzyjającymi migracji i ekshalacji radonu są dolomity kruszczone, tworzące rozległe wychodnie na powierzchni. Na podstawie pomiarów terenowych, laboratoryjnych, opracowano schemat migracji i ekshalacji radonu z wychodni różnych utworów geologicznych (rys. 5). Analiza wyników pomiarów na tle działalności górnictwem wskazała na istnienie związków między eksploatacją rud i węgla kamiennego a poziomem koncentracji radonu w budynkach. Bezpośrednią przyczyną występowania podwyższonych stężeń radonu w budynkach są rozluźnienia skał i gruntów oraz naruszenia budynków, ułatwiające wnikanie gazów do ich wnętrza. W obszarach intensywnej działalności górnictwem, a przede wszystkim w rejonach nakładania się wpływów płytkiej i głębokiej eksploatacji węgla i rud, poziom stężeń radonu w budynkach znacznie przekracza wartości średnie dla GZW (rys. 4). Współczesny rozwój procesów krasowych, wywołanych przez wpływy eksploatacji górnictwem zarówno dawnej, jak i współczesnej, jest zjawiskiem dodatkowo ułatwiającym migrację gazów. Procesy fizyczne i chemiczne powodujące odnowienie krasu, szczególnie intensywnie zachodzą w środowisku skał węglanowych.

Stwierdzono, że w obrębie miast Piekary Śląskie i Jaworzno lokalne warunki geologiczne i górnictwem szczególnie sprzyjają migracji i ekshalacji radonu.

Dependence of radon concentrations on the area of the Upper Silesian Coal Basin on geological and mining conditions

Summary

Radon, a radioactive noble gas can be the reason of increased risk to fall of lungs and upper respiratory tract. Concentrations of this gas in dwellings reach values considerably exceeding the permissible limit, i.e. 200 Bq/m³.

The article presents results of investigations which goals were as follow:

- to find out if in the area of Upper Silesian Coal Basin (USCB) occur regions with enhanced radon potential,
- to find out dependence between the radon levels and geological conditions as well as mining activity.

In frame of the work more than 900 long-term (lasting up to 6 month) measurements of radon concentrations in dwellings situated in the entire USCB were carried out. Preliminary short-term measurements of radon concentration by means of charcoal detectors were done. The passive method, based on solid state nuclear track detectors (SSNTD) has been used for long-term radon measurements. In order to explain more exactly the mechanism influencing the migration and penetration of radon to buildings, measurements of radon in soil concentrations and its exhalation from soil were carried out. The structure of strata situated close to the surface in selected sites characterized by increased radon potential was investigated with the application of geophysical methods (electroresistivity).

The results of investigations and analysis of geological and mining data allowed to calculate that the average radon concentration in buildings in USCB area is equal to 46 Bq/m³, however the correlation between radon concentrations and regional and local geological conditions is observed. Low radon concentrations were measured in the area of occurrence of silty Miocene sediments, i.e. in the southern and western part of USCB. Higher radon levels were observed in areas without the insulating layer of Tertiary clays. The highest radon concentrations occur within the Triassic sinclines (Fig. 1 and 2). It has been found that migration and exhalation of radon is the easiest for ore-bearing dolomites, especially in case of widespread outcrops on the surface. On the basis of field measurements and laboratory tests a scheme of radon migration and exhalation from outcrops of different formations has been developed (Fig. 5). The analysis of the results shown the correlation between mining activity (ore and hard coal mining) and radon levels in dwellings. The main reason of occurrence of increased radon concentrations in buildings are fissures in rocks, ground loosening and damages of buildings structure enables gas penetration to their interiors. In areas of intensive mining activity, first of all in regions where impacts of shallow ore mining are intensified by deep hard-coal extraction, the level of radon concentration considerably exceeds the average values for the Upper Silesian Coal Basin (Fig. 4). The current development of karst processes caused by impact of mining operation both in the past and at the present time is a phenomenon additionally making easier gas migration. Physical and chemical processes causing karst rejuvenation occur particularly intensively in carbonate rocks.

It has been found that within the city Piekary Śląskie and Jaworzno local geological and mining conditions are particularly good for radon migration and exhalation.

1. WPROWADZENIE

Skorupa ziemska zawiera nieznaczne ilości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Są to pierwiastki, których jądra ulegają samorzutnym przemianom, w wyniku czego powstają atomy nowych izotopów oraz następuje emisja cząstek materialnych tworzących tzw. promieniowanie korpuskularne.

Powszechna obecność naturalnych izotopów promieniotwórczych sprawia, że narażenie radiacyjne występuje wszędzie i każdy z mieszkańców Ziemi przez całe swoje życie poddawany jest jego oddziaływaniu.

Z uwagi na ochronę radiologiczną istotne jest występowanie wśród naturalnych izotopów promieniotwórczych, izotopów w postaci gazowej, czyli izotopów radonu. Radon, jako gaz szlachetny jest mało toksyczny, szkodliwe są natomiast produkty jego rozpadu. **Promieniowanie emitowane przez radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu jest przyczyną największych dawek, jakie otrzymuje człowiek ze źródeł naturalnych.**

Narażenie radiacyjne powodowane przez radon występuje przede wszystkim w zamkniętych przestrzeniach o słabej wentylacji. Tak więc miejscami szczególnie zagrożonymi promieniowaniem jonizującym są kopalnie, głównie rud uranowych i metali, ale również węgla kamiennego.

Już w XVI wieku pisano o ujemnym wpływie na zdrowie człowieka wyziewów ziemi, opisując chorobę, na którą zapadali górnicy kopalń rud metali na Rudawach. Dzisiaj wiemy, że bezpośrednią przyczyną zachorowań i zgonów ówczesnych górników były krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, powodujące wzrost zachorowań na nowotwory płuc. Kwestia narażenia radiacyjnego w kopalniach uranu interesowała uczonych już od ponad pięćdziesięciu lat [5, 25]. Od ponad dwudziestu lat podejmowany jest również problem narażenia radiacyjnego w polskich kopalniach węgla kamiennego [15].

Równocześnie z badaniami nad problemem narażenia radiacyjnego i sposobami jego ograniczania w kopalniach, prowadzono pomiary stężenia radonu i jego pochodnych w tunelach, jaskiniach, piwnicach i pomieszczeniach mieszkalnych. Wyniki tych prac wykazały, że przebywając w mieszkaniach, w pewnych przypadkach, możemy być narażeni na dawki promieniowania niewiele mniejsze, niż górnicy pracujący w podziemnych zakładach górniczych [17]. Stwierdzono ponadto, że najpoważniejszymi źródłami radonu występującego w budynkach są skały budujące podłoże i gleba, skąd na drodze dyfuzji i konwekcji przedostaje się on przez naturalne szczeliny i spękania bezpośrednio do pomieszczeń mieszkalnych.

Wyniki dotychczas wykonanych pomiarów stężeń radonu w budynkach na obszarze Górnoląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) wykazały, że w pewnych rejonach Zagłębia możliwe jest występowanie podwyższonych koncentracji tego gazu [27].

Analiza dotychczasowych wyników badań nad występowaniem radonu pozwoliła na wskazanie celu i kierunku dalszych badań. Realizując pracę zbadano, czy istnieje zależność stężeń radonu na terenie GZW od lokalnych warunków geologicznych i działalności górniczej oraz czy możliwe jest wyznaczenie obszarów o podwyższonym potencjale radonowym.

2. STOSOWANE METODY POMIAROWE

Podstawową metodą stosowaną w czasie realizacji badań, była metoda pasywna pomiarów stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych z wykorzystaniem detektorów śladowych cząstek alfa. Jako detektory śladowe wybrano folie typu LR-115, typu *strippable* produkcji firmy Kodak. Komorę dyfuzyjną stanowiły kubki plastikowe o pojemności 150 cm³. Do odczytu folii LR-115 zastosowano iskrowy (mechaniczny) licznik śladów. Dolny próg detekcji zastosowanej metody wynosi

10 Bq/m³, co umożliwiała detekcję radonu na poziomie porównywalnym ze stężeniami tego gazu w powietrzu na otwartym terenie, czyli około 8÷9 Bq/m³ [18].

Za pomocą metod pasywnych mierzy się wartość uśrednioną stężenia radonu w czasie, w jakim detektor był eksponowany w budynku.

W celu lepszego rozpoznania wpływu różnych czynników determinujących stężenie radonu w budynkach wykonano następujące pomiary:

- krótkoterminowe (czterodniowe) pomiary stężenia radonu za pomocą detektorów z węgla aktywnego,
- pomiary ekshalacji radonu z gleby oraz stężenia radonu w powietrzu glebowym,
- pomiary geofizyczne – elektrooporowe.

3. WYNIKI POMIARÓW TERENOWYCH

3.1. Pomiary krótkoterminowe

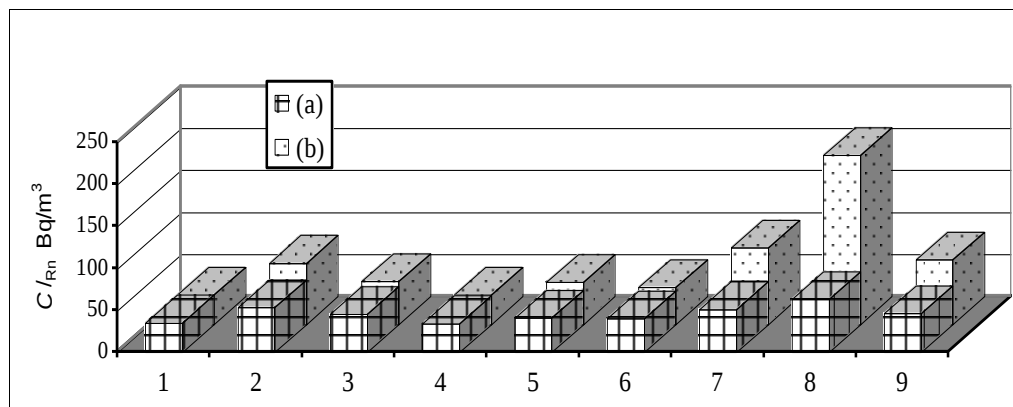
Wstępne, krótkoterminowe, pomiary stężeń radonu w budynkach usytuowanych na obszarze GZW dały podstawę do stwierdzenia, że czynnikami, które mają decydujący wpływ na stężenie gazu w domach są warunki geologiczne i odległość punktu pomiarowego od podłoża (kondygnacja). Niższe stężenia radonu stwierdzono w rejonie występowania pokrywy mioceńskich utworów ilastych, utrudniających migrację fluidów, czyli w południowej i południowo-zachodniej części Zagłębia. Wyższe stężenia tego gazu określono natomiast w północnej i wschodniej części GZW, pozbawionej nieprzepuszczalnych osadów trzeciorzędowych. Nie wykluczono, że na wpływ warunków geologicznych nakładają się efekty działalności górniczej. Powyższe wyniki i wnioski stanowiły założenia do zaplanowania badań długoterminowych.

3.2. Pomiary długoterminowe

Wykonano 916 pomiarów długoterminowych w 492 budynkach, na podstawie których obliczono, że średnie stężenie w pomieszczeniach na parterze wynosi 46 Bq/m³, w piwnicach 77 Bq/m³. Zakres mierzonych stężeń radonu na parterach waha się od 10 do 490 Bq/m³, a w piwnicach od 10 do 860 Bq/m³. Stwierdzono, że rozkład stężeń radonu na obszarze GZW nie jest równomierny. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono w obrębie Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej, najniższe w obrębie struktury fałdowej okolic Gliwic (rys. 1).

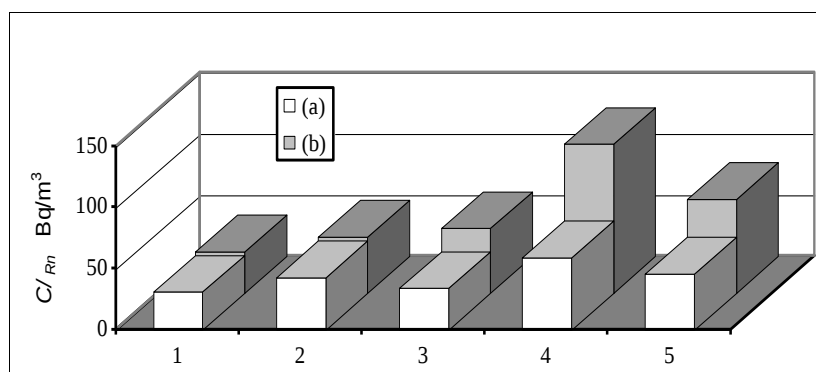
Korzystając z map geologicznych [2, 24] przeanalizowano rozkład stężeń radonu w budynkach zbudowanych w obrębie odmiennych wydzieleni litostratygraficznych. Stwierdzono, że najwyższe stężenia radonu występują w strefach wychodni utworów triasowych, najniższe natomiast tam, gdzie zalegają utwory czwartorzędowe o miąższości ponad 15 metrów, osady trzeciorzędowe (mioceńskie) oraz w miejscach wychodni osadów karbońskich. Różnice w stężeniach radonu w obrębie poszczególnych wydzieleni litologicznych są szczególnie widoczne w przypadku pomiarów prowadzonych w piwnicach. Średnie stężenie radonu, na przykład w piwnicach

budynków zlokalizowanych na triasie czterokrotnie przekracza średnie stężenie w budynkach na obszarach czwartorzędowych. Stężenia w pomieszczeniach na parterach w obszarach triasowych i czwartorzędowych różnią się prawie dwukrotnie (rys. 2).



Rys. 1. Wyniki długoterminowych pomiarów stężenia radonu w domach na terenie GZW: a – parter, b – piwnica; 1 – struktura fałdowa okolic Gliwic, 2 – Niecka Chwałowicka, 3 – Niecka Jejkowicka, 4 – Siodło Jastrzębia, 5 – Siodło Główne, 6 – Niecka Główna, 7 – Niecka Bytomska, 8 – Niecka Chrzanowsko-Wilkoszyńska, 9 – całe GZW; C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 1. Results long-term measurements of radon concentration of houses of the USCB area: a – average concentration on ground floor, b – average concentration in cellar; 1 – fold structure of Gliwice surroundings, 2 – Chwałowicka Syncline, 3 – Jejkowicka Syncline, 4 – Jastrzębie Saddle, 5 – Main Saddle, 6 – Main Syncline, 7 – Bytomska Syncline, 8 – Chrzanowsko-Wilkoszyńska Syncline, 9 – entire USCB, C_{Rn} – radon concentration



Rys. 2. Wyniki pomiarów stężenia radonu w domach na tle budowy geologicznej GZW: a – średnie stężenie na parterze budynku, b – średnie stężenie w piwnicy; 1 – czwartorzęd, 2 – miocen, 3 – karbon, 4 – trias, 5 – całe GZW, C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 2. Results of measurements of radon concentrations in houses with correlation of geological structure of the USCB: a – average concentration on ground floor, b – average concentration in cellar; 1 – Quarternary, 2 – Miocene, 3 – Carboniferous period, 4 – Triassic period, 5 – entire USCB, C_{Rn} – radon concentration

W związku z tym, że w rejonach triasowych Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej stwierdzono najwyższe stężenia radonu w budynkach, zdecydowano się na zagęszczenie pomiarów w obrębie tych struktur. Jako poligony badawcze wytypowano miasta Piekary Śląskie i Jaworzno. Badania dodatkowe, mające na celu lepsze rozpoznanie problemu, skoncentrowano również głównie w obrębie wybranych miast.

3.3. Wyniki pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym

Wyniki pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym stanowią podstawę do wyznaczania tzw. potencjału lub ryzyka radonowego badanego obszaru. Wysokie stężenia radonu w powietrzu glebowym są przyczyną występowania podwyższonych stężeń radonu w budynkach, szczególnie w przypadku istnienia łatwych dróg migracji i wnikania gazów do budynków.

Na podstawie wyników pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym, wykonywanych w centralnej i północnej części GZW stwierdzono, że w większości przypadków zmierzone stężenia radonu nie przekraczają wartości $50\ 000\ \text{Bq/m}^3$, co zgodnie z klasyfikacją szwedzką [1], wskazuje na średni lub niski potencjał radonowy obszaru badań. Zgodnie z definicją Akerbloma, potencjał radonowy to średnia arytmetyczna stężenia radonu w powietrzu glebowym w wydzielonej jednostce, na przykład geologicznej. Tylko w około 6% przypadków stężenia radonu w powietrzu glebowym pozwalają na określenie potencjału obszaru jako wysoki, 67% wyników wskazuje na średni potencjał radonowy obszaru, 27% wyników – na niski potencjał radonowy. Według klasyfikacji specjalistów czeskich [3], stosujących pojęcie **ryzyka radonowego** i uwzględniających, oprócz stężenia radonu w powietrzu glebowym również przepuszczalność gleby, rozkład procentowy wyników przedstawia się następująco:

- obszar wysokiego ryzyka radonowego – 11% wyników pomiarów,
- obszar średniego ryzyka radonowego – 58% wyników pomiarów,
- obszar niskiego ryzyka radonowego – 41% wyników pomiarów.

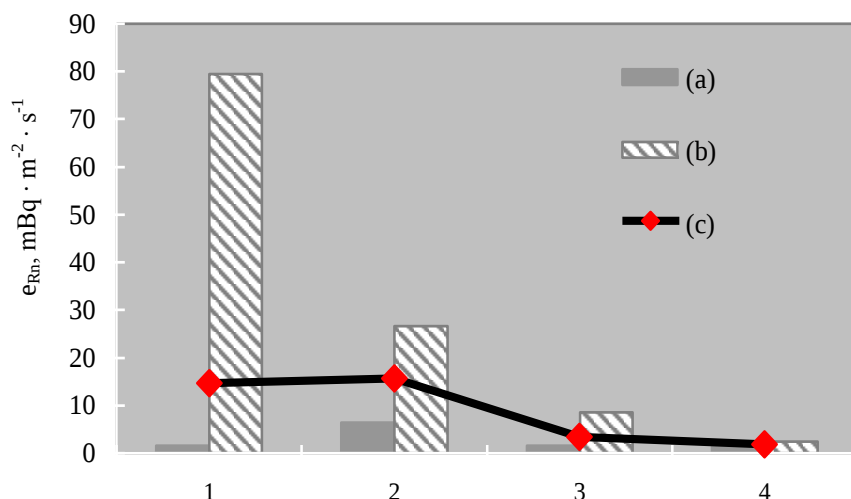
Należy podkreślić, że przepuszczalność określano jakościowo w sposób szacunkowy jako niską, średnią lub wysoką.

3.4. Wyniki pomiarów ekshalacji radonu z gleby

W celu lepszego zrozumienia mechanizmu migracji radonu wykonano pomiary ekshalacji tego gazu z gleby w obszarach charakteryzujących się odmienną budową geologiczną warstw, stanowiących nadkład utworów karbońskich. Ekshalacja, to zjawisko polegające na tym, że atomy gazu wydostają się z przestrzeni międzyziarnowych skały do atmosfery. Do pomiarów wytypowano następujące rejony:

- rejon występowania wychodni osadów triasowych – Jaworzno i Piekary Śląskie,
- rejon występowania miększej pokrywy utworów miocenu,
- rejon występowania wychodni utworów karbońskich,
- rejon występowania osadów czwartorzędowych o miąższości powyżej 10 m.

Większość wyników pomiarów terenowych współczynnika ekshalacji zawiera się w zakresie od $2 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ do $50 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, podawanym w doniesieniach literaturowych jako wartości charakterystyczne dla różnych typów gleb w warunkach normalnych [4]. Największy rozrzut zmierzonych wartości współczynnika ekshalacji stwierdzono w Jaworznie i Piekarach Śląskich w obszarze występowania wychodni utworów triasowych: od 1,6 do $79,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Średnie wielkości współczynnika ekshalacji w strefach występowania wychodni triasu i karbonu są porównywalne: $14,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i $15,7 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Najniższe wartości współczynnika, średnio $3,4 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i $1,8 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ zmierzono w strefach występowania osadów trzecio- i czwartorzędowych (rys. 3).



Rys. 3. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji: a – minimalna, b – maksymalna, c – średnia; 1 – trias, 2 – karbon, 3 – czwartorzęd, 4 – miocen, e_{Rn} – współczynnik ekshalacji radonu

Fig. 3. Results of measurements of radon exhalation coefficient: a – minimum, b – maximum, c – average; 1 – Triassic period, 2 – Carboniferous period, 3 – Quarternary, 4 – Miocene, e_{Rn} – radon exhalation coefficient

3.5. Wyniki uzupełniających pomiarów geofizycznych

Wytypowano trzy poligony, w których uzyskano wysokie stężenia radonu w budynkach. W tych miejscach w Piekarach Śląskich i Jaworznie wykonano pomiary geofizyczne – elektrooporowe.

Wyniki pomiarów metodą profilowań elektrooporowych (PE) pozwoliły na stwierdzenie, że w niektórych miejscach badanych rejonów opór elektryczny podłoża wzrasta do wartości około $40 \text{ om} \cdot \text{m}$, które można uznać za wartości anomalne. Podwyższenie wartości oporu może wynikać z obecności w warstwach podłoża stref szczelinowatych lub pojedynczych szczelin o znacznym rozwarciu, które drenują zawadnione utwory triasu.

