

Rozwój metod prognozowania górniczych deformacji terenu. Część 1

JERZY CYGAN, LUCYNA FLORKOWSKA

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Poszukiwania skutecznych metod prognozowania górniczych deformacji terenu związane były z rozwojem górnictwa podziemnego na skalę przemysłową. Wynikały one bezpośrednio z konieczności ochrony najbardziej zurbanizowanych ośrodków przemysłowych przed szkodami wywołanymi działalnością wydobywczą. Rozwój badań naukowych nad zachowaniem się naruszonego eksploatacją górotworu miał i ma wymiar aplikacyjny. Zagadnienia te z jednej strony charakteryzują się znaczą (fizyczną i matematyczną) złożonością z drugiej zaś ich praktyczne zastosowanie pociąga za sobą poważne konsekwencje.

W pracy przedstawiony został rozwój naukowych metod predykcji wpływu podziemnej eksploatacji złóż. Metody te sformułowane były zarówno na gruncie matematycznych metod mechaniki ciała stałego, jak też z wykorzystaniem teorii ośrodków stochastycznych. Najlepiej zweryfikowane pomiarowo okazały się, jak dotychczas, metody podające geometryczno-całkowe zależności pomiędzy parametrami eksploatacji i parametrami deformacji powierzchni (mowa tu przede wszystkim o teorii Budryka-Knothego).

Rozwój numerycznych metod obliczeniowych przyniósł próby zastosowania ich również w rozwiązywaniu zagadnień związanych z oddziaływaniem górnictwa na stan masywu skalnego oraz powierzchni terenu. Postęp technologii informatycznej, pozwalający na prowadzenie zaawansowanych obliczeń, umożliwił wykorzystanie bardziej złożonych matematycznych opisów zachowania się górotworu. Dzięki temu możliwe stało się uwzględnienie właściwości plastycznych i reologicznych skał a także wyjście poza obszar mechaniki ośrodków ciągłych i wprowadzenie opisów kruchego niszczenia. Tworzone są także modele wykorzystujące właściwości sieci neuronowych. Część I artykułu przedstawia systematykę podziału oraz podstawy formalizmu opisu, na bazie wybranych metod prognozowania. Zagadnienia dotyczące wykorzystania nowoczesnych technik obliczeniowych zawarte zostały w II części artykułu.

Słowa kluczowe: górnicze deformacje powierzchni, deformacje górotworu, ochrona powierzchni terenu, szkody górnicze, eksploatacja górnicza, górnictwo podziemne

1. Wstęp

Potrzeba prognozowania deformacji terenu wywołanych eksploatacją podziemnych złóż surowców pojawiła się wraz z rozwojem górnictwa na skalę przemysłową. Dynamiczny boom tej gałęzi przemysłu nastąpił w czasie rewolucji przemysłowej wraz z industrializacją gospodarki i gwałtownym wzrostem zapotrzebowania na surowce. Wielkie zagłębia górnicze, do których należał także Górny Śląsk, stawały się jednocześnie obszarami o gęstej zabudowie, wyposażonymi w sieci infrastruktury technicznej i komunikacyjnej. Prowadzenie eksploatacji pokładów zalegających pod terenami zurbanizowanymi wymagało wdrożenia odpowiednich reżimów, zapewniających bezpieczeństwo obiektom budowlanym.

Profilaktyka zagrożeń wymagała skutecznych metod przewidywania, w jaki sposób planowana eksploatacja oddziaływać będzie na powierzchnię terenu. Podstawy prac nad opracowaniem tych metod stanowiły (jak to z reguły ma miejsce na zagadnieniach technicznych i inżynierskich) obserwacje. Rozwój górnictwa podziemnego, eksploatawanie coraz niżej zalegających pokładów i prowadzenie robót górniczych w już naruszonej górotworze stwarzały konieczność opracowania naukowo uzasadnionych i pomiarowo zweryfikowanych metod prognozowania.

Badania nad zagadnieniem ruchów górotworu wywołanych działalnością górniczą prowadzono w następujących kierunkach:

- pomiary przemieszczeń i odkształceń górotworu,
- konstruowanie modeli fizycznych,
- budowanie modeli matematycznych.

Rozwój badań w tym zakresie doprowadził do opracowania stosowanych po dziś dzień metod prognozowania górniczych deformacji terenu. Metody te są wciąż rozwijane i udoskonalane a dokonujące się z biegiem czasu zmiany warunków geologiczno-górniczych oraz metod prowadzenia wydobywania wymuszają poszukiwania nowych narzędzi umożliwiających prawidłową predykcję oddziaływań górniczych.

2. Charakterystyka metod modelowania wpływów eksploatacji

Badania naukowe prowadzone w wielu ośrodkach poskutkowały opracowaniem szeregu modeli matematycznych (zwanych często teoriami) opisujących wpływy eksploatacji podziemnej na powierzchnię i górotwór. Jedne podają tylko geometryczno-przestrzenne związki pomiędzy eksploatowanym pokładem i powstającą nad nim niecką osiadania, inne uwzględniają właściwości mechaniczne skał budujących poszczególne warstwy górotworu; jeszcze inne oparte są na metodach probabilistycznych (teoria ośrodka stochastycznego). Wszystkie modele wyznaczają z pewnym przybliżeniem rozkład oraz ekstremalne wartości wskaźników deformacji definiowanych jako wielkości opisujące wpływ eksploatacji na powierzchnię znajdującą się nad wyrobiskiem.

Ważną rolę w procesie kształtowania i weryfikacji modeli matematycznych, opisujących przebieg deformacji powstałych w wyniku eksploatacji, odegrały badania na modelach fizycznych. Choć podobieństwo modeli fizycznych do rzeczywistych warunków górotworu nie jest w pełni zadowalające, to wyniki uzyskane na modelach fizycznych, zwłaszcza zbudowanych z ośrodków sypkich (piasek, ballotina), pozwalają na potwierdzenie i wyjaśnienie pewnych nietypowych zjawisk zachodzących w górotworze. Ośrodkiem o znaczącym wkładzie naukowym w dziedzinie eksperymentów fizycznych był Instytut Mechaniki Górotworu PAN. Przeprowadzono tam szereg istotnych badań modelowych z zastosowaniem urządzenia z przesuwaną szczeliną wysypową [Cygan i in., 2004, 2007].

Teorie opisujące proces przemieszczeń i deformacji górotworu można zasadniczo podzielić na trzy grupy:

- geometryczno-całkowe – oparte na metodach całkowych, przyjmujących pewne założenia geometryczne,
- stochastyczne – traktujące górotwór jako ośrodek stochastyczny, podlegający prawom teorii prawdopodobieństwa,
- oparte na metodach mechaniki ciała stałego.

3. Postulaty teorii (modeli matematycznych)

Teorie opisujące przemieszczenia ośrodka skalnego pod wpływem eksploatacji górniczej muszą spełniać odpowiednie warunki (założenia), z których część przyjmuje się jako oczywiste, pozostałe powinny być potwierdzone eksperymentalnie pomiarami w terenie lub badaniami laboratoryjnymi.

Założenia takie sformułował w odniesieniu do ośrodka stochastycznego [Litwiniszyn, 1954] następująco:

- jednoznaczność (tranzytywność),
- zbieżność rozwiązania do warunku początkowego,
- zasada proporcjonalności (jednorodność),
- zasada superpozycji (addytywność),
- nieujemność rozwiązania.

Przyjmuje się, że powyższe warunki winny być spełnione także przez inne teorie opisujące rozważane zagadnienie.