Wyniki interpretacji krzywych sondowań elektrooporowych (PSE) w poszczególnych rejonach badań wykazały, że we wszystkich strefach objętych badaniami występują znaczne zaburzenia ciągłości warstw przypowierzchniowych, które ułatwiają migrację gazów, w tym radonu.

4. NAJWAŻNIEJSZE CECHY BUDOWY GEOLOGICZNEJ REJONÓW, W KTÓRYCH STĘŻENIA RADONU W DOMACH PRZEKRACZAJĄ WARTOŚCI ŚREDNIE DLA CAŁEGO OBSZARU GZW

Na podstawie analizy wyników pomiarów zawartości radonu w budynkach oraz w powietrzu glebowym stwierdzono podwyższone stężenia radonu w północnej i wschodniej części GZW, w obrębie Niecki Bytomskiej i Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej. Najwyższym potencjałem radonowym charakteryzuje się obszar miast:

- Piekary Śląskie, a zwłaszcza południowe dzielnice miasta,
- Jaworzno, a w szczególności południowa i wschodnia część miasta.

Rejony, w których stężenia radonu w budynkach przekraczają wartość średnią dla Górnego Śląska, charakteryzują się specyficzną budową geologiczną. Wysokie stężenia radonu w piwnicach budynków usytuowanych w wyżej wymienionych rejonach jednoznacznie potwierdzają, że głównym źródłem emisji radonu jest podłoże, charakteryzujące się budową i właściwościami fizycznymi sprzyjającymi wzmózonej emanacji, migracji i ekshalacji tego gazu. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w wyżej wymienionych rejonach stężenia radonu w piwnicach są dużo wyższe niż na parterach. Stosunek stężeń radonu w piwnicy i na parterze wynosi 2:1 w przypadku Niecki Bytomskiej i 3,2:1 w przypadku Niecki Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej. Na pozostałych obszarach GZW stosunek ten w przybliżeniu równy jest 1:1.

Modelowymi przykładami obszarów potencjalnego ryzyka radonowego są dzielnice Piekar Śląskich i Jaworzna zlokalizowane na wychodniach utworów triasowych. Budowa geologiczna tych miejsc jest bardzo dobrze rozpoznana dzięki wieloletniej eksploatacji węgla kamiennego, a w przypadku Piekar Śląskich również rud cynku i ołowiu. Analiza rozkładu stężeń radonu w budynkach na tle budowy geologicznej rejonów ich usytuowania pozwala na stwierdzenie, że wysokie stężenia radonu w budynkach na terenie GZW należy wiązać ze strefami charakteryzującymi się występowaniem wychodni utworów triasowych, a w szczególności dolomitów diploporowych wapienia muszlowego środkowego oraz dolomitów kruszconośnych i wapieni gogolińskich dolnego wapienia muszlowego.

Dolomity kruszconośne, w obrębie których stwierdzono maksymalne stężenia radonu, są specyficznymi utworami geologicznymi, występującymi na miejscu warstw dolnego i częściowo środkowego wapienia muszlowego, rzadziej w miejscu utworów retu [6, 22]. Na podstawie danych literaturowych przeanalizowano cechy wyróżniające te utwory od otaczających je skał węglanowych. I tak:

- charakteryzują się one silnym spękaniem, w porównaniu ze skałami otaczającymi i są szczególnie podatne na kruche niszczenie [22],
- w skałach otaczających występują jedynie spękania ciosowe, natomiast w dolomitach kruszonośnych – wszystkie rodzaje spękań, co według Pawłowskiej powoduje dużą ich szczelinowatość [20],
- dolomity kruszonośne charakteryzują się małą gęstością przestrzenną i obecnością wolnych przestrzeni sięgającą 30% [6],
- charakteryzują się wyraźnie wyższą porowatością i przepuszczalnością w porównaniu z otaczającymi je utworami węglanowymi [22].

Powyższe cechy, jak można przypuszczać, wskazują, że w dolomitach kruszonośnych istnieją szczególnie dobre warunki gromadzenia, przemieszczania, a następnie wydostawania się do atmosfery izotopu radonu.

W celu rozszerzenia analizy wpływu budowy geologicznej na stężenia radonu w budynkach, wykorzystano wspomniane wcześniej geofizyczne badania elektrooporowe, na podstawie których określono budowę geologiczną warstwy przypowierzchniowej do głębokości około 50 metrów w wybranych strefach, charakteryzujących się występowaniem szczególnie wysokich koncentracji radonu w budynkach [13].

Przekroje geoelektryczne warstw podłoża przeprowadzone zostały w bezpośrednim sąsiedztwie budynków, w których zmierzono wysokie stężenie radonu nie tylko w piwnicach, ale również w pomieszczeniach na parterze. We wszystkich badanych rejonach zasadnicze znaczenie w budowie warstw przystropowych mają utwory triasowe o strukturze zaburzonej na skutek procesów tektonicznych lub górniczych. Obydwa czynniki powodują znaczne rozluźnienie skał, co prowadzi do powstawania zwiększonej powierzchni, z której ekshalacja radonu jest ułatwiona.

I tak na przykład na jednym z poligonów budynek położony jest w bliskim sąsiedztwie strefy silnie zaburzonej tektonicznie na wietrzelinie dolomitów kruszonośnych. Nieciągłość tworzy szczelina lub strefa szczelin genezy tektonicznej lub eksploatacyjnej. W innym miejscu stwierdzono, że budynki zbudowane są na warstwie dolomitów diploporowych środkowego wapienia muszlowego, charakteryzujących się obecnością licznych pustek, kawern i szczelin ułatwiających migrację gazów. Dodatkowo warstwy przystropowe są w znacznym stopniu zwietrzałe, co sprzyja przenikaniu gazów. Pomiary wykonane na kolejnym poligonie wykazały, że budynek, w którym zmierzono najwyższe stężenia radonu w piwnicy, wybudowany jest w miejscu występowania strefy szczelinowej o znacznym rozwarciu szczelin ułatwiającym migrację gazów.

5. ROZKŁAD STĘŻEŃ RADONU W BUDYNKACH NA TLE SYTUACJI GÓRNICZEJ

Za główne źródło radonu w budynkach specjaliści zajmujący się tą problematyką zgodnie wskazują na skały i glebę budujące podłoże. Niektórzy badacze podkreślają jednak, że wpływ podłoża zdeterminowany budową geologiczną obszaru może być zmodyfikowany działalnością człowieka, na przykład eksploatacją górniczą [10].

Należy podkreślić, że przyczyną wzmożonej emisji radonu w niektórych obszarach GZW nie jest podwyższona promieniotwórczość naturalna kopalin będących przedmiotem eksploatacji, czy towarzyszących im skał płonnych. Badania prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa wykazały bowiem, że skały karbońskie nie zawierają podwyższonych stężeń izotopów radu [28]. Nie należy również wiązać podwyższonych stężeń radonu w powietrzu glebowym z wysokimi stężeniami tego gazu mierzonymi chodnikami głębokich kopalń węgla kamiennego. W związku z krótkim czasem połowicznego zaniku radonu, droga jaką zdąży przebyć ten gaz w środowisku skalnym nie przekracza kilkunastu metrów [16, 19]. Z tego powodu jest mało prawdopodobne, by radon przebył odległość od wyrobisk dołowych, znajdujących się na głębokości kilkuset metrów, do powierzchni. Przyczyny wzrostu zagrożenia ryzykiem radonowym należy upatrywać w rozwoju procesów powodujących deformacje w górotworze, a wywołanych eksploatacją górniczą i ich skutkami na powierzchni, przyczyniającymi się do dezintegracji skał w strefie przypowierzchniowej. Wyniki pracy, poparte obserwacjami naukowców niemieckich [10] wskazują, że obszary podwyższonego ryzyka radonowego w rejonach górniczych należy wiązać przede wszystkim z miejscami, gdzie prowadzono płytką eksploatację górniczą. Pustki poeksploatacyjne, będące przyczyną powstawania zniszczeń struktury górotworu oraz powodujące deformacje nieciągłe na powierzchni ułatwiają kumulację, a następnie migrację i wnikanie do budynków radonu i innych gazów.

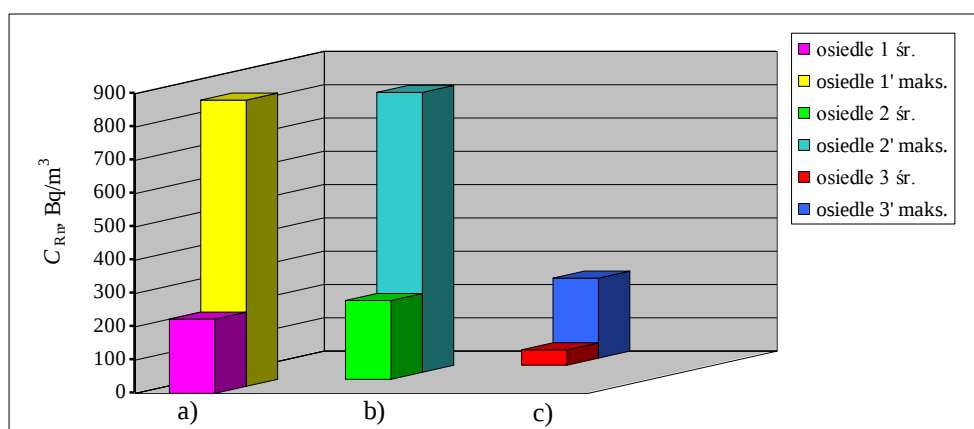
W rejonie Niecki Bytomskiej, gdzie stwierdzono wysokie stężenia radonu, historia eksploatacji rud cynkowo-ołowiowych sięga XII wieku. W ciągu kilku wieków kopalnictwa powstały tysiące płytkich wyrobisk górniczych, które spowodowały przekształcenia w górotworze, znacznie ułatwiające migrację fluidów, w tym radonu. W pewnych rejonach GZW, w tym również w Niecce Bytomskiej, lokalnie eksploatowano z powierzchni węgiel kamienny. Wokół wychodni drążono również płytkie – kilku- lub kilkunastometrowe – szyby. Taki typ eksploatacji miał bardzo ograniczony zasięg, ale powodował podobne zmiany w górotworze, jak płytka eksploatacja rudna. Rejony płytkiej eksploatacji złóż rud i węgla kamiennego [7, 12] wskazują miejsca potencjalnego występowania rozluźnienia i dezintegracji skał budujących górotwór, a co z tym związane – ułatwionej ekshalacji i migracji gazów, w tym radonu.

W pewnych przypadkach również głęboka eksploatacja węgla może wpływać na wzrost ryzyka radonowego jeśli:

- wśród warstw stropowych nie występują osady ograniczające migrację gazów, na przykład iły miocénskie,
- powoduje ona powstawanie deformacji nieciągłych na powierzchni na skutek dużej (ponad 5 m/dobę) prędkości prowadzenia frontów ścianowych lub eksploatacji w wielu pokładach lub warstwach doprowadzonych do wspólnej płaszczyzny [14],
- powoduje powstawanie znacznych osiadań na powierzchni,
- prowadzona jest w pobliżu stref uskokowych i powoduje naruszenie struktury skał z warstwy przypowierzchniowej, czego efektem na powierzchni jest powstawanie progów, rozluźnień itp. deformacji nieciągłych,

- deformacje powierzchni będące efektem głębokiej eksploatacji węgla nakładają się na szkody górnicze spowodowane płytką eksploatacją rudną, uruchamiając procesy krasowienia skał,
- opisane powyżej efekty oddziaływania górnictwa na powierzchnię przyczyniają się do powstawania uszkodzeń budynków mieszkalnych, co ułatwia wnikanie gazów z rozluźnionych skał podłoża.

Dobrym przykładem ilustrującym rozkład stężeń radonu na tle sytuacji górniczej jest obszar Piekar Śląskich, gdzie wykonano 342 długoterminowe, trwające do 6 miesięcy, pomiary stężenia radonu w domach. Analizując wyniki pomiarów stężeń radonu w domach zlokalizowanych w granicach miasta zaobserwowano znaczne wahania mierzonych wartości w domach zbudowanych w obrębie tej samej struktury tektonicznej, czy wydzielenia litostratygraficznego. Ponadto stwierdzono, że stężenia radonu w budynkach w osiedlach, gdzie odczuwane są wpływy działalności górniczej są znacznie wyższe, niż w osiedlu, na obszarze którego nie wybierano złóż rud czy węgla kamiennego. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono tam, gdzie miała miejsce zarówno płytka eksploatacja rudna, jak i głęboka – węglowa (rys. 4).



Rys. 4. Średnie (1, 2, 3) i maksymalne (1', 2', 3') stężenia radonu w pomieszczeniach mieszkalnych budynków w Piekarach Śląskich na tle wpływów działalności górniczej: a – wpływ eksploatacji rud i węgla, b – wpływ eksploatacji węgla, c – brak wpływu eksploatacji, C_{Rn} – stężenie radonu

Fig. 4. Average (1, 2, 3) and maximum (1', 2', 3') radon concentrations in habitable rooms of buildings in Piekary Śląskie against the background of mining activity impact: a – impact of ores and coal mining, b – impact of coal mining, c – lack of mining impact, C_{Rn} – radon concentration

Wyniki badań geofizycznych (elektrooporowych) były również pomocne do ustalenia genezy podwyższonych stężeń radonu w wybranych rejonach Piekar Śląskich i Jaworznie. Stwierdzono, że anomaliiom elektrooporowym na poligonach badawczych można przypisać genezę górniczą, gdyż były one generowane w pobliżu miejsc, w których ciągłość warstw została przerwana wyrobiskami górniczymi w złożu rudnym lub w miejscach, w których koncentrowały się osiadania spowodowane wpływem eksploatacji węgla. Tak więc wyniki badań geofizycznych

potwierdziły tezę, że skutki działalności górniczej mają wpływ na wzmożoną ekshalację i ułatwioną migrację radonu, który w sprzyjających warunkach wnika do budynków.

6. MECHANIZMY UŁATWIAJĄCE MIGRACJĘ RADONU

Radon, podobnie jak inne gazy, między innymi metan, przemieszcza się dzięki konwekcji i dyfuzji. Dlatego na podstawie badań zachowania się metanu można do pewnego stopnia przewidywać sposób przepływu radonu przez górotwórcę.

Obserwacje i badania nad zjawiskami związanymi z metanonośnością utworów karbońskich wykazały, że w części Górnośląskiego Zagłębia, gdzie ilaste osady miocenu przykrywają utwory starsze, zgromadzone są znaczne zasoby tego gazu. Nieprzepuszczalna pokrywa mioceńska uniemożliwia bowiem ucieczkę gazów do atmosfery. Z tego samego względu ograniczona jest migracja i wnikanie gazów do budynków. Wyniki pomiarów stężeń radonu w domach w GZW potwierdziły, że również i ten gaz nie pokonuje bariery, jaką stanowią ilaste osady miocenu.

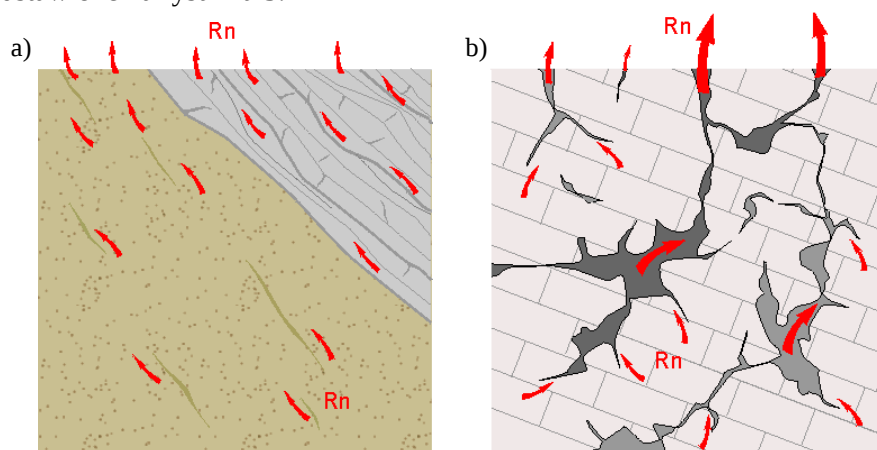
Podejmując badania koncentracji radonu w budynkach na terenie Górnego Śląska założono, że można spodziewać się podwyższonych koncentracji tego gazu w obszarach występowania wychodni skał karbońskich na powierzchni. Twierdzenie to poparte było stanem wiedzy na temat zagrożeń radiologicznych powodowanych przez radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu w wyrobiskach dołowych kopalń węgla kamiennego [23] oraz wynikami badań zmian stężeń radonu w górotworze następujących przed zjawiskami sejsmicznymi powodowanymi eksploatacją górniczą [8]. Pomiary stężenia radonu w budynkach nie potwierdziły jednak słuszności takich założeń, gdyż w obszarach wychodni karbońskich stężenia radonu są na ogół niskie i rzadko przekraczają wartości średnie dla całego GZW. Piaskowce serii górnośląskiej, charakteryzujące się znaczną porowatością, mają zasadnicze znaczenie dla przepływu gazów, w tym radonu, przez skały karbońskie. Cecha ta sprawia, że powierzchnia, z której może następować emanacja radonu jest znaczna. Nie ma natomiast uprzywilejowanych dróg migracji gazu – w całej objętości istnieją porównywalne warunki przemieszczania się cząsteczek gazu uwolnionego z sieci krystalicznej. Nie ma również powierzchni, z których ekshalacja byłaby szczególnie ułatwiona – z całej powierzchni odsłonięcia gaz może z porównywalną łatwością przenikać do atmosfery lub wnętrza budynku, o ile znajduje się na drodze jego wędrówki. Nie zachodzi zjawisko kumulowania radonu wydzielonego z większej objętości skały. Ekshalacja radonu jest rozłożona na dużej powierzchni, stąd jej wartości mierzone w warunkach terenowych są niskie, a tym samym stężenia radonu w budynkach zlokalizowanych na wychodniach karbońskich są również nieznaczne. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi [9], w strefach rozległych wychodni skał karbońskich nastąpiło odgazowanie pokładów węgla z zasobów innego gazu – metanu.

W przypadku węglanowych osadów triasowych istotną rolę dla migracji wody i gazów mają spękania i szczeliny stanowiące uprzywilejowane drogi wędrówki. W utworach węglanowych wapienia muszlowego rozproszone są nierównomiernie pustki i kawerny, będące kolektorami gazów uwalniających się z przestrzeni między-

ziarnowych i drobnych szczelin. Stwierdzono ponadto, że erozja przypowierzchniowa, polegająca na dezintegracji materiału skalnego na skutek oddziaływania wody i temperatury ma w utworach triasowych znacznie większy zasięg niż w osadach karbonu. Pustki i leje krasowe obserwowane są nawet na głębokości kilkudziesięciu metrów. Oznacza to, że radon uwolniony z sieci krystalicznej skał o określonej objętości może wędrować ku powierzchni uprzywilejowanymi drogami. Ekshalacja w miejscach występowania spękań i szczelin o znacznym rozwarciu jest wysoka, a tym samym większe prawdopodobieństwo podwyższonych koncentracji radonu w budynkach zbudowanych na wychodniach triasowych.

Wyniki badań wykonywanych w terenie (pomiarów współczynnika ekshalacji i stężenia radonu w powietrzu glebowym) na wychodniach utworów różniących się litostratygraficznie, potwierdzają tezę, że budowa geologiczna podłoża, a szczególnie właściwości fizyczne decydujące o ich przepuszczalności (porowatość, stopień zwietrzenia, stopień spękania, charakter szczelin itp.) mają zasadniczy wpływ na tempo migracji i przenikania radonu do atmosfery. Ze względu na krótki okres połowicznego zaniku radonu, najistotniejsza jest warstwa skał zalegających na głębokościach nieprzekraczających kilka-kilkadziesiąt metrów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy prawdopodobnych mechanizmów migracji radonu w różnych typach ośrodków skalnych, opracowano dwa typowe schematy przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Migracja i przenikanie radonu do atmosfery z wychodni utworów karbońskich (a) i triasowych (b)

Fig. 5. Migration and penetration of radon to the atmosphere from outcrops of Carboniferous (a) and Triassic (b) formations

Praktyka potwierdza, że eksploatacja górnicza uaktywnia strefy tektoniczne, będące źródłem wstrząsów. Szczeliny uskoków powstałych w odległych epokach geologicznych są uszczelnione i zakolmatowane materiałem ilastym, gruzem i brekcją i na ogół nie pełnią roli uprzywilejowanych dróg migracji gazów. Jednak naprężenia w górotworze powstające w wyniku eksploatacji powodują naruszenie i rozluźnienie skał i powstanie zespołu spękań i szczelin oraz dezintegrację górotworu, co powoduje uwalnianie i migrację nie tylko metanu, ale prawdopodobnie również radonu. Według

Kidybińskiego [11], lokalna strefa osłabienia skał wokół uskoku o zrzućcie kilkudziesięciu metrów, w niektórych przypadkach może mieć zasięg do 20 metrów po obu jego stronach. Dezintegracja skał sprawia, że powierzchnia, z której może następować ekshalacja radonu jest znaczna, a uwolniony z przestrzeni międzyziarnowych radon wędruje ku powierzchni nowo powstałymi drogami. Dowodzą tego wyniki własne [26] pomiarów stężenia radonu w powietrzu glebowym, a także badania prowadzone przez Wołkowicza [informacja prywatna]. Fakt, że obszar Zagłębia Górnos Śląskiego jest zdrenowany i osuszony, a wypełnianie pustek i nowo powstających rozwarć przebiega powoli, sprawia, że współcześnie powstające szczeliny i rozluźnienia stają się drożne dla wody i gazów, w tym radonu.

Występowanie deformacji powierzchni powodowanych działalnością górniczą, sprzyja wzrostowi ryzyka radonowego w budynkach. Jak wiadomo, przez ponad 200 lat na Górnym Śląsku eksploatowano rudy metali i węgiel, stosując głównie system zabierkowy z zawalaniem stropu. Efektem działalności górniczej są liczne niepodsadzone pustki. Skały nadległe, pod wpływem czynników naturalnych i w wyniku działalności gospodarczej na powierzchni (budownictwo, komunikacja) oraz pod ziemią (wybieranie niżej leżących pokładów), ulegają systematycznemu osłabieniu [7]. Prowadzi to do ich załamywania i w konsekwencji do powstawania deformacji nieciągłych na powierzchni, takich jak leje i rowy zapadliskowe czy szczeliny oraz progi. Inny rodzaj deformacji powierzchni to niecki osiadania. Naukowcy niemieccy zaobserwowali [10], że wyraźnie wyższe stężenia radonu w glebie mierzone są w stosunkowo wąskim pasie pokrywającym się z granicami zapadliska powstałego nad pustką eksploatacyjną. Bywa, że deformacja taka ma znaczny promień oddziaływania i granice zapadliska są oddalone od pustki eksploatacyjnej, która je spowodowała. Oznacza to, że domy narażone na występowanie podwyższonych stężeń radonu mogą również znajdować się w znacznych odległościach od pustek poeksploatacyjnych i nie leżeć bezpośrednio nad obszarem, w obrębie którego prowadzona jest działalność górnicza. Taki przypadek stanowi jedno z osiedli w Piekarach Śląskich.

Skały osłabione w wyniku osiadania podłoża są podatniejsze na działanie czynników powodujących erozję przypowierzchniową, co sprawia, że oddziałuje ona na znacznych głębokościach. Wzajemne nakładanie się różnych procesów fizycznych i chemicznych powoduje dalsze niszczenie struktury skał i powstawanie pustek, spękań i szczelin umożliwiających migrację gazów radonu. Ponadto osiadania powierzchni przyczyniają się do obniżenia poziomu wód gruntowych, co dodatkowo ułatwia migrację radonu.

Kolejnym zjawiskiem sprzyjającym migracji gazów jest współczesny rozwój procesów krasowych, wywołanych przez wpływy eksploatacji górniczej zarówno dawnej, jak i współczesnej [29]. Procesy fizyczne i chemiczne powodujące odnowienie krasu szczególnie intensywnie zachodzą w środowisku skał węglanowych. Bezpośrednie przyczyny tego zjawiska to: osiadanie terenu na skutek działalności górniczej, zmiany w sytuacji hydrogeologicznej, wzrost liczby nowych wyrobisk pogórnich. Stare, zapadnięte i zaciśnięte szyby, sztolnie i inne wyrobiska górnicze są obszarami szczególnie podatnymi na procesy krasowienia, gdyż wokół nich powstają liczne spękania i szczeliny, będące potencjalnymi drogami infiltracji wód.

Zapadliska i niecki osiadań będące efektem współczesnej działalności górniczej wzmagają krążenie wód i ich działanie sufozyjne. W wielu miejscach Europy obszary krasowe są obszarami wysokiego ryzyka radonowego. Klasycznymi przykładami są Węgry i Szwajcaria. Na terenie GZW w obszarach, w których procesy krasowe rzeźbiły i modelowały węglanowe osady triasu w przeszłych epokach geologicznych i gdzie współcześnie następuje ich odnowienie, można się również spodziewać zwiększonego ryzyka radonowego.

Biorąc pod uwagę opisane powyżej czynniki kształtujące mechanizm powstawania, migracji i przenikania do atmosfery radonu stwierdzono, że podwyższonego potencjału radonowego, w rejonie Górnego Śląska, można spodziewać się w:

- strefach uskokowych naruszonych działalnością górniczą,
- obszarach deformacji powierzchni w miejscach płytko zalegających pustek,
- miejscach, w których rozwijają się współczesne zjawiska krasowe,
- szybach likwidowanych kopalń.

7. WNIOSKI

Na podstawie wyników długoterminowych pomiarów stężeń radonu w budynkach mieszkalnych na obszarze GZW ustalono, że średnie stężenie tego gazu w pomieszczeniach na parterach wynosi 46 Bq/m^3 i nie odbiega od wartości średniej dla obszaru całej Polski, jak również od średniej światowej.

Stwierdzono jednoznacznie, że rozkład stężeń radonu w domach na obszarze GZW nie jest równomierny i wykazuje wyraźny związek z regionalną budową geologiczną. Niższe koncentracje radonu występują w rejonie, w którym nad osadami starszymi zalega warstwa miocenijskich osadów trzeciorzędowych o znacznej miąższości, wyższe koncentracje radonu mierzono w tej części Górnego Śląska, w której nie występuje pokrywa izolujących utworów ilastych miocenu.

Ustalono, że występuje wyraźna zależność poziomu stężenia radonu od lokalnych warunków geologicznych. Najwyższe stężenia radonu stwierdzono w budynkach posadowionych w obszarach wychodni utworów triasowych, a w szczególności dolomitów diploporowych wapienia muszlowego środkowego oraz dolomitów kruszczośnych i wapieni gogolińskich dolnego wapienia muszlowego. Najniższe stężenia radonu mierzono w budynkach posadowionych na grubych warstwach osadów czwartorzędowych. Utwory triasowe, w obrębie których następowały najwyższe stężenia radonu w budynkach, charakteryzują się znacznym zaburzeniem struktury, zwłaszcza w warstwie przystropowej, czego konsekwencją jest rozluźnienie skał i zwiększona ich powierzchnia czynna, ułatwiająca ekshalację radonu. Podwyższone stężenia radonu stwierdzono ponadto w strefach uskokowych, zaburzających strukturę warstw przystropowych.

Analiza wyników pomiaru stężenia radonu w budynkach na tle sytuacji górniczej wskazuje na istnienie kilku wyraźnych i istotnych relacji między podwyższonym potencjałem radonowym a działalnością górniczą. Podwyższone stężenia radonu w domach stwierdzono w obszarach płytkiej eksploatacji złóż rudy, czy też pokładów węgla. W rejonach o intensywnej eksploatacji górniczej i występowaniu znaczących

deformacji górotworu również obserwuje się wyższy poziom stężeń radonu w budynkach, spowodowany ułatwioną emisją i migracją radonu wskutek naruszenia spistości gruntów, a także możliwych naruszeń budynków. Może zachodzić wzmacnienie efektów ekshalacji, a tym samym występowanie wyższych stężeń radonu, wskutek pokrywania się rejonów płytkiej eksploatacji rudnej i głębokiej eksploatacji pokładów węgla (efekt reaktywacji starych, płytkich zrobów eksploatacji rudnej).

Rejonami o potencjalnie podwyższonym ryzyku radonowym są obszary Niecki Bytomskiej i Niecki Chrzanowsko-Wilkoszyńskiej, w obrębie których lokalne warunki geologiczne i skutki działalności górniczej szczególnie ułatwiają emisję i migrację radonu.

Literatura

1. Akerblom G.: *Investigation on mapping of risk areas*. Luela Sweden, Swedish Geol. Copm. Raport IRAP 1986, 86036.
2. *Atlas Geologiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, cz. III: *Mapy Geologiczno-Strukturalne*, skala 1:100 000. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny 1994.
3. Barnet I.: *Radon Risk Mapping and Geological Aspects*. Proc. of Training Course on Radon Indoor Risk and Remedial Actions. Stockholm, SSI 1995.
4. Colle R., Rubin R.J., Knab L.I., Hutchins T.M.R.: *Radon transport through and exalation from building materials*. National Bureau of Standards Technical Note 1139 (National Technical Infromation Service, Spriengfield, Virginia) 1981.
5. Evans R.D.: *An engineer's guide to the elementary behaviour of rado daughters*. Health Physics 1969 Vol. 17.
6. Galkiewicz T.: *Prawidłowości wykształcenia śląsko-krakowskich złóż cynkowo-ołowiowych*. Prace Geologiczne nr 125. Warszawa, Wydaw. Geologiczne 1983.
7. Goszcz A., Surowiec Z., Kotyrba A., Forys T.: *Analiza metod i możliwości oceny oraz sposoby zwalczania zagrożenia powierzchni ze strony płytko zalegających pustek*. Prace Głównego Instytutu Górnictwa Nr 763. Katowice, GIG 1991.
8. Josien J.P., Pineau J.F., Syrek B., Wysocka M., Zettwoog P.: *Study on radon-in-soil signals obtained in Polish coalmine; correlations with tremors and rockbursts*. Proc. of Int. Conf. Technologically Enhanced Natural Radiation Caused by Non-uranium Mining. Katowice, GIG 1996.
9. Kaziuk H.: *Wpływ czynników geologicznych i prowadzonej eksploatacji górniczej węgla kamiennego na metanowość pokładów*. Materiały konferencyjne nt. Zagrożenia metanowe w górnictwie. Katowice, GIG 1994.
10. Kemski J., Klingel R.: *Influence of underground mining on the geogenic radon potential*. Proc. of Workshop Radon in the Living Environment. Ateny, NTUA 1999.
11. Kidybiński A.: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydaw. „Śląsk” 1982.
12. Kotyrba A. i inni: *Projekt prac badawczych dla określenia zagrożeń zapadliskowych w rejonach płytkiej eksploatacji węgla kamiennego i rud cynkowo-ołowiowych na terenie województwa katowickiego wraz z Atlasem zagrożeń zapadliskowych w rejonach płytkiego kopalnictwa rud cynkowo-ołowianych i węgla kamiennego w obszarze województwa katowickiego*. Warszawa, Min. Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa 1998.
13. Kotyrba A., Michalak J., Kortas Ł., Braszczak A.: *Wyniki badań geofizycznych podłoża w wytypowanych rejonach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Piekary Śląskie, Jaworzno)*. Sosnowiec, PTNoZ 2001.

14. Kwiatek J. i inni: *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 1997.
15. Lebecka J., Skowronek J., Skubacz K., Tomza I., Michalik B., Chałupnik S.: *Raport o stanie narażenia górników kopalń węgla kamiennego na działanie pochodnych radonu*. Dokumentacja GIG nr 12.6.16.01/N15/83/B2/2. Katowice 1985 (niepublikowana).
16. Lebecka J., Goszcz A., Lebecki K., Kobiela Z., Mnich K.: *Metody radiometryczne w badaniach wyrzutów i tapani*. Zeszyty Naukowe AGH nr 1218, Geofizyka Stosowana z. 1. Kraków 1988.
17. NAS/NRC, *Comperative Dosimetry of Radon in Mines and Homes*. Washington, D.C. National Academy of Science/National Research Council 1991.
18. *National Council on Radiation Protection and Measurements. Measurements of Radon and Radon Daughters in Air*. NCRP Report No. 97. Bethesda, MD 1988.
19. Nazaroff W.W., Nero A.V. (eds): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc. 1988.
20. Pawłowska J., Szuwarzyński M.: *Procesy sedymentacyjne i diagenetyczne w skałach zawierających złoża cynku i ołowiu w trzebionce*. Prace Instytutu Geologicznego XCV, Badania Genezy Złóż Cynku i Ołowiu na Górnym Śląsku. Warszawa 1979.
21. *Radiologiczny Atlas Polski*. Warszawa, Biblioteka Monitoringu Środowiska 1998.
22. Sass-Gustkiewicz M.: *Górnośląskie złoża rud Zn-Pb w świetle migracji roztworów mineralizujących*. Zeszyty Naukowe AGH, Geologia nr 31. Kraków 1985.
23. Skowronek J., Wysocka M., Mielnikow A.: *Radon hazard in Upper Silesian Region*. Proc. of Workshop Radon in the Living Environment. Ateny, NTUA 1999.
24. *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, arkusze: Katowice, Zabrze, Wojkowice, Rybnik, Gliwice, Bytom, Rydułtowy, Jaworzno*, skala 1:50 000, Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny 1954–1957, 1991.
25. Tsivoglou E.C., Ayer H.E., Holady D.A.: *Occurence of non-equilibrium atmospheric mixtures of radon and its daughters*. Nucleonics 1953 Vol. 11(9).
26. Wysocka M. i inni: *Changes of Radon Concentration in Soli Gas over Some Main Faults in Upper Silesia Coal Basin*. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 1999 M-22 (310).
27. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S.: *Radon in houses of the Upper Silesian Coal Basin*. Proc. of the 7th Tohwa University International Symposium Radon and Thoron in the Human Environment. Singapore, World Scientific 1998.
28. Wysocka M., Skowronek J.: *Analysis of the natural radioactivity of coal from the Upper Silesian Coal Basin. Aspects of geological structure*. Proc. of an International Symposium on Nuclear Techniques in the Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources. Wiedeń, International Atomic Energy Agency 1991.
29. Życzyński H.: *Rozwój krasu pod wpływem górnictwa na Górnym Śląsku*, W: *Przeobrażenia środowiska geograficznego w obszarach uprzemysłowionych i zurbanizowanych*. Materiały Sympozjum Polsko-Czechosłowackiego (red. J. Trembaczowski). Katowice, Uniwersytet Śląski 1980.

Recenzent: dr inż. Jan Skowronek

Krystyna Stec

AKTYWNOŚĆ SEJSMICZNA GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

Streszczenie

Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, a w szczególności pewne jego strefy, charakteryzują się występowaniem aktywności sejsmicznej. Sejsmiczność tę z racji bezpośrednich związków z działalnością górnictwem nazywa się indukowaną sejsmicznością górnictwem. Oddziałuje ona na podziemne wyrobiska kopalń w formie zagrożenia tąpnięciami i na obiekty powierzchniowe w postaci drgań gruntu. Od lat pięćdziesiątych prowadzona jest obserwacja tego zjawiska przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS), która była systematycznie modernizowana. Sieć pracuje w systemie monitoringu ciągłego, a detekcja wstrząsów odbywa się automatycznie (aparatura czuwająca). Sygnały sejsmiczne są odbierane przez 20 kanałów pomiarowych rozmieszczonych w całym monitorowanym obszarze. W latach 1950–2001 udokumentowano ponad 57600 wstrząsów górotworu o energii $E \geq 10^5 \text{ J}$ ($M_L \geq 1,6$), a aktualnie rejestrowanych jest ponad 1000 zjawisk rocznie. Wieloletnie obserwacje i analizy pozwoliły na wyróżnienie dwóch typów sejsmiczności, tzw. górnictwowej i górnictwo-tektonicznej. Pierwszy typ zjawisk bezpośrednio związany jest z prowadzoną działalnością górnictwem i występuje w sąsiedztwie czynnych wyrobisk górnictwowych. Są to słabsze zjawiska energetyczne i charakteryzują się eksplozywnym typem mechanizmu ognisk, co odzwierciedla procesy związane z destrukcją pokładu lub bezpośredniego jego otoczenia. Drugi typ są to wstrząsy o charakterze regionalnym, odczuwalne przez ludność na powierzchni, które związane są z reguły ze strefami tektonicznej niestabilności górotworu (np. uskokami). Wpływ na ich powstawanie ma wieloletnia działalność górnictwa prowadzona i rozwijana na dużym obszarze przez kilka kopalń. Najczęstszym typem mechanizmu ognisk tych wstrząsów jest mechanizm poślizgowy normalny. Azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady dla tych zjawisk korelują z rozciągłością i upadem uskoku, w pobliżu których zlokalizowane są ogniska wstrząsów. Świadczy to o tym, że przyczyną tych zjawisk jest współdziałanie naprężeń tektonicznych istniejących w analizowanym obszarze z naprężeniami wywołanymi pracami górnictwem.

Bieżące rejestracje GRSS są podstawą tworzenia komputerowego banku danych obejmującego bazę sejsmologicznych parametrów wstrząsów górotworu, który stanowi podstawę do opracowania biuletynu najsilniejszych wstrząsów oraz statystycznej analizy sejsmiczności. W artykule przedstawiono rozkład epicentrow wstrząsów na tle obszarów górnictwowych kopalń, zestawienie liczby wstrząsów i tąpnięć w odniesieniu do lokalnych regionów, rozkład ilościowy wstrząsów w poszczególnych klasach energetycznych, rozkład energii sumarycznej wstrząsów w poszczególnych klasach energetycznych, rozkład aktywności sejsmicznej górotworu i współczynnika b relacji Gutenberga-Richtera, rozkład przyrostu energii sumarycznej w tygodniowych przedziałach czasu (krzywa Benioffa). Przeprowadzona statystyczna analiza sejsmiczności GZW w 2001 roku wykazała wysoki poziom aktywności sejsmicznej w GZW. Najbardziej wstrząsogennymi rejonami w 2001 roku były rejon rudzko-zabrzański i katowicki.

Seismic activity of the upper Silesian Coal Basin

Summary

The area of the Upper Silesian Coal Basin, and particularly some of its zones, are characterized by the occurrence of seismic activity. This seismicity by virtue of direct connections with the mining activity is called induced mining seismicity. It affects underground mine workings in the form of the rockburst hazard, and objects on the surface in the form of ground vibrations. Since the 1950s observation of this phenomenon is conducted by means of the Upper Silesian Regional Seismological Network (GRSS),

which was systematically modernized. The network works in the system of continuous monitoring, and tremor detection takes place automatically (watching apparatus). Seismic signals are received through 20 measuring channels placed in the entire area subject to monitoring. Within the period 1950–2001 more than 57600 rock mass tremors were documented, with energy $E \geq 10^5$ J ($M_L \geq 1.6$), and currently more than 1000 phenomena are registered annually. Long-years' observations and analyses enabled to distinguish two seismicity types, the so-called mining and mining-tectonic seismicity. The first type of phenomena is directly connected with the conducted mining activity and occurs in the vicinity of mine workings. These are weaker energy phenomena, and they are characterized by an explosive mechanism of foci, what reflects processes connected with the destruction of the seam or its direct vicinity. The second type constitute tremors of regional character, noticeable by the population on the surface, which as a rule are connected with zones of tectonic rock mass instability (for example faults). Impact on their rise has long-years' mining activity conducted and developed in a large area by several mines. The most frequent type of the foci mechanism of these tremors is the normal slip mechanism. The azimuths of break planes and their dips for these phenomena correlate with the strike and dip of faults, in the vicinity of which tremor foci are localized. This shows that the reason of these phenomena is the cooperation of tectonic stresses existing in the analyzed area with stresses caused by mining operations.

Current GRSS registrations constitute the basis for the creation of a computer data base, comprising the basis of seismological parameters of rock mass tremors, which is the basis to elaborate the bulletin of the strongest tremors and statistical seismicity analysis. In the article one has presented the distribution of tremor epicentres on the background of mining areas of mines, specification of the number of tremors and rockbursts with reference to local regions, quantitative distribution of tremors in individual energy classes, distribution of the summary energy of tremors in individual energy classes, distribution of the rock mass seismic activity and coefficient b of Gutenberg-Richter relation, distribution of the increase of summary energy at week's time intervals (Benioff's curve). The carried out statistical analysis of seismicity of the Upper Silesian Coal Basin in 2001 indicated a high level of seismic activity in the USCB. The regions mostly susceptible to tremors in 2001 were the regions of Ruda-Zabrze and Katowice.

1. WPROWADZENIE

Jednym z naturalnych zagrożeń występujących w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym jest zagrożenie sejsmiczne. Od lat pięćdziesiątych minionego stulecia prowadzona jest systematyczna obserwacja tego zjawiska przez Górnos Śląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS). Górnos Śląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna jako jedyny poligon badawczy dostarcza kompleksowej informacji o sejsmiczności obszaru Górnego Śląska. Na podstawie uzyskiwanych sejsmogramów, w sposób ciągły opracowywany jest bank danych, zawierający podstawowe parametry sejsmologiczne wstrząsów górotworu (energia sejsmiczna $E \geq 10^5$ J; $M_L \geq 1,6$) takie jak: data i czas wystąpienia zjawiska, energia wstrząsu, magnituda, nazwa kopalni, współrzędne epicentrum. W latach 1950–2001 zarejestrowano 57611 wstrząsów górotworu, które występowały w rejonach czynnej eksploatacji górniczej lub w strefach tektonicznych poza obszarami eksploatacji. Należy podkreślić, że sejsmiczność w GZW jest wysoka i stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy załóg górniczych pracujących pod ziemią (tąpania), a drgania wywoływane na powierzchni są źródłem dużej uciążliwości dla lokalnej społeczności i często są przyczyną uszkodzeń obiektów budowlanych i infrastruktury technicznej. Wyniki rejestracji GRSS stanowią więc źródło informacji dla przemysłu górniczego z zakresu bezpieczeństwa pracy, dla administracji lokalnej o wielkości zagrożenia sejsmicznego i jego tendencjach, a dla projektantów źródło

niezbędnych danych do bezpiecznego projektowania obiektów budowlanych w rejonach występowania drgań sejsmicznych.