W płaskim stanie odkształcenia, przyjmując prostokątny układ współrzędnych geometrycznych (x, z) , w którym x jest współrzędną poziomą, a z współrzędną pionową postulaty definiuje się następująco:

(1) Warunek jednoznaczności

$$w(x^3, z^3) = F[w(x^1, z^1), z^1, z^3] = F\{F[w(x^1, z^1), z^1, z^2], z^2, z^3\} \quad (1)$$

gdzie:

$w(x^i, z^i)$ – profil niecki na i -tym poziomie,

F – operator, za pomocą którego uzyskuje się funkcję opisującą profil niecki na wyższym poziomie, jeżeli znany jest profil niecki na poziomie niższym.

Warunek ten mówi, że jeśli mamy trzy różne poziomy I, II, III, z których pierwszy jest najniższy, a trzeci jest najwyższy to, przejście z poziomu I ma poziom III bezpośrednio daje taki sam wynik jak przejście najpierw z poziomu I na II a następnie na poziom III.

(2) Warunek zbieżności

$$\lim_{z^2 \rightarrow z^1} F[w(x^1, z^1), z^1, z^2] = w(x^1, z^1) \quad (2)$$

Warunek ten oznacza, iż gdy przechodzimy z poziomu II do poziomu I, to funkcja określająca nieckę na poziomie II zdąża do warunku, początkowego, czyli do funkcji określającej nieckę na poziomie wyjściowym I.

(3) Zasada jednorodności

$$F[n \cdot w(x^1, z^1), z^1, z^2] = n \{F[w(x^1, z^1), z^1, z^2]\} \quad (3)$$

Jeżeli niecka na poziomie wyjściowym I zostanie powiększona n -krotnie to również powiększy się wywołana przez nią niecka na poziomie końcowym II.

(4) Zasada superpozycji

$$\begin{aligned} & \{F[w^1(x^1, z^1) + w^2(x^1, z^1), z^1, z^2]\} = \\ & F[w^1(x^1, z^1), z^1, z^2] + F[w^2(x^1, z^1), z^1, z^2] \end{aligned} \quad (4)$$

Warunek ten oznacza, że jeżeli na poziomie I powstają dwie niecki, to spowodują one powstanie na poziomie II niecki, która będzie sumą niecek jakie spowodowałyby na poziomie wyższym (II) osobno niecki z poziomu niższego (I).

(5) Warunek nieujemności rozwiązania

$$w(x^1, z^1) \geq 0 \quad (5)$$

Warunek ten oznacza, że osiadania mają stale ten sam znak (brak wypiętrzeń).

4. Metody geometryczno-całkowe

Metody określane mianem geometryczno-całkowych oparte zostały na przyjęciu określonego rozkładu wpływów wybrania elementarnej objętości pokładu, a więc na pewnym założeniu geometrycznym. Każdemu punktowi wewnątrz górotworu przypisuje się pewną funkcję, określającą oddziaływanie wybranej objętości złoża o powierzchni jednostkowej na ten punkt, w zależności od położenia wybranej objętości względem rozpatrywanego punktu. Funkcję tę nazywa się funkcją wpływów. W przypadku zagadnienia płaskiego wyznacza ona tzw. *krzywą wpływów*, zaś dla zagadnienia przestrzennego wyznacza tzw. *powierzchnię wpływów*.

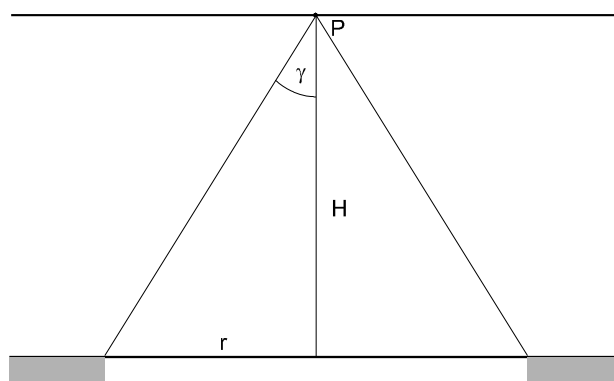
Rozważane zjawisko ruchów powierzchni jest opisywane w oparciu o cechy geometryczne, co prowadzi do zastosowania wzorów całkowych. Obszar całkowania jest rzutem eksploatowanego pokładu na powierzchnię poziomą. Wyrażeniem pod znakiem całki jest iloczyn funkcji określającej obniżenie stropu