2. ROZWÓJ GÓRNOŚLĄSKIEJ REGIONALNEJ SIECI SEJSMOLOGICZNEJ

Pierwsze udokumentowane rejestracje wstrząsów górotworu pochodzą z początków XX wieku [7, 8, 13]. W 1929 została założona stacja sejsmiczna w Raciborzu przez profesora Karola Mainkę. Zadaniem tej stacji oraz stacji filialnych (Bytom, Pyskowice, Zabrze), działających bez przerwy w latach 1929–1944, było między innymi badanie sejsmiczności rejonów górniczych GZW i poszukiwanie jej związków z tąpnięciami występującymi w kopalniach. Wyposażone one były w sejsmografy mechaniczne typu Mainka z rejestracją graficzną na zaczernionym papierze. Po wojnie w 1947 roku ponownie uruchomiono stację w Raciborzu i zaczęto wydawać „Tymczasowy wykaz wstrząsów sejsmicznych – Biuletyn Śląskiej Stacji Geofizycznej w Raciborzu”. W 1948 roku dzięki staraniom Głównego Instytutu Górnictwa nastąpiła odbudowa stacji w kopalni „Rozbark” w Bytomiu, w Zabrzu (1950) oraz Dąbrowie Górniczej (1953). Rejestracja zjawisk sejsmicznych sejsmografami typu Mainka nie pozwalała na dokładną lokalizację ich ognisk. Najważniejszym problemem występującym w tym okresie było jednoznaczne stwierdzenie zależności między występowaniem wstrząsów górotworu i tąpnięć [14, 15]. Rozwiązanie tego zagadnienia uzyskano dopiero w latach sześćdziesiątych, po zwiększeniu zakresu obserwacji makrosejsmologicznych oraz zastosowaniu aparatury o wyższym standardzie technicznym (sejsmografy elektrodynamiczne SK-58 i SU-59 z rejestracją optyczno-galwanometryczną). Uzyskane dane potwierdziły hipotezę o związkach wstrząsów i tąpnięć z prowadzoną eksploatacją górniczą. W konsekwencji tych obserwacji dalszy rozwój sieci sejsmologicznej ukierunkowano na uzyskiwanie danych umożliwiających określenie lokalnego stanu zagrożenia sejsmicznego. W tym celu zmieniono dotychczasowy system obserwacji z regionalnego na regionalno-kopalniany, dołączając w 1965 roku trzy stacje w obrębie kopalni „Miechowice”. Wcześniej sieć sejsmologiczna o charakterze kopalnianym została zainstalowana w tej kopalni przez Zakład Geofizyki PAN. System regionalno-kopalniany pozwolił na znacznie dokładniejsze niż w systemie regionalnym analizowanie zjawisk sejsmicznych w odniesieniu do górniczo-geologicznych warunków eksploatacji i stał się podstawą rozwoju kopalnianych sieci sejsmologicznych. Od 1969 roku systematycznie zwiększała się ich liczba aż do 43. Równocześnie z rozwojem sieci kopalnianych modernizowana była sieć regionalna, dla której przełomem był rok 1973, kiedy to założono Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS) wyposażoną w angielską aparaturę sejsmologiczną Racal Thermionic [16]. Wszystkie stacje Regionalnej Sieci wyposażone są w elektromagnetyczne sejsmografy typu Willmor MK-2 i wzmacniaczo-modulatory zainstalowane w poszczególnych kopalniach. Sygnały odbierane przez sejsmometry przekazywane są drogą radiową do centralnej jednostki rejestrującej znajdującej się w Głównym Instytucie Górnictwa, gdzie prowadzona jest ciągła rejestracja wstrząsów górotworu. Do 1998 roku był to system analogowy z zapisem

sejsmogramów na taśmie magnetycznej, a następnie system cyfrowy (aparatura polska AS-2 wykonana w GIG) polegający na progowym wyzwalaniu zjawisk sejsmicznych. Cyfrowa rejestracja dla całej sieci została wprowadzona w 1993 roku. Wcześniej, bo w 1986 roku, zainstalowano pierwsze trójskładowe stanowisko bazowe z cyfrowym zapisem i transmisją radiową firmy Earth Date. Następne dwa stanowiska tego typu działają od 1998 roku. W 1999 roku zastąpiono system rejestracji cyfrowej AS systemem SEJSGRAM, który również wykonano w GIG.

W ciągu kolejnych lat dokonywano zmian w konfiguracji GRSS, dostosowując jej rozmieszczenie do nowo występujących miejsc aktywności sejsmicznej [1].

Górnośląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna umożliwia rejestrację zjawisk sejsmicznych o energii $E \geq 10^5$ J (magnitudzie lokalnej $M_L \geq 1,6$) z obszaru około 2000 km². Pomimo bardzo dużego rozwoju kopalnianych sieci sejsmologicznych istnieje wiele zagadnień, których rozwiązanie wymaga obserwacji wstrząsów z wykorzystaniem scentralizowanego, regionalnego systemu rejestracji. Należą do nich między innymi:

- ogólna kontrola sejsmiczności w GZW (rola nadrzędna w stosunku do sieci kopalnianych,
- obserwacja sejsmiczności kopalń niemających własnych sieci sejsmicznych,
- analiza danych w celu statystycznej prognozy sejsmiczności,
- uzyskanie danych do badań podstawowych (określenie wglębnej budowy GZW – model sejsmogeologiczny, badanie mechanizmu ognisk wstrząsów, określenie fizycznych parametrów ognisk wstrząsów, charakterystyka i przebieg radiacji sejsmicznej – wyznaczenie funkcji tłumienia),
- doskonalenie sejsmologicznych kryteriów oceny stanu zagrożenia tąpnięciami,
- analiza ryzyka sejsmicznego dla infrastruktury powierzchniowej.

3. KSZTAŁTOWANIE SIĘ AKTYWNOŚCI SEJSMICZNEJ W LATACH 1950–2000

Aktywność sejsmiczna występuje głównie w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i związana jest z eksploatacją pokładów siodłowych, w mniejszym stopniu rudzkich, porębskich i łaziskich. Epicentra wstrząsów górotworu występują w kilku rejonach (Niecka Bytomska, Południowe Skrzydło Siodła Głównego, Niecka Kazimierzowska, Niecka Ziemowicka i Niecka Jejkowicka) charakteryzujących się stosunkowo głębokim zaleganiem pokładów węgla będących przedmiotem eksploatacji i występowaniem w ich otoczeniu mocnych i grubych kompleksów piaskowcowych oraz silnie rozwiniętą tektoniką. Czas trwania obserwacji sejsmologicznej prowadzonej przez Główny Instytut Górnictwa można podzielić na dwa okresy: pierwszy to lata 1950–1972 i drugi od 1973 roku do chwili obecnej. W pierwszym okresie udokumentowano około 350 zjawisk sejsmicznych o energii $E \geq 10^6$ J (magnitudzie lokalnej $M_L \geq 2,2$) [11]. Pomimo małej liczby zarejestrowanych wstrząsów, wynikającej ze specyfiki prowadzonej obserwacji sejsmologicznej (kilka stanowisk sejsmometrycznych) aktywność sejsmiczna była bardzo wysoka,

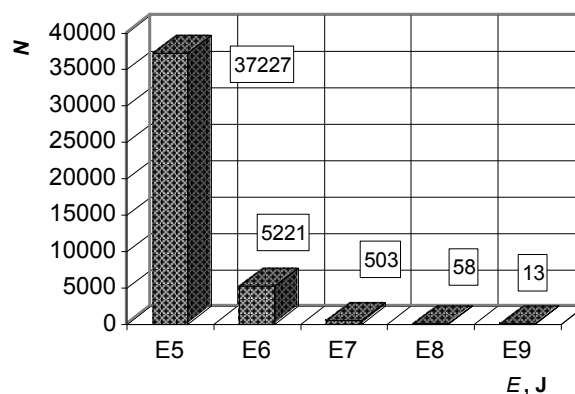
o czym świadczy liczba występujących wówczas katastrof w kopalniach (zawały i tąpnięcia), których na początku lat pięćdziesiątych XX wieku było około 400.

Następny okres prowadzenia monitoringu sejsmologicznego rozpoczął się w 1973 roku, kiedy założono Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną GIG. W latach 1973–2000 aktywność sejsmiczna GZW charakteryzowała się wysokim poziomem, zróżnicowaniem w poszczególnych latach oraz różną intensywnością w poszczególnych rejonach. W tym okresie zarejestrowano ponad 57000 wstrząsów, które są podstawą komputerowego banku wstrząsów górotworu obejmującego bazę sejsmologicznych parametrów wstrząsów, takich jak: data i czas wystąpienia wstrząsu, energia sejsmiczna, magnituda wstrząsu, miejsce wystąpienia wstrząsu – nazwa kopalni, lokalizacja ogniska – współrzędne epicentrum wstrząsu (układ Suchej Góry). Sumaryczne zestawienie energetyczno-ilościowe wstrząsów górotworu i tąpnięć przedstawiono w tablicy 1 i na rysunku 1, a liczbę tąpnięć na tle sumarycznej aktywności sejsmicznej w poszczególnych latach – na rysunku 2.

Tablica 1. Zestawienie liczby wstrząsów górotworu i tąpnięć w GZW w latach 1950–2000

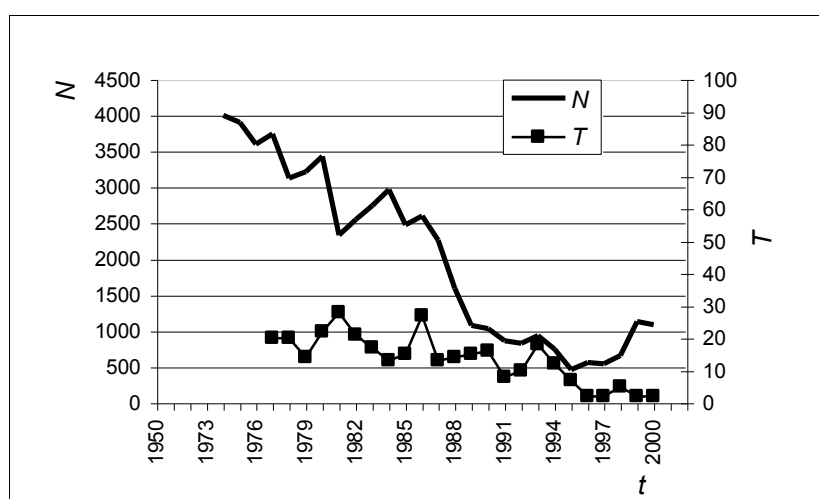
Okres	Liczba wstrząsów górotworu N						Tąpnięcia T
	10^5 J	10^6 J	10^7 J	10^8 J	10^9 J	razem	
1950–1972	~	61	220	52	22	355	~450*
1973–1976	7088	2328	2592 ($E > 5 \cdot 10^6$ J)			13452	82
1977	3089	572	76	2	0	3739	20
1978	2371	668	80	10	0	3129	20
1979	2682	508	24	4	2	3220	14
1980	2855	531	40	5	1	3432	22
1981	2004	296	31	4	1	2336	28
1982	2262	251	28	4	0	2545	21
1983	2400	319	25	4	1	2749	17
1984	2657	293	16	2	2	2970	13
1985	2256	202	18	2	2	2480	15
1986	2390	192	20	3	1	2606	27
1987	2015	204	36	5	0	2260	13
1988	1471	113	15	0	0	1599	14
1989	973	91	10	2	0	1076	15
1990	960	71	5	2	0	1038	16
1991	822	37	3	1	0	864	8
1992	772	53	7	0	1	833	10
1993	838	83	6	3	2	932	18
1994	671	74	6	1	0	752	12
1995	385	70	8	2	0	465	7
1996	499	54	11	0	0	564	2
1997	464	78	5	0	0	547	2
1998	572	86	5	0	0	663	5
1999	941	183	10	1	0	1135	2
2000	877	192	18	1	0	1088	2

*liczba zawałów i tąpnięć



Rys. 1. Zestawienie energetyczno-ilościowe wstrząsów górotworu występujących w GZW w latach 1973–2000: E – przedział energetyczny, N – liczba wstrząsów

Fig. 1. Energy-quantitative specification of rock mass tremors in the USCIB within the period 1973–2000: E – energy interval, N – number of tremors



Rys. 2. Zestawienie liczby wstrząsów i tąpnięć w GZW w latach 1950–2000: t – czas, N – liczba wstrząsów, T – liczba tąpnięć

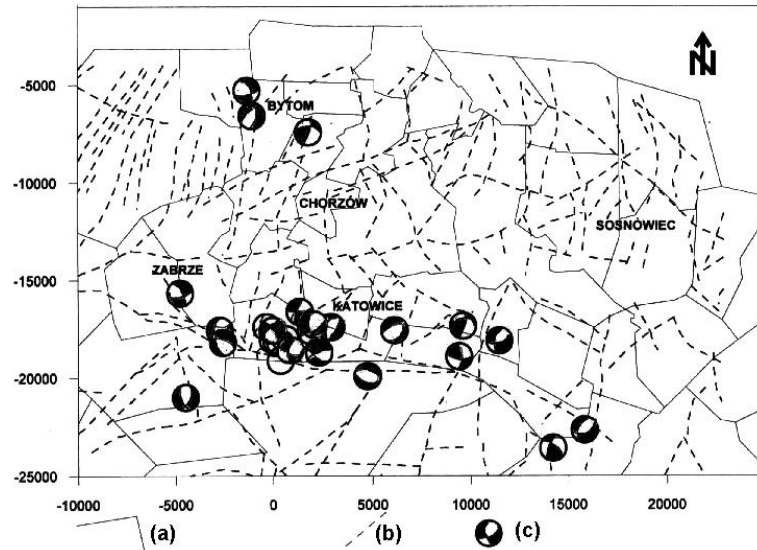
Fig. 2. Specification of the number of tremors and rockbursts in the USCIB within the period 1950–2000: t – time, N – number of tremors, T – number of rockbursts

Najwyższa aktywność sejsmiczna w GZW występowała w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych minionego stulecia – stwierdzono od 3000 do 2000 wysokoenergetycznych wstrząsów rocznie. Średnia liczba tąpnięć w tym okresie wynosiła ponad 20. Od 1989 roku zaznaczyła się wyraźna, trwająca do 1995 roku, tendencja zniżkowa w ilości występujących wstrząsów – do 460 zjawisk w 1995 roku. Od 1996 do 1999 roku widoczny jest wzrost liczby wstrząsów górotworu. W 2000

roku wystąpiło 1088 zjawisk o energii $E \geq 10^5$ J [10]. Zmniejszenie liczby wstrząsów i przede wszystkim tąpnięć do 2 przypadków w 2000 roku można tłumaczyć mniejszym wydobywaniem węgla, ograniczeniem eksploatacji w rejonach o wysokim zagrożeniu tąpnięciami oraz zakrojoną na szeroką skalę profilaktyką tąpniową, obejmującą dobór odpowiednich systemów i metod eksploatacji, a także bardziej skutecznym odprężaniem górotworu przez stosowanie metod aktywnych (strzelania wstrząsowe, nawadnianie pokładów, ukierunkowane hydroszczelinowanie).

Aktywność sejsmiczna GZW wykazuje kilka charakterystycznych cech, mianowicie badania przeprowadzone na początku lat osiemdziesiątych, dotyczące powtarzalności silnych zjawisk sejsmicznych w kopalniach wskazują, że empiryczne rozkłady ekstremalnych energii kopalnianych zjawisk sejsmicznych mają charakter złożony [3, 5]. Otrzymane wyniki wykazały bowiem, że wstrząsy górotworu generowane są dwoma różnymi przyczynami. Pierwsza odpowiedzialna jest za niskoenergetyczną komponentę rozkładu, druga generuje komponentę wysokoenergetyczną. Na podstawie przemieszania zmiennych losowych analizowanych rozkładów ekstremalnych stwierdzono tzw. bimodalny charakter wstrząsów. Jak podaje Kijko [6] otrzymana w wyniku analiz bimodalność rozkładów ma swoją przyczynę w różnych procesach fizycznych zachodzących w ognisku wstrząsu – mówi się o różnych „mechanizmach generujących wstrząsy”. Rozważania teoretyczne potwierdziła analiza czasoprzestrzenna kilkudziesięcioletniego zbioru danych archiwum GRSS. Wyodrębniono dwa rodzaje sejsmiczności, tzw. górniczą i górniczo-tektoniczną. Pierwszy typ zjawisk bezpośrednio związany jest z prowadzoną działalnością górniczą, występuje w sąsiedztwie czynnych wyrobisk górniczych. Są to zjawiska słabsze energetycznie. Drugi typ sejsmiczności indukuje się na skutek połączenia dwóch czynników: komponenty górniczej i tektonicznej. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w rejonach stref tektonicznych często odczuwalne przez ludność na powierzchni [9]. Odmierna geneza sprawia, że częstość występowania tych wstrząsów w zasadzie nie zmienia się – rejestruje się przeciętnie kilka takich zjawisk sejsmicznych w ciągu roku. Ogółem w latach 1973–2000 wstrząsów wysokoenergetycznych ($E \geq 10^8$, $M_L \geq 3,2$) wystąpiło 71. Potwierdzenie zależności występowania tego typu zjawisk od komponenty tektonicznej dają badania mechanizmu ognisk wstrząsów [4]. Najczęstszym typem mechanizmu ognisk jest mechanizm poślizgowy normalny z zaznaczającym się poziomym przesunięciem w ognisku wstrząsu. Azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady dla tych zjawisk korelują z rozciągłością i upadem uskoków, w pobliżu których zlokalizowane są ogniska wstrząsów. Mechanizm ognisk kilkunastu najsilniejszych wstrząsów na tle głównych struktur tektonicznych prezentuje rysunek 3. Szczególnie charakterystyczne w ostatnich latach jest występowanie wysokoenergetycznych wstrząsów w rejonie Uskoku Kłodnickiego (kopalnie „Wujek”, „Ślask” i „Halemba”). Większość z tych zjawisk słabo odczuwalna jest na dole kopalń, natomiast bardzo mocno odczuwalne są one na powierzchni. Przypuszcza się, że przyczyną tych wstrząsów jest naruszenie równowagi naprężeniowej górotworu na skutek intensywnej eksploatacji prowadzonej w północnym skrzydle Uskoku Kłodnickiego i przy niewyekspluatowanym skrzydle południowym.

Drugim typem aktywności sejsmicznej, jak wspomniano, jest aktywność bezpośrednio związana z eksploatacją. Mechanizm ognisk wstrząsów zawierający duży udział składowej eksplozyjnej, w tym przypadku odzwierciedla procesy związane z destrukcją pokładu lub jego bezpośredniego otoczenia [12].



Rys. 3. Mechanizm ognisk wstrząsów na tle głównych struktur tektonicznych GZW: a – obszary górnicze kopalń, b – uskoki, c – mechanizm ognisk wstrząsów

Fig. 3. Mechanism of tremor foci against the background of main tectonic structures of the USC: a – mining areas of mines, b – faults, c – mechanism of tremor foci

3. STATYSTYCZNA ANALIZA AKTYWNOŚCI SEJSMICZNEJ W 2001 ROKU

Górnośląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna rejestrująca wstrząsy górotworu o energii $E \geq 10^5$ J składa się z dwóch systemów rejestrujących. Są to:

1. System SEJSGRAM produkcji GIG z rejestracją cyfrową i radiową transmisją sygnałów systemu Racal Thermionic. System ten tworzy jedenaście jednoskładowych pionowych stanowisk sejsmometrycznych.
2. System Earth Data z wykorzystaniem radiowej transmisji sygnałów firmy Earth Data. Tworzą go dwa trójskładowe (składowe poziome NS i EW oraz pionowa Z) stanowiska sejsmometryczne będące stanowiskami bazowymi dla określania energii sejsmicznej wstrząsów górotworu.

W Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej odbiornikami drgań są elektromagnetyczne sejsmometry typu Willmor MK-2. Pasma przenoszenia kanału zawierają się w przedziale 0,8÷30 Hz. Rozmieszczenie stanowisk sejsmometrycznych

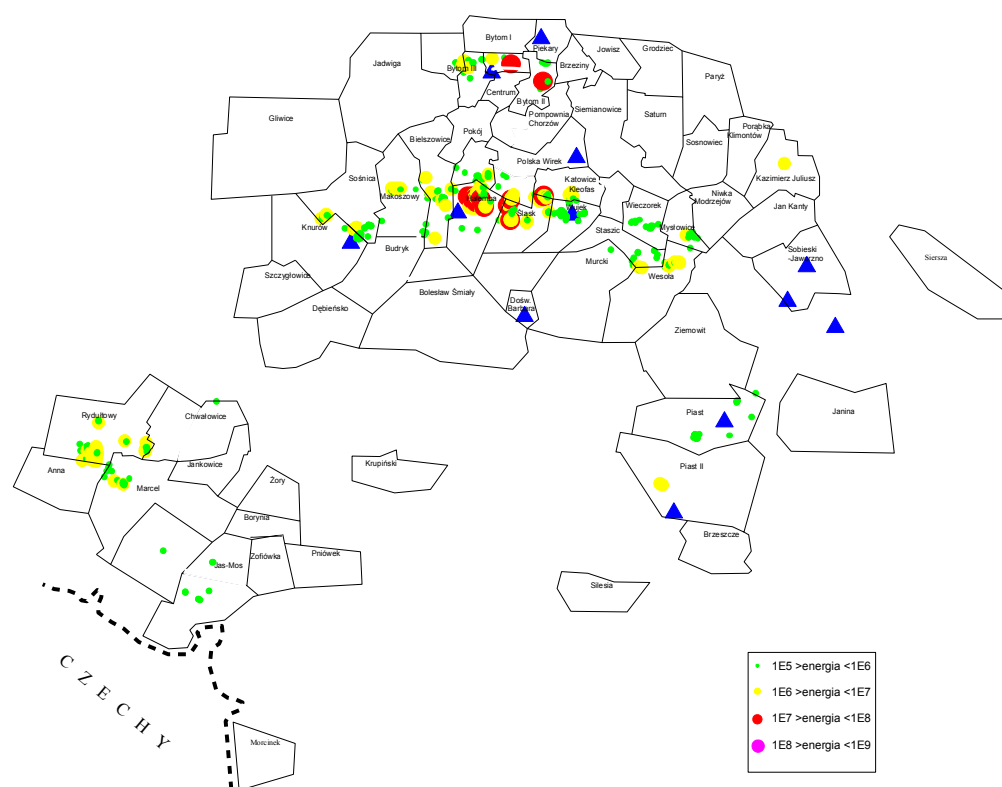
na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w lokalnym układzie współrzędnych (Sucha Góra) przedstawia rysunek 4.

W 2001 roku wystąpiło 1137 wstrząsów górotworu o energii $E \geq 10^5$ J (tabl. 2).

Tablica 2. Liczba wstrząsów górotworu w klasach energetycznych występujących w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w 2001 roku

Energia wstrząsu, J	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	Razem
Liczba wstrząsów	927	192	18	—	—	1137

Epicentra występujących w analizowanym okresie wstrząsów górotworu grupowały się w kilku rejonach, co obrazuje ich lokalizacja (rys. 4).



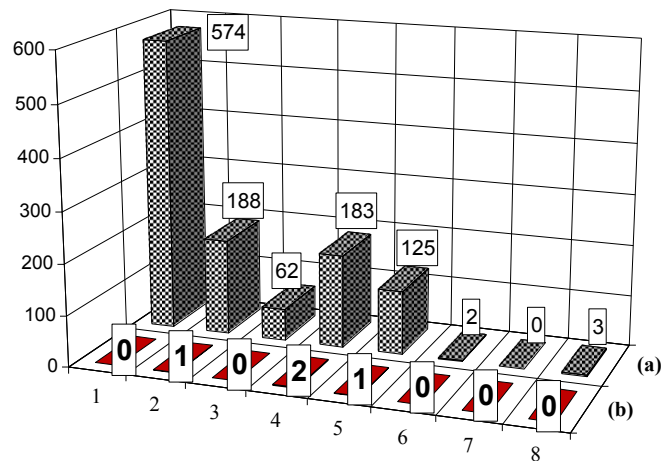
Rys. 4. Lokalizacja stanowisk sejsmometrycznych Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej oraz położenie epicentrow ognisk wstrząsów w GZW w 2001 roku: ▲ stanowisko sejsmometryczne

Fig. 4. Localization of seismometric stands of the Upper Silesian Regional Seismological Network and location of epicentres of tremor foci in the USCW in 2001: ▲ – seismometric stand

Analizując położenie ognisk wstrząsów wydzielono osiem rejonów o zbliżonych warunkach geologicznych:

- Rejon bytomski – grupujący kopalnie ZG Bytom I, ZG Bytom II, ZG Bytom III, ZG Centrum,
- Rejon katowicki – to kopalnie „Katowice-Kleofas”, „Mysłowice”, „Wieczorek”, „Wesoła”, „Wujek”, „Staszic”,
- Rejon sosnowiecki – w obrębie którego eksploatację prowadzi tylko kopalnia „Kazimierz-Juliusz”,
- Rejon tyski – to kopalnie „Piast” Ruch I i II oraz „Ziemowit”,
- Rejon rudzko-zabrzeński – obejmuje kopalnie „Bielszowice”, „Halemba”, „Makoszowy”, „Pokój”, „Polska-Wirek”, „Śląsk”, „Sośnica”,
- Rejon jaworznicki – ZGE Sobieski-Jaworzno III,
- Rejon chorzowski – to kopalnie ZG Brzeziny, ZG Piekary,
- Rejon Rybnickiego Okręgu Węglowego – z kopalniami „Anna”, „Jas-Mos”, „Marcel”, „Rydułtowy”, „Pniówek” i „Zofiówka”.

Na rysunku 5 przedstawiono liczbę wstrząsów o energii $E \geq 10^5$ J ($M_L > 1,6$) oraz tąpnięć w poszczególnych rejonach GZW. Największa liczba silnych wstrząsów górotworu wystąpiła w rejonie rudzko-zabrzeńskim, gdzie zlokalizowano 574 zjawiska, w większości w kopalniach „Halemba” i „Śląsk”. Ponadto bardzo duża liczba silnych wstrząsów górotworu miała miejsce w rejonie katowickim – 183 zjawiska oraz w Rybnickim Okręgu Węglowym – 188 zjawisk. W rejonie bytomskim wystąpiło 125 wstrząsów. Niższą aktywnością sejsmiczną charakteryzował się rejon tyski – były tam 62 wstrząsy, a najniższa aktywność sejsmiczna występowała



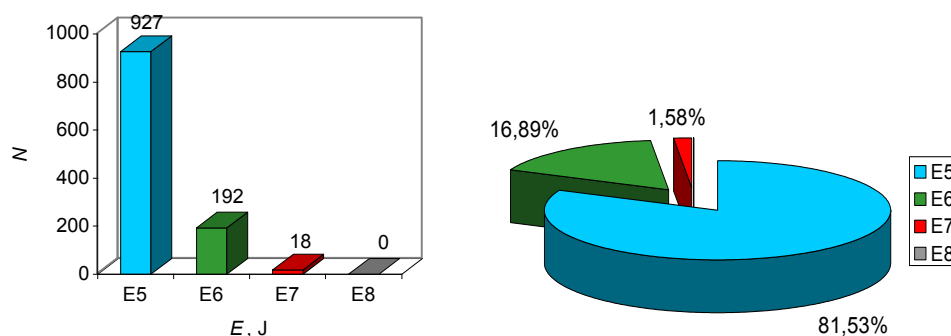
Rys. 5. Zestawienie liczby wstrząsów górotworu a) i tąpnięć b) w poszczególnych rejonach GZW w 2001 roku: a – wstrząsy, b – tąpnięcia; 1 – rudzko-zabrzeńskim, 2 – ROW, 3 – tyskim, 4 – katowickim, 5 – bytomskim, 6 – sosnowieckim, 7 – jaworznickim, 8 – chorzowskim

Fig. 5. Specification of the number of rock mass tremors and rockbursts in individual regions of the USC in 2001: a – tremors, b – rockbursts; 1 – Ruda-Zabrze Region, 2 – Rybnik Coal Region, 3 – Tychy Region, 4 – Katowice Region, 5 – Bytom Region, 6 – Sosnowiec Region, 7 – Jaworzno Region, 8 – Chorzów Region

w rejonie chorzowskim – tylko 3 zjawiska. W rejonie sosnowieckim wystąpiły 2 wstrząsy, a w rejonie jaworznickim brak było zjawisk o $E \geq 10^5$ J. W analizowanym okresie wystąpiły 4 przypadki wstrząsów, których skutkiem były tąpnięcia.

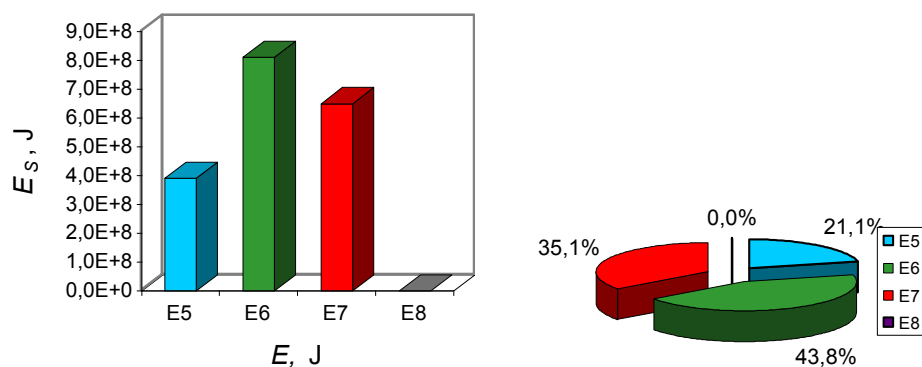
Przeprowadzona analiza wykazała wysoki poziom sejsmiczności w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym w 2001 roku, o czym świadczy zarówno liczba wstrząsów, jak i ich energia. Ilościowy rozkład wstrząsów w poszczególnych klasach energetycznych przedstawiają rysunki 6 i 7. Wynika z nich, że:

- W zbiorze 1137 energii rzędu 10^5 J osiągnęło 927 zjawisk – stanowiło to około 82% ogólnej liczby wstrząsów wziętych do analizy. Sumaryczna energia sejsmiczna wyzwolona przez te wstrząsy stanowiła 21%.



Rys. 6. Rozkład ilościowy wstrząsów górotworu w poszczególnych klasach energetycznych z obszaru GZW w 2001 roku: E – przedział energetyczny, N – liczba wstrząsów

Fig. 6. Quantitative distribution of rock mass tremors in individual energy classes from the USCB area in 2001: E – energy interval, N – number of tremors



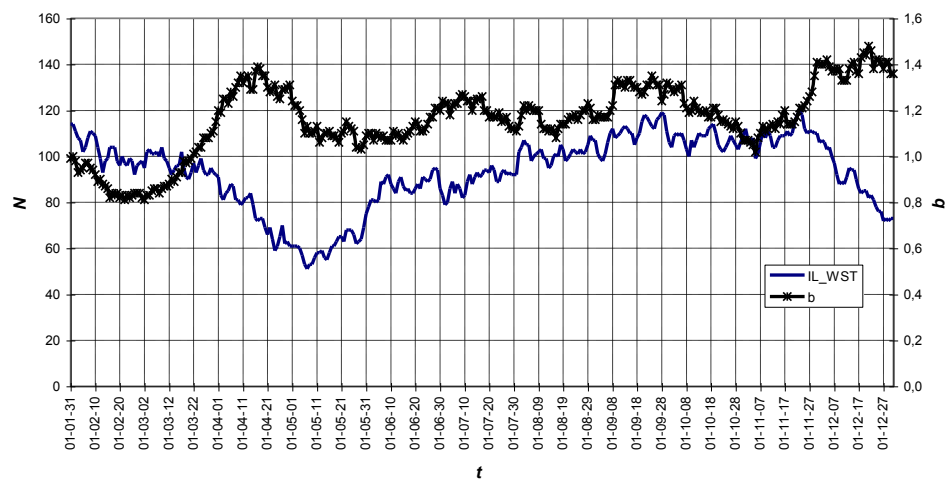
Rys. 7. Rozkład energii sumarycznej wstrząsów górotworu w poszczególnych klasach energetycznych z obszaru GZW w 2001 roku: E – przedział energetyczny, E_s – energia sumaryczna

Fig. 7. Distribution of summary energy of rock mass tremors in individual energy classes from the USCB area in 2001: E – energy interval, E_s – summary energy

- Wstrząsów o energii rzędu 10^6 J było 192, co stanowiło 17% ogólnej liczby wstrząsów wziętych do analizy. Ta grupa zjawisk spowodowała wyzwolenie około 44% sumarycznej energii sejsmicznej.
- Wstrząsów o energii rzędu 10^7 J wystąpiło w analizowanym okresie 18, stanowiło to około 1,6% ogólnej liczby zjawisk i 35% sumarycznej energii sejsmicznej.
- W analizowanym okresie badawczym brak było wstrząsów o energii sejsmicznej powyżej 10^8 J.

Rysunek 8 przedstawia rozkład aktywności sejsmicznej (liczbę zaistniałych wstrząsów w dziesięciodniowych przedziałach czasu) oraz rozkład parametru b z zależności Gutenberga-Richtera. Parametr b opisany jest zależnością: $\log N = a - bM_L$, gdzie: N – liczba wstrząsów w danym przedziale czasu, M_L – magnituda lokalna zjawisk, a , b – parametry tego rozkładu.

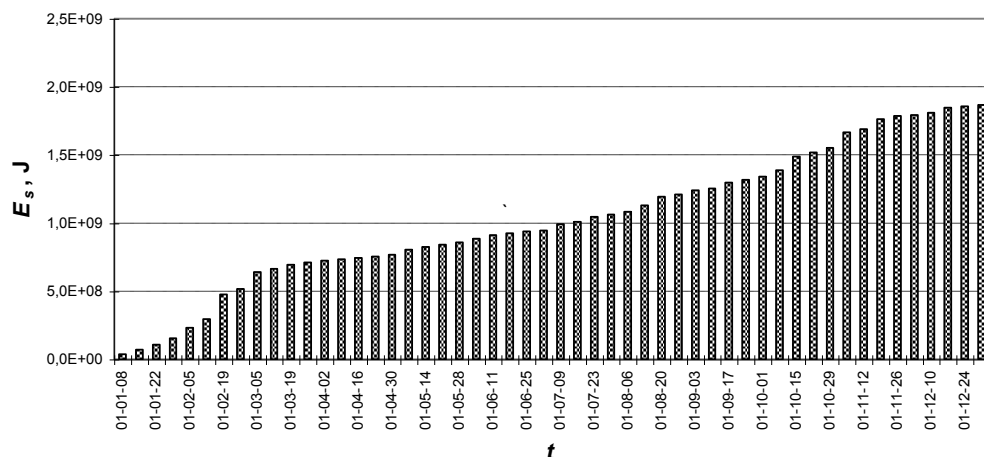
Zmiany zachodzące w rozkładzie aktywności sejsmicznej, wyrażającej się liczbą wstrząsów w dziesięciodniowych przedziałach czasu, bardzo wyraźnie odzwierciedlają się w zmianach parametru b . Duże wartości parametru b wskazują na stosunkowo niski poziom aktywności sejsmicznej i odwrotnie – niskie wartości b – na okresy wzmożonej aktywności sejsmicznej. Analizując przedstawione rozkłady stwierdza się, że aktywność sejsmiczna, tzn. liczba wstrząsów, do połowy maja 2001 roku, wyraźnie zmalała do około 50 wstrząsów na miesiąc. W kolejnych miesiącach, do początku grudnia, aktywność ta charakteryzowała się regularną tendencją wzrostową. Występowało średnio 120 wstrząsów miesięcznie. W grudniu widoczny był spadek aktywności sejsmicznej i, będący tego odzwierciedleniem, wzrost współczynnika b .



Rys. 8. Rozkład aktywności górotworu N i współczynnika b z zależności Gutenberga-Richtera w GZW w 2001 roku: t – czas

Fig. 8. Distribution of rock mass N activity and coefficient b from the dependence Gutenberg-Richter in the USC B in 2001: t – time

Kolejnym analizowanym parametrem był przyrost skumulowanej energii sejsmicznej wywołanej w tygodniowych przedziałach czasu (krzywa kumulacyjna Benioffa), co obrazuje rysunek 9. Krzywa kumulacyjna do końca marca 2001 roku wykazywała szybki przyrost skumulowanej energii sejsmicznej. Następnie obserwowano stopniowy, w miarę jednolity, przyrost energii sumarycznej spowodowany występowaniem w przybliżeniu takiej samej liczby wstrząsów. Taki przebieg krzywej Benioffa świadczy o regularnej relaksacji górotworu w GZW.



Rys. 9. Rozkład przyrostu sumarycznej energii sejsmicznej w tygodniowych przedziałach czasu (krzywa Benioffa) w 2001 roku: t – czas, E_s – sumaryczna energia sejsmiczna

Fig. 9. Distribution of increase of summary seismic energy in week's time intervals (Benioff's curve) in 2001: t – time, E_s – summary seismic energy

4. PODSUMOWANIE

Systematyczna obserwacja indukowanej aktywności sejsmicznej w GZW prowadzona jest w GIG od lat pięćdziesiątych (stacje sejsmiczne z rejestracją optyczną). Górnośląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna działająca bez przerwy od 1973 roku pełni rolę nadrzędną w stosunku do sieci kopalnianych. Na podstawie uzyskiwanych sejsmogramów w sposób ciągły opracowywany jest bank danych zawierający podstawowe parametry sejsmologiczne wstrząsów górotworu o energii $E \geq 10^5$ J ($M_L \geq 1,6$), takie jak: data i czas wystąpienia zjawiska, energia sejsmiczna wstrząsu, magnituda, nazwa kopalni, współrzędne epicentrum. Dane te wykorzystywane są do badań związanych z szeroko pojętą analizą stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach oraz oceną dynamicznych oddziaływań drgań wywoływanych wstrząsami na powierzchniowe środowisko naturalne w GZW.

Aktywność sejsmiczna występuje głównie w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w rejonach charakteryzujących się stosunkowo głębokim zaleganiem eksploatowanych pokładów węgla i występowaniem w ich otoczeniu mocnych i grubych kompleksów piaskowcowych oraz silnie rozwiniętą tektoniką. Czas trwania obserwacji sejsmologicznej prowadzonej w Głównym Instytucie Górnictwa można podzielić na dwa okresy, pierwszy to lata 1950–1972, w którym udokumentowano 350 zjawisk sejsmicznych o energii $E \geq 10^6$ J (magnitudzie lokalnej $M_L \geq 2,2$) i drugi od 1973 roku do chwili obecnej. W latach 1973–2000 aktywność sejsmiczna GZW charakteryzowała się wysokim poziomem, zróżnicowaniem w poszczególnych latach oraz różną intensywnością w poszczególnych rejonach. W tym okresie zarejestrowano ponad 57600 wstrząsów o energii $E \geq 10^5$ J ($M_L \geq 1,6$).

Wieloletnia analiza kilkudziesięcioletniego zbioru danych pozwoliła na wyodrębnienie dwóch typów sejsmiczności, tzw. górniczej i górniczo-tektonicznej.

Pierwszy typ zjawisk bezpośrednio związany jest z prowadzoną działalnością górniczą i występuje w sąsiedztwie czynnych wyrobisk górniczych. Są to zjawiska słabsze energetycznie, które charakteryzują się eksplozyjnym typem mechanizmu ognisk, co odzwierciedla procesy związane z destrukcją pokładu lub bezpośredniego jego otoczenia.

Drugi typ sejsmiczności górniczo-tektoniczny indukuje się na skutek połączenia dwóch czynników: komponenty górniczej i tektonicznej. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w rejonach stref tektonicznych często odczuwalne przez ludność na powierzchni. Najczęstszym typem mechanizmu ognisk tych wstrząsów jest mechanizm poślizgowy normalny z zaznaczającym się poziomym przesunięciem w ognisku wstrząsu. Azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady dla tych zjawisk korelują z rozciągłością i upadem uskoków, w pobliżu których zlokalizowane są ogniska wstrząsów. Dane te pozwalają wnioskować o tym, że przyczyną tych zjawisk jest współdziałanie naprężeń tektonicznych istniejących w analizowanym obszarze z naprężeniami wywołanymi pracami górniczymi.

Przeprowadzona statystyczna analiza sejsmiczności GZW w 2001 roku obejmująca rozkłady ilościowo-energetyczne oraz rozkład parametru b relacji Gutenberga-Richtera i rozkład skumulowanej energii sejsmicznej (krzywa Benioffa) wskazuje na ogólnie wysoki poziom aktywności sejsmicznej w GZW. Najbardziej wstrząsogennym rejonem w 2001 roku był rejon rudzko-zabrzański i katowicki.

Literatura

1. Denysenko S.: *Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w latach 1974–1994*. Wiadomości Górnicze 1996 nr 1.
2. Domański B.: *Comparison of source parameters of seismic events at Polish coal and copper mines*, In: *Rockbursts and Seismicity in Mines* (ed. S.J. Gibowicz, S. Lasocki). Rotterdam, Balkema 1997.
3. Drzęźła B., Mendecki A., Marcela E.: *Wpływ warunków górniczych na kształtowanie się aktywności sejsmicznej na przykładzie KWK Miechowice*. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 1984 M-6 (176), s. 377-383.