w tym obszarze ($w_0(s)$) przez funkcję wpływów ($\varphi(x, s)$). W zagadnieniu dwuwymiarowym (profil niecki jest prostopadły do frontu eksploatacji), wzór opisujący osiadanie powierzchni [Popiołek, 1990] przyjmuje postać:

$$w(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} w_0(s) \varphi(x, s) ds \quad (6)$$

Jedną z pierwszych metod z tej rodziny była metoda Keinhorsta [Keinhorst, 1934] opracowana w 1928 roku. W tej metodzie, obszar w zasięgu wpływów eksploatacji dla danego punktu jest dzielony na dwie strefy w kształcie współśrodkowych kół, a powierzchnia koła wewnętrznego ma dwukrotnie intensywniejsze oddziaływanie na punkt niż pozostały obszar pierścienia, natomiast obszar poza kołem większym nie ma wpływu na ten punkt.

Następną była metoda Balsa [Bals, 1932] opublikowana w 1932 roku, stosowana również przez pewien czas w Polsce. Przyjęte zostało w niej założenie, że oddziaływanie wybrania danej objętości jest wprost proporcjonalne do grubości pokładu i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości punktu od wybranej objętości. Natomiast zasięg oddziaływania eksploatacji na punkt jest ograniczony do stożka, którego wierzchołek jest w rozważanym punkcie, a tworząca stożka jest nachylona do poziomu pod kątem zwanym zasięgiem wpływów (Rys. 1).



Rys. 1. Zasięg wpływów eksploatacji w metodzie Balsa ($r = H \operatorname{tg} \gamma$)

Opracowanych zostało wiele podobnych metod [Beyer, 1945; Sann, 1949 i inne], różniły się one między sobą intensywnością oddziaływania wybranej objętości pokładu na rozpatrywany punkt w zależności od położenia punktu względem tej objętości. Wszystkie te metody zakładały ograniczony zasięg oddziaływania wybranej objętości. Nieograniczony zakres wpływów eksploatacji został przyjęty w metodzie opracowanej przez Kochmańskiego [Kochmański, 1955].

5. Stochastyczne modele górotworu

Teorie prognozowania wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu i górotwór zakładają ciągłość przebiegu deformacji, od pewnego poziomu nad wyrobiskiem do powierzchni terenu. Wynika z tego, że wskaźniki deformacji powinny mieć ciągły i regularny przebieg. Jednak nie potwierdzają tego obserwacje [Popiołek, 1997], a w szczególności obserwacje wskaźników pochodnych od obniżen (nachylenia, krzywizny) oraz obserwacje przemieszczeń i odkształceń poziomych.

Obserwowane nieregularności procesu deformacji opisywane są poprzez inne niż deterministyczne modele górotworu. Pierwszym i równocześnie podstawowym modelem tej grupy jest stochastyczny model górotworu Litwiniszyna [Litwiniszyn, 1954, 1993]. Mimo tego, że opisywany jest w ostatecznej postaci funkcjami ciągłymi, to wyrażają one miejsce największego prawdopodobieństwa przebiegu wskaźników deformacji. Jest to zatem miejsce geometryczne najbardziej prawdopodobnych wartości danego wskaźnika deformacji.

Ideą, na której opiera się to podejście jest model losowo wędrującej cząstki. W rozważanym przypadku (w górotworze) losowo wędrującym elementem jest pustka powstająca po wybraniu elementu górotworu. W modelu tym przyjmuje się istnienie operatora liniowego, który dla zadanego warunku brzegowego

przemieszczeń na ustalonym poziomie wyznacza pole przemieszczeń na poziomie wyższym. Operator ten spełnia założenia postulaty (1)÷(5).