4. Dubiński J., Mutke G., Stec K.: *Rozwiązania w sejsmologii górniczej poprawiające efektywność oceny stanu zagrożenia sejsmicznego*. Geologia t. 25. Kraków, Wydaw. Naukowo-Dydaktyczne AGH 1999, s. 45-58.
5. Kijko A.: *A modified form of the first Gumbel distribution: model for the occurrence of large earthquakes. Part II – Estimation of parameters*. Acta Geophys. Pol. 1982 Nr 2, s. 148-159.
6. Kijko A.: *Bimodalny charakter ekstremalnych rozkładów zjawisk sejsmicznych w kopalniach*. Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., 1986 M-8 (191), s. 91-101.
7. Knochenhauer E.: *Erderschütterungen und Bergschaden*. Zeit. f.d. Berg-Hütt-und Solinenwesen, 1912.
8. Lindenman A.: *Gebirgsschläge und Bodenerschütterungen im Westoberschlesischen Steinkohlenbezirk*. Zeit, f.d. Berg-Hütt und Solinenwesen, 1930.
9. Mutke G., Stec K.: *Seismicity in the Upper Silesian Coal Basin, Poland: Strong regional seismic events*, In: Rockbursts and seismicity in mines (ed. S.J. Gibowicz, S. Lasocki). Rotterdam, Balkema 1997.
10. Mutke G., Stec K.: *Biuletyn najsilniejszych wstrząsów górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym*. Katowice, GIG 1992–2000 (niepublikowana).
11. Paszta E., Udziela B., Wierzchowska Z.: *Najsilniejsze wstrząsy górotworu na Górnym Śląsku*. Katowice, GIG 1950–1970, nr 1-14.
12. Stec K., Drzewiecki J.: *Relationship between mine tremor focal mechanism and local mining and geological conditions*. Acta Montana, Seria A 2000 No 16 (118), s. 189-202.
13. Wierzchowska Z.: *Przyczyny wstrząsów na Górnym Śląsku*. Prace GIG, Komunikat 268. Katowice 1961.
14. Wierzchowska Z.: *Nowe poglądy na pochodzenie wstrząsów ziemi na Górnym Śląsku*. Przegląd Górniczy 1962 nr 7-8, s. 418-422.
15. Wierzchowska Z.: *Zagraniczne metody sejsmiczne do badania tępań*. Przegląd Górniczy 1964 nr 9, s. 458-463.
16. Wierzchowska Z.: *Regionalna Sieć Mikrosejsmologiczna na Górnym Śląsku*. Przegląd Górniczy 1981 nr 5, s. 222-228.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Ryszard Bogucki

PROGRAM KOMPUTEROWY DO ILOŚCIOWEJ ANALIZY OBRAZÓW TERMOGRAFICZNYCH DLA PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

Streszczenie

Podczas określania stanu termicznego budynków wyniknął problem oceny jakości przegród budowlanych pod względem przenikalności cieplnej, a co za tym idzie jakości zastosowanej izolacji. W związku z powyższym w Głównym Instytucie Górnictwa została opracowana metoda pomiarów i obliczeń współczynnika przenikalności cieplnej u z wykorzystaniem termogramów wykonanych kamerą termowizyjną oraz dodatkowych pomiarów temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku. Proces obliczania następnie zautomatyzowano, opracowując program komputerowy do ilościowej analizy obrazów termograficznych dla przegród budowlanych. Obecnie program „Termowizja budynków” ma następujące funkcje:

- wyświetlanie wykonanych termogramów,
- wyświetlanie dodatkowych fotografii w celu jednoznacznej identyfikacji badanego obszaru,
- obliczanie temperatury średniej, minimalnej i maksymalnej dowolnie wybranego obszaru na termogramie,
- obliczanie współczynnika przenikalności cieplnej u ,
- drukowanie wyników badań,
- archiwizację wyników badań,
- zarządzanie bazą danych.

Obliczenia wykonywane są zgodnie z obowiązującymi w Polsce normami.

Dzięki zastosowanej metodzie badań oraz opracowanemu programowi, można wykonywać między innymi badania przegród budowlanych w celu wykrycia ucieczek ciepła, obliczać współczynnik przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych, stropów, okien itp., kontrolować prawidłowe wykonanie docieplenia budynków, wykonywać analizy jakości izolacji rurociągów ciepłowniczych.

Computer program for the quantitative analysis of thermographic images for building partitions

Summary

During the determination of the thermal state of buildings resulted the problem of quality assessment of building partitions as regards the thermal permeability, and what follows, the quality of applied insulation. In connection with the above at the Central Mining Institute was developed the method of measurements and calculations of the thermal permeability coefficient u with the use of thermograms carried out by means of a thermovisional camera and additional measurements of the air temperature inside and outside of the building. The calculation process was then modernized, preparing a computer program to the quantitative analysis of thermographic images for building partitions. At the present time the program “Thermovision of buildings” has the following functions:

- photo-copying of performed thermograms,
- photo-copying of additional photographs in order to identify unambiguously the investigated area,
- calculation of the average, minimum and maximum temperature of arbitrary selected area on the thermogram,

- calculation of the thermal permeability coefficient u ,
- printing of investigation results,
- keeping archives of investigation results,
- data basis management.

The calculations are carried out in conformity with standards being in force in Poland.

Owing to the investigation methods and developed program, one can carry out among others investigations into building partitions in order to detect heat escapes, calculate the heat permeability coefficient for outside walls, floors, windows etc., control the correct execution of warming of buildings, perform analyses of insulation quality of heating pipelines.

1. WSTĘP

Obowiązujące na terenie naszego kraju przepisy, normy i wytyczne zostały opracowane w celu zwiększenia efektywności gospodarowania, a tym samym oszczędnego i racjonalnego użytkowania paliw i energii. Podstawowym aktem prawnym z zakresu gospodarki energetycznej jest ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku pt.: Prawo energetyczne (Dz. U. 1997 nr 54, poz. 348 z dnia 4.06.1997). Do Prawa energetycznego wydano, jako przepis wykonawczy, rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 30 września 1997 roku w sprawie „Warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie” (Dz. U. 1997 nr 132, poz. 878) wraz z uaktualnieniami (www.ure.gov.pl) [1, 2, 3, 4].

2. METODYKA BADAŃ TERMOWIZYJNYCH W BUDOWNICTWIE

Termowizja znalazła zastosowanie wszędzie tam, gdzie na podstawie rozkładów temperatury, czy też zmian temperatury w czasie, można wnioskować o zachodzących zjawiskach przepływu ciepła. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że jest to metoda badawcza umożliwiająca śledzenie różnych procesów, których przebieg wiąże się ze zmianami emisji ciepła lub temperatury w czasie albo ze zróżnicowaniem obrazów termicznych poszczególnych obiektów, urządzeń lub ich części.

Na świecie na szeroką skalę są prowadzone specjalistyczne prace badawcze, ukierunkowane na przyporządkowanie obrazów termalnych określonym zjawiskom, czy też stanom różnych maszyn, urządzeń, bądź budowli.

W kraju pomiar emisji ciepła z budynków przeprowadza się najczęściej za pomocą czujników natężenia strumienia ciepła. Stosowanie czujników jest kłopotliwe z uwagi na konieczność mocowania ich na zewnętrznej stronie ściany budynku, bez względu na jego wysokość. W celu zapewnienia małej oporności cieplnej w miejscu styku należy wówczas dokładnie wygładzić powierzchnię ściany i następnie zamocować czujnik za pomocą cienkiej warstwy smaru silikonowego.

Niedogodności te wyeliminowano dzięki zastosowaniu kamery termowizyjnej. Główny Instytut Górnictwa dysponuje nowoczesną aparaturą termowizyjną typu AGEMA 470 (fot. 1), która pozwala na uzyskiwanie kolorowych termogramów badanych przegród budowlanych. Dzięki cyfrowej analizie obrazu możliwe jest otrzymanie dokładnego rozkładu temperatury z wyznaczeniem miejsc o najniższej i najwyższej temperaturze.



Fot. 1. Kamera termowizyjna typu 470, firmy AGEMA

Phot. 1. Thermovisional camera of 470 type, firm AGEMA

Pomiary termowizyjne polegają na zdalnej i bezkontaktowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu, dzięki temu, że promieniowanie podczerwone jest emitowane przez każde ciało o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego. Metoda ta polega na rejestrowaniu natężenia promieniowania podczerwonego docierającego do detektora od poszczególnych elementów badanego obiektu, a następnie przekształcaniu tego promieniowania na sygnał elektryczny oraz obraz widzialny w urządzeniach kontrolno-pomiarowych.

Możliwości pomiarowe kamery termowizyjnej typu 470, firmy AGEMA: kamera jest nowoczesnym urządzeniem pozwalającym na otrzymywanie kolorowych termogramów badanych obiektów. Poszczególne obrazy rejestruje się na dyskietkach. Dzięki zastosowaniu cyfrowej analizy obrazu możliwe jest otrzymanie dokładnego rozkładu temperatury, z wyznaczeniem miejsc o najwyższej lub najniższej temperaturze. Podstawowe parametry techniczne przedstawiają się następująco:

- zakres pomiarowy $-20^{\circ}\text{C} \div +1500^{\circ}\text{C}$,
- rozdzielczość $0,1^{\circ}\text{C}$ przy 30°C ,
- dokładność $\pm 2\%$,
- wymienne obiektywy $7^{\circ} \times 7^{\circ}$ oraz $20^{\circ} \times 20^{\circ}$,
- charakterystyka widmowa $2 \div 5 \mu\text{m}$.

Metodę termowizyjną stosuje się więc w badaniach nad zjawiskami i procesami zachodzącymi w wyniku zmian temperatury lub jej rozkładu na powierzchni, między innymi do **wyszukiwania miejsc ucieczek ciepła z budynków i kontroli jakości wykonania ocieplenia budynków** oraz do badania stanu termicznego chłodni kominowych, urządzeń i linii energetycznych, składów węgla, rurociągów ciepłowniczych.

Najczęstszym zastosowaniem termowizji w budownictwie jest ocena stanu izolacji cieplnej budynków oraz wykrywanie niewłaściwych połączeń elementów, czy też wad materiałów. Istotą termowizyjnej metody oceny stanu izolacji cieplnej jest możliwość wykrywania różnic temperatury na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych przegród budynku. Na skutek przepływu ciepła przez ściany otrzymuje się rozkład temperatury na powierzchni, typowy dla każdego badanego budynku, na przykład: wielka płyta, siporex, cegła czerwona bądź ślizgi [6, 7].

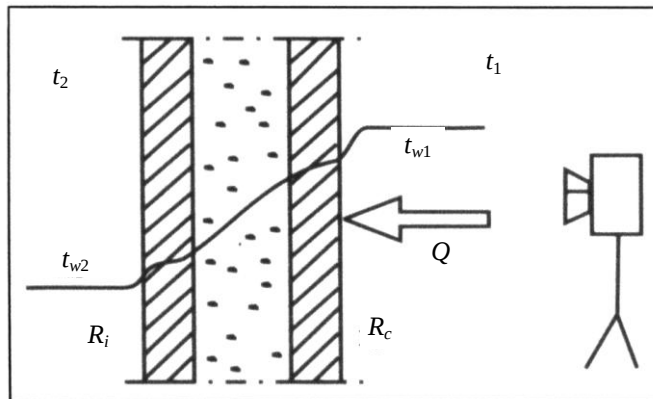
Warunkiem określenia defektów tą metodą jest przepływ ciepła przez ściany. Wielkość strumienia ciepła przepływającego przez przegrody jest zależna od różnicy temperatury po obu stronach badanej przegrody. Należy uwzględnić również wpływ czynników atmosferycznych, na przykład: promieni słonecznych, wiatru, deszczu, nagłej zmiany temperatury itp. Wszystkie te czynniki wpływają na rozkład temperatury, dlatego najkorzystniej jest wykonywać pomiary nad ranem przy bezwietrznej i suchej pogodzie.

Badania termowizyjne, mające na celu określenie stanu termicznego i rzeczywistego zapotrzebowania obiektu na ciepło wykonuje się przy zastosowaniu i wykorzystaniu obowiązujących norm i wytycznych [8, 9].

3. METODYKA OBLICZEŃ STRAT CIEPŁA W OBIEKCIE

Obliczenia cieplne obiektu wykonuje się na podstawie termogramów otrzymanych z kamery termowizyjnej, przyjętego algorytmu obliczeń oraz przyjętych założeń. Na rysunku 1 przedstawiono spadki temperatury i strumień przepływu ciepła przez przegrodę.

Dla otrzymanego termogramu oraz przyjętego algorytmu oblicza się parametry termiczne przegród budowlanych, tj. współczynnik przenikania ciepła oraz zapotrzebowanie mocy cieplnej budynku [5].



Rys. 1. Rozkład strumienia ciepła Q , przyjętego do obliczeń

Fig. 1. Distribution of heat stream Q , adopted for calculations

3.1. Algorytm obliczeń

Opór cieplny przegrody R oblicza się, porównując strumień przenikania ciepła przez przegrodę oraz otoczenie

$$\vartheta_p = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R}$$

$$\vartheta_o = \frac{t_1 - t_2}{R_i + R + R_e}$$

$$\frac{t_{w1} - t_{w2}}{R} = \frac{t_1 - t_2}{R_i + R + R_e} \rightarrow R = \frac{(R_i + R_e)(t_{w1} - t_{w2})}{(t_1 - t_2) - (t_{w1} - t_{w2})}, \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

gdzie:

- ϑ_p – strumień przenikania ciepła przez przegrodę;
- ϑ_o – strumień przenikania ciepła przez otoczenie;
- t_{w1} – temperatura przegrody po stronie wewnętrznej pomieszczenia, °C;
- t_{w2} – temperatura przegrody po stronie zewnętrznej pomieszczenia, °C (z termogramu);
- t_1 – temperatura pomieszczenia, °C;
- t_2 – temperatura zewnętrzna, °C (w dniu pomiaru).

Współczynnik u przenikania ciepła przez przegrodę oblicza się według wzoru

$$u = \frac{1}{R_i + R + R_e}, \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

gdzie:

- R_i – opór przejmowania ciepła, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$; według PN-EN ISO 6946 $R_i = 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$;
- R – opór cieplny przegrody, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$;
- R_e – opór miejscowy przejmowania ciepła, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$; według PN-EN ISO 6946 $R_e = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

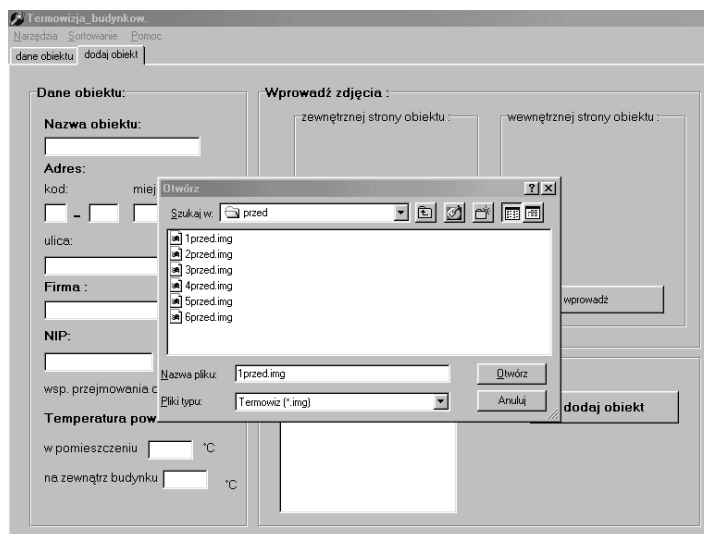
4. OPIS PROGRAMU „TERMOWIZJA BUDYNKÓW”

Ponieważ program komputerowy IRWIN, dostarczany wraz z kamerą termowizyjną, nie pozwala na automatyczne wyliczanie współczynnika przenikania ciepła u , w GIG opracowano program **Termowizja budynków**, który na podstawie obrazów termowizyjnych oraz dodatkowych pomiarów temperatury powietrza atmosferycznego umożliwia jego wyliczenie.

Program **Termowizja budynków** (wykonany w środowisku programistycznym Delphi firmy Borland) służy do prezentowania wykonanych termogramów przegród budowlanych oraz przeprowadzania obliczeń i **ma następujące funkcje:**

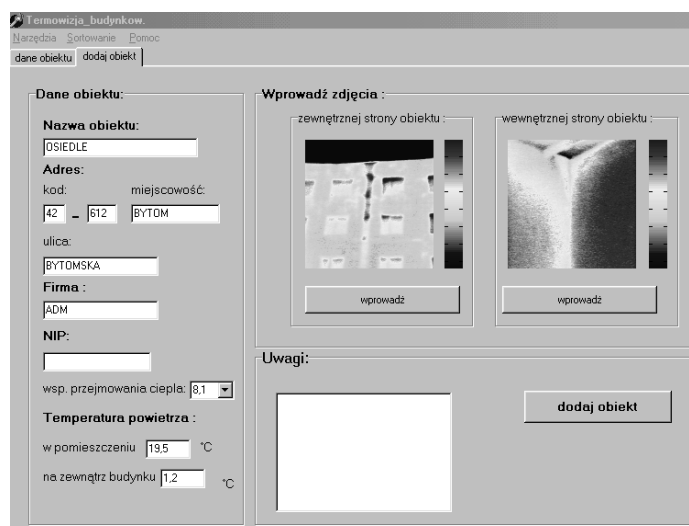
- a) Wyświetlanie wykonanych termogramów, z zachowaniem parametrów pomiarowych kamery termowizyjnej – służy do tego zakładka „**dodaj obiekt**”, gdzie po naciśnięciu przycisku „**wprowadź**” można wybrać jeden z zarejestrowanych termogramów (fot. 2).
- b) Archiwizacja zarejestrowanych danych – odbywa się to również poprzez zakładkę „**dodaj obiekt**” – w lewej części okna znajdują się pola, które należy wypełnić danymi badanego obiektu oraz dodatkowymi wynikami pomiarów

temperatury powietrza (fot. 3). Po wpisaniu wszystkich informacji należy nacisnąć przycisk „dodaj obiekt”, co spowoduje zapisanie wszystkich danych na dysku.



Fot. 2. Wprowadzanie termogramów

Phot. 2. Introduction of thermograms



Fot. 3. Okno programu z termogramami oraz danymi obiektu

Phot. 3. Program window with thermograms and object data

- c) Dodatkowo w polu „**Uwagi**” wprowadza się zapisy dotyczące warunków, w których wykonano pomiary.
- d) Możliwość zaznaczenia dowolnego obszaru na termogramie (fot. 4) – po kliknięciu prawym klawiszem myszy na termogramie i wyborze rodzaju zaznaczenia (**elipsa**, **prostokąt**, **krzywa**) uzyskuje się możliwość wyboru dowolnego miejsca na termogramie, które będzie przedmiotem analizy (obliczenie jego średniej temperatury, temperatury minimalnej i maksymalnej oraz współczynnika u). Po naciśnięciu przycisku „**dodaj obiekt**” wszystkie obliczenia zostają automatycznie dokonane oraz zapisane w bazie danych.
- e) Wyświetlanie dodatkowych obrazów graficznych, umożliwiających dokładną identyfikację badanego obszaru (fot. 4).
- f) drukowanie raportów (fot. 5).

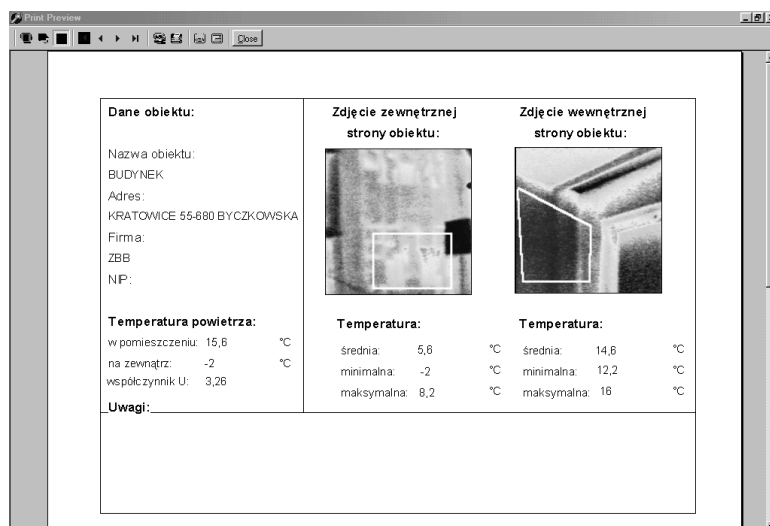
Archiwum programu (fot. 6), poza termogramami, przechowuje informacje o:

- parametrach termogramu,
- nazwie nadanej przez użytkownika,
- dacie i godzinie rejestracji,
- danych dotyczących miejsca wykonania pomiarów

Możliwości takie dają użytkownikowi pełną swobodę dysponowania wynikami pomiarów.

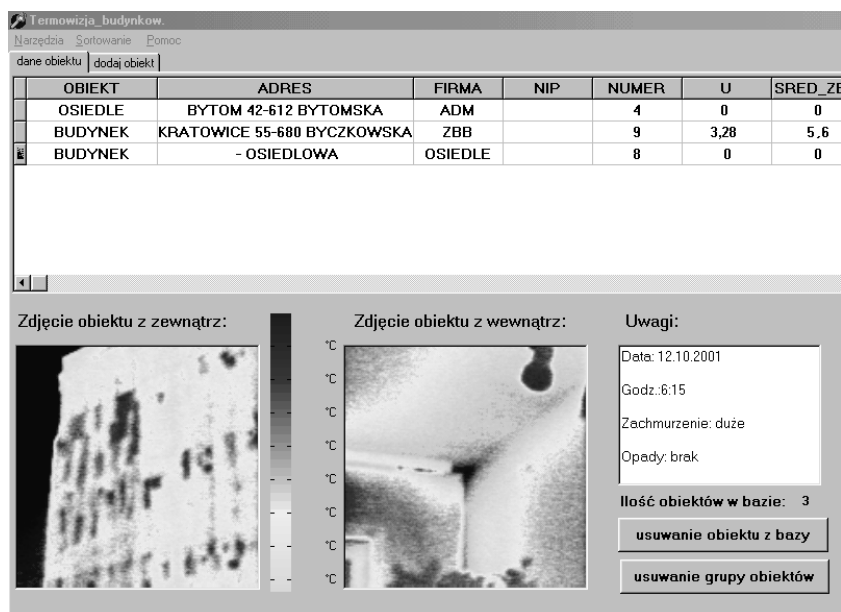
Fot. 4. Wybór rodzaju zaznaczenia obszaru termogramu do obliczeń

Phot. 4. Selection of the kind of thermogram area marking for calculations



Fot. 5. Okno podglądu wydruku

Phot. 5. Window of printout monitoring



Fot. 6. Okno programu z danymi archiwizacyjnymi

Phot. 6. Program window with archive data

Dostęp do poszczególnych opcji możliwy jest poprzez **menu główne** programu lub poprzez **menu lokalne** zdefiniowane dla każdego z elementów w **oknie głównym**

programu **Termowizja budynków**, osiągalne przez kliknięcie prawym klawiszem myszy. Dzięki temu korzystanie z funkcji programu staje się bardzo proste.

Program pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego MS Windows'98®. Minimalne wymagania sprzętowe to:

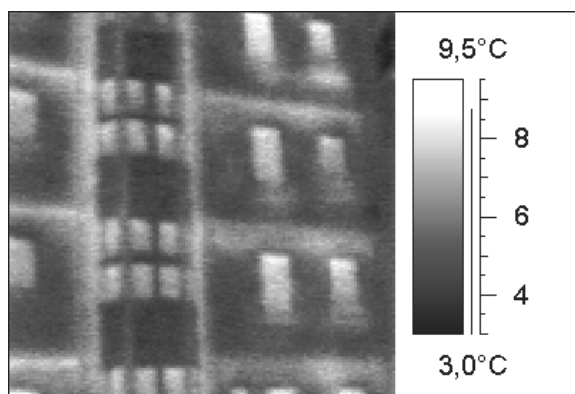
- procesor Pentium MMX 166 MHz,
- pamięć RAM 64 MB,
- karta grafiki SVGA 4 MB RAM,
- rozdzielczość ekranu 800×600 punktów,
- 30 MB wolnego miejsca na dysku twardym,
- zainstalowane sterowniki bazy danych BDE w wersji 5.0 firmy Borland,
- drukarka kolorowa.

Poza tym program **Termowizja budynków** został napisany w sposób, który zapewnia jego prawidłowe działanie niezależnie od pozostałych parametrów systemu.

5. PODSUMOWANIE

Metoda pomiaru z uwzględnieniem komputerowej obróbki danych pozwala na zaoferowanie wykonania następujących badań:

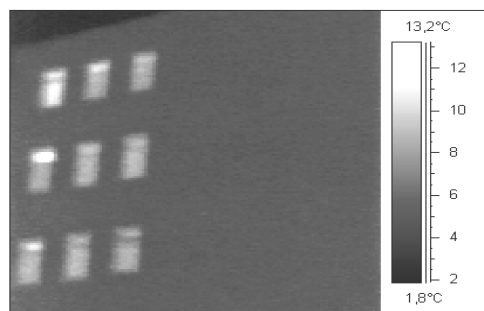
- wykrywanie ucieczek ciepła przez przegrody w budynkach mieszkalnych i przemysłowych (fot. 7),



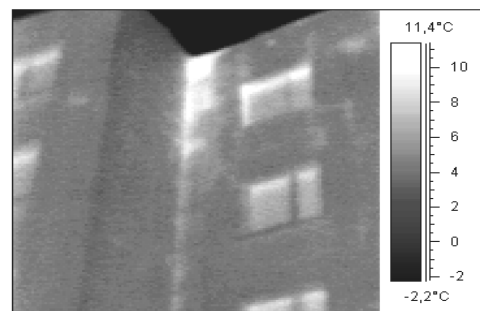
Fot. 7. Termogram nieocieplonej ściany budynku

Phot. 7. Thermogram of building wall non-protected from the cold

- obliczanie współczynnika przenikania ciepła u dla ścian zewnętrznych, stropów, okien, drzwi balkonowych i wejściowych do budynków, bram garażowych itp.,
- obliczanie ilości emitowanego na zewnątrz ciepła – zgodnie z obowiązującymi przepisami budowlanymi,
- kontrola prawidłowego wykonania docieplenia budynków (fot. 8) oraz wyznaczenie miejsc wadliwie zaizolowanych (fot. 9),



Fot. 8. Termogram prawidłowo ocieplonej ściany budynku



Fot. 9. Termogram wadliwie zaizolowanej ściany budynku

- wykonanie analizy jakości izolacji rurociągów ciepłowniczych,
- obliczenie efektów ekonomicznych powstałych wskutek ocieplenia obiektów kubaturowych.

Literatura

1. Norma PN-EN ISO 6946 Ochrona cieplna budynków.
2. Norma PN- 82/B-02402 Temperatury ogrzewanych pomieszczeń w budynkach.
3. Norma PN-83/B-03406 Obliczenie zapotrzebowania ciepła pomieszczeń o kubaturze do 600 m³.
4. Orszulik E., Kajewski B.: *Pomiary termowizyjne – metoda na zmniejszenie strat ciepła z obiektów kubaturowych*. Rynek Instalacyjny 1998 nr 7.
5. Norma PN-83/B-03430. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej.
6. Więcek B., Zwolenik S.: *Ocena stanu izolacji budynków metodami termowizyjnymi*. IV Konferencja krajowa nt. Termografia i termometria w podczerwieni. Łódź, 16-18 listopada 2000 r. Łódź, Politechnika Łódzka 2000.
7. *Wytyczne Instytutu Techniki Budowlanej dotyczące pomiarów termowizyjnych budynków*. Warszawa (niepublikowana).
8. *Wytyczne jakościowej oceny przegród zewnętrznych budynków pod względem izolacyjności cieplnej, metodą termowizyjną*. Warszawa, CEBET 1990.
9. *Wytyczne określania oporu cieplnego (i współczynnika przenikania ciepła k) przegród budowlanych*. Warszawa, CEBET 1990.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Olga Kaszowska

METODA PROGNOZOWANIA KOSZTÓW USUWANIA SZKÓD W BUDYNKACH NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę prognozowania kosztów usuwania szkód górniczych w budynkach, opracowaną w Głównym Instytucie Górnictwa.

Zaprezentowana metoda powstała w wyniku badań statystycznych, którymi objęto pięć rejonów z terenu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Są to osiedla mieszkaniowe, o zróżnicowanych typach zabudowy; wielkomiejskiej – centrum dużego miasta, podmiejskiej jednorodzinnej i wiejskiej zagrodowej. W każdym z tych rejonów kilkakrotnie ujawniały się na powierzchni wpływy bezpośrednie eksploatacji górniczej. Analizą objęto wszystkie zdarzenia oddziaływania deformacji pogórnich na budynek, co pozwoliło na uzyskanie próby o liczebności 1732. Zakres badań ograniczono do budynków o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej ulepszonej.

Wykorzystując materiały faktograficzne każdemu ze zdarzeń przypisano cechy charakteryzujące: warunki geologiczno-górnice, przebieg eksploatacji górniczej, deformacje powierzchni, odporność budynków, szkody górnicze i koszty ich usuwania. Znaczną część danych umieszczono w komputerowej „Bazie Danych o Obiektach”, zaprojektowanej przy zastosowaniu programu Access'97.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń, wynikających z analizy wielu przypadków eksploatacji górniczej i jej skutków, sformułowano następującą tezę: **koszty usuwania szkód górniczych w budynkach zależą od różnicy między kategorią odporności i kategorią terenu górniczego oraz od krotności oddziaływania eksploatacji**. Różnicę między kategoriami budynku a terenu nazwano odpornością względną.

Badania statystyczne zależności między powyższymi zmiennymi pozwoliły na wyznaczenie funkcji prawdopodobieństwa uszkodzenia budynku i wartości oczekiwanej kosztu jego naprawy. Na ich podstawie zbudowano model probabilistyczny kosztów usuwania szkód. Z przeprowadzonych badań wynika, że prawdopodobieństwo uszkodzenia budynku zależy od odporności względnej i krotności eksploatacji, natomiast koszty jego naprawy są zależne w istotny sposób tylko od kubatury.

Zastosowanie modelu probabilistycznego umożliwia prognozowanie najbardziej prawdopodobnych kosztów oraz określenie przedziału ufności, w którym, na założonym poziomie prawdopodobieństwa, będą się mieścić rzeczywiste koszty.

Zaprezentowana metoda prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach może być zastosowana do analizy ekonomicznej projektowanej eksploatacji górniczej. Jej wyniki będą stanowiły składnik, tzw. kosztów środowiskowych przedsięwzięcia.

Method of cost prediction of damage removal in buildings and mining areas

Summary

The article presents the method of cost prediction of mining damage removal in buildings, developed at the Central Mining Institute.

The presented method arose as a result of statistical investigations, which covered five regions in the Upper Silesian Coal Basin. These are housing estates, with diversified types of building development: buildings in centres of great cities, suburban one-family houses and country farm houses. In each of these regions several times appeared on the surface the direct impact of mining operations. The analysis covered all events relating to the post-mining deformation impact on the building, what enabled to obtain 1732 samples. The scope of investigations was limited to buildings of traditional and traditional improved construction.

Taking advantage of fact-related materials, characterizing features were ascribed to each event: geological and mining conditions, course of mining operations, surface deformations, resistance of buildings, mining damages and costs of their removal. A considerable part of data one has placed in the computer "Data Base of Objects", designed when using the program Access'97.

On the basis of hitherto gained experience, resulting from the analysis of many cases of mining operations and their effects, the following thesis was formulated: **The costs of removal of mining damages in buildings depend on the difference between the resistance category as well as mining area category and the multiplication factor of mining impact.** The difference between the categories of the building and the area was called relative resistance.

Statistical investigations relating to the dependence between the above-mentioned variables enabled to determine the probability function of building damage and the expected cost of its repair. On their basis the probabilistic model of damage removal costs was constructed. From the carried out investigations it results, that the probability of building damage depends on the relative resistance and multiplication factor of extraction, whereas the costs of its repair depend in an essential way only on the cubature.

The application of the probabilistic model enables to predict the most probable costs and to determine the confidence interval, where on an assumed probability level the real costs will be situated.

The presented method of cost prediction of damage removal in buildings can be applied with respect to the economic analysis of planned mining operations. Its results will constitute the component of the so-called environmental costs of the undertaking.

1. WPROWADZENIE

Metoda prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach została opracowana w wyniku badań wpływu podziemnej eksploatacji górniczej węgla kamiennego na budynki, szkód powodowanych tym wpływem i poniesionych kosztów ich naprawy [1]. Analizą objęto pięć rejonów na terenie Górnosląskiego Zagłębia Węglowego, reprezentujących kilka typów zabudowy mieszkaniowej. W każdym z nich prowadzono kilkakrotnie eksploatację górnictwem, co pozwoliło na uzyskanie próby 1732 zdarzeń.

Zaprezentowana metoda prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach może być zastosowana do analizy ekonomicznej projektowanej eksploatacji górniczej. Jej wyniki będą stanowić składnik tzw. kosztów środowiskowych przedsięwzięcia.

Przedmiotem badań były skutki wpływów bezpośrednich eksploatacji górniczej przejawiające się w formie deformacji ciągłych. W rejonach wybranych do badań szkody były spowodowane odkształceniami poziomymi, natomiast nie uwzględniono przypadków szkód wynikających z nachylenia terenu. Nie analizowano szkód spowodowanych wpływami pośrednimi, do których zalicza się wstrząsy, zawodnienia i osuszenia oraz obniżenia spowodowane odwodnieniem górotworu, ani też wpływami bezpośrednimi w formie deformacji nieciągłych.

Spośród obiektów zlokalizowanych w wybranych rejonach badaniami objęto budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej ulepszonej.

Budynki poddane wpływom eksploatacji górniczej mogą ulec uszkodzeniu. Możliwość wystąpienia szkód oraz ich stopień są zależne od sytuacji geologiczno-górnictwowej, cech podłoża budowlanego i cech budynku. Wykorzystując wyniki wieloletnich badań specjalistów, a także materiał statystyczny stwierdzono, że o potencjalnej szkodliwości oddziaływania eksploatacji na budynek decyduje ponad 90 czynników [4]. Są to zarówno przyczyny górnicze, jak i konstrukcyjno-budowlane, które mają charakter losowy [2, 3].

Za miarę przyczyn górniczych przyjęto kategorię terenu górniczego K_t , określoną na podstawie odkształceń poziomych, a konstrukcyjno-budowlanych – kategorię odporności obiektu K_o . Te dwie wielkości ujęto razem jako odporność względną O_w , którą definiuje wzór

$$O_w = K_o - K_t \quad (1)$$

Odporność względną umożliwia porównywanie skutków eksploatacji powodujących odkształcenia poziome powierzchni o zróżnicowanych wartościach, w budynkach o odmiennej odporności.

Na podstawie doświadczeń, wynikających z analizy wielu przypadków eksploatacji górniczej i jej skutków [5] sformułowano następującą tezę:

Koszty usuwania szkód górniczych w budynkach są możliwe do prognozowania i zależą od różnicy między kategorią odporności i kategorią terenu górniczego oraz od krotności oddziaływania eksploatacji.

2. METODYKA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Badaniami zostały objęte wszystkie elementy łańcucha przyczynowo-skutkowego:

eksploatacja górnicza → deformacje powierzchni →
uszkodzenia budynków → usuwanie szkód

oraz cechy środowiska (górotwór, budynki), w którym te procesy zachodzą. Analizie poddano cechy procesów i ich środowiska, mające wpływ na efekt końcowy, którym są koszty naprawy szkód.

Większość danych pochodziła z dokumentacji kopalń, co w istotny sposób wpłynęło na wybór rejonów badań. Ankietowano większość kopalń GZW. Ważnym kryterium selekcji była możliwość przypisania uszkodzeń budynków i kosztów ich naprawy konkretnej eksploatacji górniczej oraz określenia odporności, jaką miały budynki przed ujawnianiem się wpływów. Wynikiem rozpoznania był wybór pięciu rejonów.

Kolejnym etapem badań było gromadzenie danych o wytypowanych rejonach, umożliwiających określenie: warunków geologiczno-górniczych, przebiegu eksploatacji górniczej, deformacji powierzchni, cech budynków, szkód górniczych i kosztów ich usuwania. Znaczną część danych umieszczono w komputerowej „Bazie Danych o Obiektach”, zaprojektowanej za pomocą programu Access'97 na użytek podjętych badań.

Badania obejmowały zarówno prawdopodobieństwo uszkodzenia budynków, jak i koszty ich naprawy. Ponadto określono przeciętne proporcje między kosztami naprawy budynków i kosztami przywrócenia funkcji innych elementów zagospodarowania powierzchni na terenach zabudowy mieszkaniowej. Badania przeprowadzono przy użyciu metod statystyki matematycznej, korzystając z programu komputerowego Statistica PL.

W badaniach wszystkie koszty remontów przeliczono na koszty z 2000 roku, stosując współczynnik wzrostu cen 1 m² powierzchni użytkowej budynku mieszkalnego.

3. REJONY BADAWCZE

Do badań wytypowano pięć rejonów z terenu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego o zróżnicowanej zabudowie:

- Rejon ulicy Kościuszki w śródmieściu Katowic – wielkomiejska zabudowa mieszkaniowa z przełomu XIX i XX wieku, którą tworzą budynki mieszkalne lub mieszkalne z dolnymi kondygnacjami handlowo-usługowymi, usytuowane głównie w ciągach ulicznych oraz garaże zlokalizowane w oficynach. Z reguły są to obiekty niezabezpieczone przed wpływami górniczymi, o kategorii odporności 1 lub 2. Eksploatacja górnicza, prowadzona w śródmieściu trzykrotnie, powodowała na powierzchni odkształcenia poziome nieprzekraczające wartości dopuszczalnych dla terenów I kategorii.
- Rejon Alei Korfantego w śródmieściu Katowic – w jego wielkomiejskiej zabudowie można wyróżnić dwa typy: zwartą z przełomu XIX i XX wieku oraz rozproszoną z lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku. Część starsza ma takie same cechy jak w rejonie pierwszym. W części nowszej są usytuowane budynki użyteczności publicznej i garaże, wolnostojące, zabezpieczone przed wpływami górniczymi. Większość budynków ma kategorię odporności 1 lub 2. Eksploatacja górnicza, prowadzona w tej części śródmieścia, czterokrotnie powodowała na powierzchni odkształcenia poziome nieprzekraczające dopuszczalnych dla terenów I kategorii.
- Śródmieście Sosnowca – zróżnicowana zabudowa centrum dużego miasta z końca XIX i pierwszej połowy XX wieku oraz z lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX. Budynki starsze, w większości mieszkalne i mieszkalne z dolnymi kondygnacjami handlowo-usługowymi, są usytuowane w ciągach ulicznych. Nowsze, głównie handlowo-usługowe i użyteczności publicznej, są obiektami wolnostojącymi. Zabezpieczenia przed wpływami górniczymi ma połowa budynków, najczęściej mają 2 kategorię odporności. W tym rejonie eksploatację prowadzono dwukrotnie: pierwsza spowodowała deformacje powierzchni I, II i III kategorii, późniejsza – I kategorii.
- Marklowice-Chałupki – przykład wiejskiej zabudowy zagrodowej, złożonej z wolnostojących budynków mieszkalnych i gospodarczych, w większości wzniesionych po 1945 roku. W analizowanym okresie w znacznej części budynków wprowadzono zabezpieczenia, dzięki czemu ich przeciętna odporność wzrosła z 2 do 4 kategorii. Prowadzone w tym rejonie eksploatacje górniczne powodowały następujące deformacje powierzchni: pierwsza – II kategorii, druga – III kategorii, a ostatnia – III i IV kategorii.
- Jaworzno-Jeziorki – przykład zabudowy jednorodzinnej typu podmiejskiego, powstałej po 1945 roku. Składają się na nią wolnostojące budynki mieszkalne o odporności 3 lub 4 kategorii. Ponad połowa ma zabezpieczenia przed wpływami górniczymi. Obydwie, prowadzone w tym rejonie eksploatacje spowodowały odkształcenia poziome nieprzekraczające na przeważającym obszarze dopuszczalnych dla II kategorii, jednak w czasie drugiej większa liczba budynków znalazła się w zasięgu I, III i IV kategorii.

4. BADANIA STATYSTYCZNE POPULACJI PRÓBNEJ

W każdym z rejonów wystąpiło wiele zdarzeń spowodowanych oddziaływaniem eksploatacji górniczej na budynek. Wszystkie razem utworzyły populację próbną o liczebności 1732. Biorąc pod uwagę wyniki dotychczasowych badań, przyjęto, że cechami opisującymi te zdarzenia, są:

- zmienne niezależne:
 - kubatura budynku V ,
 - odporność względna O_w , zdefiniowana wzorem (1),
 - krotność eksploatacji w , czyli liczba określająca jej pozycję w szeregu chronologicznym eksploatacji oddziałujących na dany budynek;
- zmienne zależne:
 - uszkodzenie budynku U , przyjmujące wartość 1 w tych zdarzeniach, w których budynek uległ uszkodzeniu oraz 0 w przypadku przeciwnym,
 - koszty usuwania szkód w budynku k .

Analiza cech opisujących zdarzenia i kryteriów doboru danych statystycznych wykazała, że obserwacje nie mają na siebie wzajemnego wpływu. Warunek niezależności zdarzeń został spełniony w wyniku przyjęcia następujących założeń:

- przed każdą eksploatacją przeprowadzano inwentaryzację budynków,
- po każdej eksploatacji usuwano spowodowane nią szkody w budynkach.

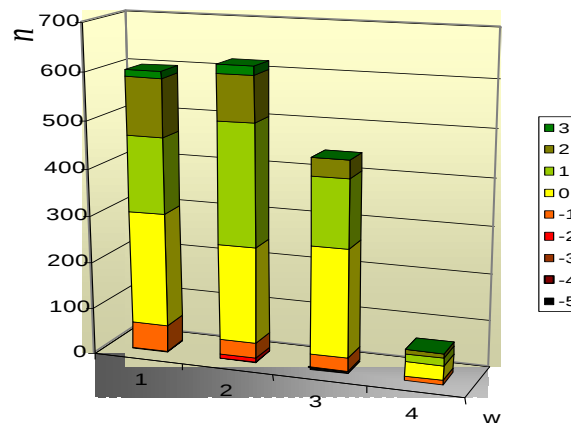
4.1. Charakterystyka cech badanej próby

Struktura badanej próby ze względu na odporność względną budynków wykazała, że w większości badanych zdarzeń (92%) kategoria terenu górniczego nie przekraczała kategorii odporności budynków. Najliczniejsze były grupy o odporności względnej 0 (41%) oraz +1 (34%). Biorąc pod uwagę krotność eksploatacji (rys. 1), można stwierdzić, że największa część zdarzeń to drugie i pierwsze oddziaływanie na budynek – odpowiednio 36% i 35%. Najmniej liczna była grupa o najwyższej, czwartej krotności.

W badaniach wzięto pod uwagę budynki o zróżnicowanej wielkości; największy z nich miał 22,5 tys. m³. Kubaturę nie większą niż 1 tys. m³ miała prawie połowa, a 10 tys. m³ tylko 4%.

Najwyższy koszt remontu budynku to 385,5 tys. zł, ale nie większych niż 100,0 tys. zł było 82% przypadków. Największe liczebności mają przedziały 0÷10 tys. zł i 10÷20 tys. zł.

Powyższa analiza wykazała, że rozkłady wszystkich zmiennych odbiegają od rozkładu normalnego. Potwierdziły to wyniki przeprowadzonego testu W Shapiro-Wilka.



Rys. 1. Częstość klas populacji próbnej ze względu na krotność eksploatacji wraz ze strukturą odporności względnej: w – eksploatacja, n – liczba budynków

Fig. 1. Frequency of sampling population classes considering the multiplication factor of extraction along with the structure of relative resistance: w – extraction, n – number of buildings

4.2. Badanie zależności między cechami populacji próbnej

W przypadkach, gdy zmienne nie mają rozkładu normalnego, do badań korelacji stosuje się statystyki nieparametryczne. Należy do nich, zastosowana w badaniach, statystyka rang Spearmana, która służy do badania korelacji liniowej. Współczynnik korelacji R rang Spearmana pozwala na ocenę stopnia proporcjonalności wartości zmiennych. Jego kwadrat, tzw. współczynnik determinacji, określa, jaka część zmiennej zależnej jest tłumaczona zmiennością zmiennej niezależnej.

Weryfikacji hipotezy zerowej (o braku zależności między zmiennymi) dokonano przy użyciu testu t Studenta lub testu F Fishera-Snedecora. Pozwalają one na wyznaczenie poziomu istotności p współczynnika korelacji. Gdy poziom istotności nie przekracza poziomu krytycznego α , otrzymany współczynnik korelacji R można uznać za istotny. Przyjęto $\alpha = 0,05$.

Dla zmiennych, między którymi stwierdzono istnienie korelacji przynajmniej przeciętnej, wyznaczono model regresji. Parametry równania regresji były szacowane metodą najmniejszych kwadratów. Ich istotność określono przy zastosowaniu testu t Studenta.

W badaniach prawdopodobieństwa uszkodzenia budynku zastosowano model regresji logistycznej. W tym przypadku parametry wyznaczono metodą największej wiarygodności, a do oceny ich istotności użyto testu χ^2 .

4.2.1. Korelacja uszkodzeń z odpornością względną i krotnością eksploatacji

W badaniach zastosowano podział próby na grupy ze względu na zmienne niezależne. Na podstawie doświadczeń i wyników wstępnej analizy przyjęto, że cechami,

których wpływ na uszkodzenia należy ocenić, są: odporność względna O_w i krotność eksploatacji w . Dla każdej z grup określono częstość klasy uszkodzeń g_U o wartości 1, obliczoną według wzoru

$$g_U^{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^{N^{i,j}} U_n^{i,j}}{N^{i,j}} \quad (2)$$

gdzie:

$g_U^{i,j}$ – częstość uszkodzeń w grupie o i -tej odporności względnej i j -tej krotności eksploatacji,

$U_n^{i,j}$ – wartość zmiennej uszkodzenie w n -tej obserwacji,

$N^{i,j}$ – liczebność grupy o i -tej odporności względnej i j -tej krotności eksploatacji.

Badania zależności częstości uszkodzeń od odporności względnej i krotności eksploatacji wykazały istnienie korelacji bardzo wysokiej ($R = 0,8645$). Jednak na założonym poziomie istotności niemożliwe było przyjęcie oceny wyrazu wolnego. Po usunięciu z modelu tego parametru uzyskano następujące równanie regresji wielokrotnej

$$g_U = 0,151w - 0,092O_w \quad (3)$$

Poziom istotności modelu, wyznaczony przy użyciu testu F Fishera-Snedecora, jest znacznie mniejszy od krytycznego. Współczynnik korelacji wskazuje na korelację prawie pełną. Współczynnik determinacji świadczy o tym, że prawie 90% zmienności częstości uszkodzeń należy tłumaczyć zmiennością zmiennych niezależnych.

Błąd standardowy estymacji wyznaczonego modelu regresji wynosi 0,114. Jest to błąd częstości występowania uszkodzeń w grupie budynków, gdyż zmienną zależną jest cecha grupy.

Częstość uszkodzeń jest równoważna prawdopodobieństwu wystąpienia szkody. Do badań prawdopodobieństwa, że zmienna uszkodzenia przyjmie wartość 1 zastosowano model regresji logistycznej. Równanie modelu, wyznaczone na podstawie danych statystycznych, jest następujące

$$P(U=1|O_w, w) = \frac{e^{-2,498-0,581O_w+0,785w}}{1 + e^{-2,498-0,581O_w+0,785w}} \quad (4)$$

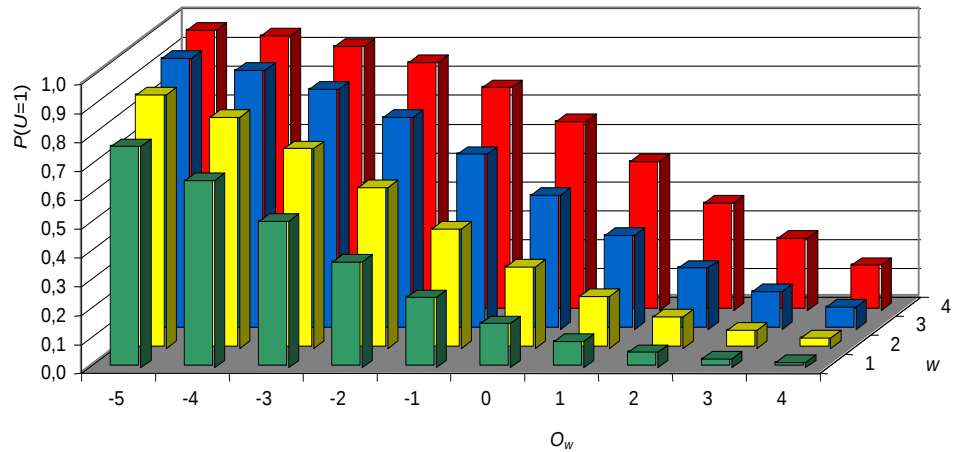
a modelu w postaci logitowej

$$\text{logit } P(U) = -2,498 - 0,581O_w + 0,785w \quad (5)$$

gdzie:

$P(U=1|O_w, w)$ – prawdopodobieństwo, że zmienna U przyjmie wartość 1 dla wartości zmiennych niezależnych O_w, w .

Model zilustrowano wykresem słupkowym (rys. 2). Test χ^2 wykazał, że na poziomie istotności 0,05 należy odrzucić hipotezę zerową, a prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez przyjęcie modelu jako reprezentatywnego dla populacji generalnej wynosi 0,0000. Na tym samym poziomie istotności uzyskano oceny wszystkich współczynników równania. Wyznaczony model regresji logistycznej wskazuje na to, że prawdopodobieństwo uszkodzenia budynku jest zależne równocześnie od dwóch zmiennych: odporności względnej i krotności eksploatacji. Przy czym wzrasta, gdy maleje odporność względna lub zwiększa się krotność eksploatacji.



Rys. 2. Zależność prawdopodobieństwa uszkodzenia budynku $P(U)$ od odporności względnej O_w i krotności eksploatacji w

Fig. 2. Dependence of probability of building damage $P(U)$ on the relative resistance O_w and multiplication factor of extraction w

Błąd standardowy estymacji modelu w postaci logitowej wynosi 2,616, natomiast błąd modelu logistycznego, wyznaczony z wzoru na wariancję funkcji dwóch zmiennych

$$\sigma^2(\hat{P}) = 6,846 \left(\frac{e^{\text{logit}\hat{P}}}{1 + e^{\text{logit}\hat{P}}} \right)^2 \quad (6)$$

4.2.2. Badanie korelacji kosztów usuwania szkód z odpornością względną, krotnością eksploatacji i kubaturą budynków

Badania zależności kosztów usuwania szkód od odporności względnej wykazały, że na założonym poziomie istotności nie można odrzucić hipotezy zerowej. Również niemożliwe było stwierdzenie istotnej korelacji kosztów usuwania szkód z krotnością eksploatacji.

Analiza rozkładu wartości obserwowanych kosztów względem kubatury wykazała, że ich rozrzut wzrasta wraz ze wzrostem kubatury. W związku z tym korelację tych

dwóch zmiennych badano w grupach budynków, utworzonych ze względu na ich wielkość. Najwyższy współczynnik korelacji rang Spearmana uzyskano dla budynków do 6000 m³. W tej grupie zmiany kosztów są w 31% tłumaczone zmianami kubatury.

Dla budynków do 6000 m³ otrzymano następujące równanie modelu regresji (rys. 3)

$$k = \exp(9,09294 + 0,335685 V) \quad (7)$$

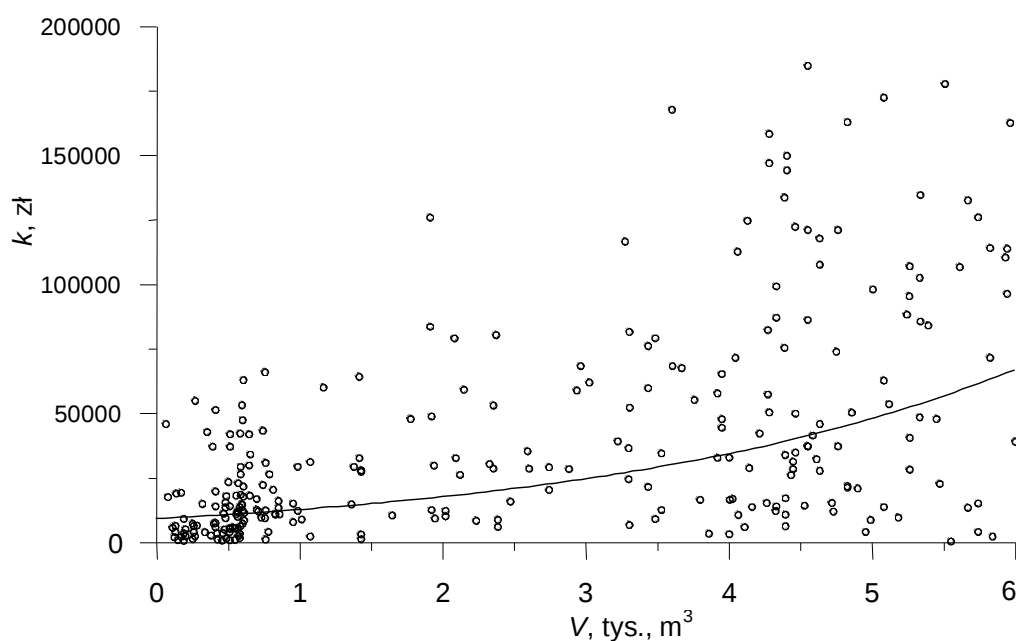
gdzie:

k – koszty usuwania szkód, zł,

V – kubatura, tys. m³.

Błąd standardowy estymacji tego modelu wynosi 1,07280, natomiast wariancja oszacowania $\sigma^2(\hat{k})$ jest proporcjonalna do wielkości kosztów

$$\sigma^2(\hat{k}) = 1,15090 \hat{k}^2 \quad (8)$$



Rys. 3. Model regresji zależności kosztów usuwania szkód (k) od kubatury (V)

Fig. 3. Model of regression dependence of damage removal costs (k) on the cubature (V)

Badania korelacji wielokrotnej kosztów usuwania szkód wskazały na ich istotną zależność od kubatury, ale nie pozwoliły na stwierdzenie wpływu odporności względnej i krotności eksploatacji na ich wysokość.

5. METODA PROGNOZOWANIA KOSZTÓW USUWANIA SZKÓD W BUDYNKACH NA TERENACH GÓRNICZYCH

5.1. Model probabilistyczny

W wyniku przeprowadzonych badań statystycznych wyznaczono empiryczne funkcje regresji prawdopodobieństwa uszkodzeń (wzór 4) i kosztów usuwania szkód (wzór 7), które umożliwiają budowę modelu probabilistycznego.

Iloczyn prawdopodobieństwa uszkodzenia i kosztów usuwania szkód pod warunkiem uszkodzenia można nazwać „kosztami prawdopodobnymi” k_p

$$k_p = \exp(9,09294 + 0,335685V) \frac{e^{-2,498-0,581O_w+0,785w}}{1 + e^{-2,498-0,581O_w+0,785w}} \quad (9)$$

Wartość prawdopodobna kosztów usuwania szkód k_p jest funkcją trzech zmiennych. Korzystając ze wzoru ogólnego na wariancję funkcji wielu zmiennych sformułowano zależność umożliwiającą obliczenie wariancji dowolnej przewidywanej wartości prawdopodobnego kosztu naprawy

$$\sigma^2((\hat{K}_p)_i) = \hat{P}_i^2 \sigma^2(\hat{K}_i) + \hat{K}_i^2 \sigma^2(\hat{P}_i^2) \quad (10)$$

gdzie:

- $(\hat{K}_p)_i$ – przewidywany prawdopodobny koszt naprawy i -tego budynku,
- $\hat{P}_i$ – przewidywane prawdopodobieństwo uszkodzenia i -tego budynku,
- $\hat{K}_i$ – przewidywany koszt naprawy i -tego budynku pod warunkiem jego uszkodzenia.

Zastosowanie wzoru 10 wymaga określenia wariancji dowolnych przewidywanych wartości kosztu $\hat{K}_i$ oraz prawdopodobieństwa $\hat{P}_i$.

Po wstawieniu wzoru (8) na wariancję oszacowania do wzoru ogólnego na błąd predykcji funkcji jednej zmiennej otrzymano

$$\sigma^2(\hat{K}_i) = \hat{k}_i^2 \left(1,15515 + \frac{(2,52335 - V_i)^2}{892,203} \right) \quad (11)$$

Wykorzystanie wzoru ogólnego na błąd predykcji funkcji dwóch zmiennych oraz wzoru (6) na wariancję oszacowania prawdopodobieństwa pozwoliło na sformułowanie wzorów na wariancję dowolnej przewidywanej wartości prawdopodobieństwa. Obliczone na ich podstawie błędy standardowe predykcji modelu zamieszczono obok prawdopodobieństwa uszkodzeń budynków w tablicy 1.

Tablica 1. Prawdopodobieństwo uszkodzenia budynku oraz jego wariancja i błąd standardowy predykcji

Krotność eksploatacji w	Odporność względna O_w	Prawdopodobieństwo uszkodzenia P	Wariancja prawdopodobieństwa $\sigma^2(P)$	Błąd standardowy prawdopodobieństwa $\sigma(P)$
1	-1	0,2438	0,2335	0,4832
	0	0,1528	0,1150	0,3391
	+1	0,0917	0,0476	0,2181
	+2	0,0535	0,0176	0,1326
2	-1	0,4142	0,4042	0,6358
	0	0,2835	0,2827	0,5317
	+1	0,1813	0,1509	0,3885
	+2	0,1102	0,0660	0,2569
3	-1	0,6080	0,3905	0,6249
	0	0,4646	0,4245	0,6515
	+1	0,3269	0,3320	0,5762
	+2	0,2137	0,1939	0,4403

5.2. Założenia metody

5.2.1. Zakres stosowania metody

Przedmiotem prognozy, przeprowadzonej przy zastosowaniu opracowanej metody, może być zabudowa mieszkaniowa spełniająca następujące warunki:

- budynki mają konstrukcję tradycyjną lub tradycyjną ulepszoną i ich kubatura nie przekracza 6 tys. m³,
- na powierzchni ujawniają się tylko bezpośrednie wpływy eksploatacji górniczej w formie deformacji ciągłych,
- źródłem przewidywanych szkód nie będą nachylenia powierzchni (metoda dotyczy oddziaływania odkształceń poziomych powierzchni na budynki),
- odporność względna jest zawarta w przedziale $\langle -1, +2 \rangle$,
- krotność eksploatacji jest nie wyższa niż 3.

Metoda może mieć zastosowanie tylko w takich przypadkach, gdy dysponuje się:

- danymi z inwentaryzacji budynków, przeprowadzonej metodą punktową,
- rozpoznaniem przebiegu eksploatacji dokonanej w analizowanym rejonie,
- wynikami prognozy deformacji powierzchni.

5.2.2. Algorytm prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach

Prognozowanie kosztów usuwania szkód według opracowanej metody składa się z następujących etapów:

I. Przygotowanie danych

Pierwszym etapem prognozowania jest przygotowanie następujących danych o budynkach:

- kubatura V , tys. m³,

- kategoria odporności budynku K_o , określona metodą punktową,
- prognozowane deformacje terenu, określone kategorią terenu górniczego K_t wyznaczoną z odkształceń poziomych,
- krotność eksploatacji w .

II. Obliczenie kosztów usuwania szkód

W celu obliczenia przewidywanych kosztów usuwania szkód w grupie n budynków, należy:

- określić prawdopodobieństwo uszkodzenia i -tego budynku P_i przy wykorzystaniu tablicy 1,
- obliczyć koszty usuwania szkód w i -tym budynku K_i , pod warunkiem ich wystąpienia, zgodnie ze wzorem (7),
- obliczyć prawdopodobne koszty usuwania szkód w i -tym budynku korzystając z zależności

$$(K_p)_i = K_i P_i \quad (12)$$

- zsumować przewidywane prawdopodobne koszty usuwania szkód we wszystkich budynkach.

III. Ocena dokładności prognozy

W celu wyznaczenia błędu standardowego prognozowanych sumarycznych kosztów, należy:

- określić wariancję przewidywanej wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia i -tego budynku $\sigma^2(P_i)$ przy wykorzystaniu tablicy 1,
- obliczyć wariancję przewidywanej wartości kosztów usuwania szkód w i -tym budynku, pod warunkiem ich wystąpienia, zgodnie ze wzorem (11),
- obliczyć wariancję przewidywanej wartości prawdopodobnych kosztów usuwania szkód w i -tym budynku wykorzystując wzór (10),
- obliczyć błąd standardowy przewidywanych sumarycznych kosztów usuwania szkód

$$\sigma^2 \sum_{i=1}^n (\hat{K}_p)_i = \sum_{i=1}^n \sigma^2 ((\hat{K}_p)_i) \quad (13)$$

- określić granice przedziału ufności kosztów usuwania szkód na założonym poziomie prawdopodobieństwa

$$\left(\sum_{i=1}^n (K_p)_i \right) - t\sigma \sum_{i=1}^n (K_p)_i < \sum_{i=1}^n (K_p)_i < \left(\sum_{i=1}^n (K_p)_i \right) + t\sigma \sum_{i=1}^n (K_p)_i \quad (14)$$

gdzie t jest wartością statystyki t Studenta dla założonego poziomu ufności.

IV. Przeliczenie wyników prognozy na ceny obecnie obowiązujące

W zaprezentowanym modelu kosztów usuwania szkód w budynkach uwzględniono ceny z 2000 roku. Dlatego też, wyznaczone przy jego zastosowaniu koszty remontów oraz błędy prognozy należy przeliczać na ceny aktualne.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Wielkość kosztów usuwania szkód ma charakter losowy. Jest to wynik realizacji pojedynczego zdarzenia, jakim jest oddziaływanie eksploatacji górniczej na budynek. Cechami tego zdarzenia o charakterze losowym są: kategoria terenu górniczego i kategoria odporności budynku.
2. Zastosowanie badań statystycznych pozwoliło na zbudowanie modelu probabilistycznego wartości prawdopodobnej kosztów usuwania szkód w budynku, która jest iloczynem prawdopodobieństwa uszkodzenia i kosztów naprawy. Prawdopodobieństwo uszkodzenia zależy od odporności względnej i krotności eksploatacji, natomiast koszty są zależne od kubatury.
3. Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadkach, gdy kategoria terenu górniczego od kategorii odporności budynku nie jest większa niż o 1 i nie mniejsza niż o 2 oraz od kategorii odporności budynku oraz krotność eksploatacji jest nie większa niż 3:
 - prawdopodobieństwo uszkodzenia budynku maleje ze wzrostem odporności względnej,
 - prawdopodobieństwo uszkodzenia budynku wzrasta ze wzrostem krotności eksploatacji,
 - na wartość kosztu usuwania szkody w budynku, pod warunkiem jego uszkodzenia, ma wpływ jego kubatura; im większy budynek, tym większy koszt jego naprawy.

Literatura

1. Kaszowska O.: *Metoda prognozowania kosztów usuwania szkód w budynkach na terenach górniczych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 2001 (praca doktorska).
2. Piwowarski W.: *Estymacja modeli regresji typu zagrożenie obiektów budowlanych a wskaźniki deformacji terenu górniczego*. Materiały konferencyjne. IV Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza 1997.
3. Popiołek E., Ostrowski J.: *Czynniki determinujące dokładność prognozy uszkodzeń obiektów budowlanych w obszarze wpływów eksploatacji górniczej*. Materiały konferencyjne. Second World Mining Environment Congress. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 1997.
4. Seidler A., Opalski J., Pacuła M., Szypuła H.: *Sposoby przewidywania i określania uszkodzeń górniczych w budynkach*. Materiały z Prac Rady. Państwowa Rada Górnictwa. Warszawa, Wydaw. Geologiczne 1965.
5. *Zależność kosztów usuwania szkód górniczych w obiektach kubaturowych od krotności eksploatacji górniczej*. Praca zbiorowa pod kierunkiem O. Kaszowskiej. Projekt Badawczy Własny 9 T12A 029 14. Dokumentacja Głównego Instytutu Górnictwa. Katowice 1998.

Recenzent: dr inż. Lucjan Muszyński