Model ten w prostokątnym układzie współrzędnych: $x^1, x^2, x^3 = z$ gdy oś z -tów skierowana jest pionowo do góry, opisany jest przez układ trzech różniczkowych równań liniowych dla składowych przemieszczeń górotworu w^1, w^2, w^3 :

$$\frac{\partial w^j}{\partial z} = K_m^{ijk} \frac{\partial^2 w^m}{\partial x^j \partial x^k} + M_m^{ij} \frac{\partial w^m}{\partial x^j} + N_m^j w^m \quad (7)$$

Szczególnym przypadkiem powyższego układu równań jest równanie dla płaskiego stanu przemieszczeń :

$$\frac{\partial w}{\partial z} = B \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + A \frac{\partial w}{\partial x} + Nw \quad \text{dla } B > 0 \quad (8)$$

Rozwiązaniem podstawowym tego równania jest:

$$\varphi(x, z) = (4\pi Bz)^{-\frac{1}{2}} + \exp \left\{ -\frac{(x + Az)^2}{4Bz} + Nz \right\} \quad (9)$$

Gdy $z = \text{const}$ rozwiązanie to jest obrazem krzywej Gaussa i opisuje tzw. *nieckę elementarną*.

W sposób odmienny (również oparty o metody probabilistyczne) tłumaczy zjawisko rozproszenia wskaźników deformacji model górotworu przyjęty przez Batkiewicza [Batkiewicza, 1971]. Przyjmuje on mianowicie, że górotwór jest ośrodkiem kruchym, w którym na całym przekroju nad eksploatacją istnieją szczeliny jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji. Podczas prowadzenia wybierania następuje przemieszczanie się bloków górotworu w kierunku wybranej przestrzeni, w konsekwencji zmieniają się relacje styku między nimi. W modelu przyjmuje się, że odkształcenie poziome (ściślej wydłużenie względne) wynika z sumy szczelin na określonym odcinku:

$$f(x, s) = w_{\max} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(x-s)^2} \quad (10)$$

przy czym:

- szerokość szczeliny s_i na ustalonym odcinku jest zmienną losową ciągłą o funkcji rozkładu prawdopodobieństwa $f(s)$ mającej parametry: m – wartość przeciętna, σ_s^2 – wariancja
- ilość szczelin I na odcinku o ustalonej długości l jest zmienną losową skokową o funkcji rozkładu prawdopodobieństwa $P(I = k)$ i parametrach: M – wartość przeciętna i σ_I^2 – wariancja
- zmienne losowe s i I są niezależne.

6. Model oparty na normalnym rozkładzie wpływów

Teoria przemieszczeń górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej oparta na normalnym rozkładzie wpływów została opracowana przez Knothe [Knothe, 1951, 1953] oraz rozszerzona (o przemieszczenia poziome) przez Budryka [Budryka 1953]. Chronologicznie zaliczana jest do teorii geometryczno-całkowych, jednak zastosowana w niej funkcja rozproszenia wpływów w postaci funkcji rozkładu normalnego (fundamentalnej funkcji teorii prawdopodobieństwa) powoduje, że zalicza się ją również do teorii stochastycznych [Popiołek, 1997].

W założeniach przyjmuje się jednorodność oraz nieściśliwość ośrodka w obszarze górotworu. Teoria ta spełnia postulaty (1)÷(5).

Funkcja wpływów dla punktu w płaskim stanie przemieszczeń ma postać:

$$f(x, s) = w_{\max} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(x-s)^2} \quad (11)$$

Wielkości deformacji terenu (nachylenia, odkształcenia poziome, krzywizny) wyznacza się jako odpowiednie pochodne funkcji przemieszczeń, uwzględniając założenie Awierszyna [Awierszyn, 1947] o proporcjonalności przemieszczeń poziomych do pierwszej pochodnej przemieszczeń pionowych w :

$$u = -B \frac{dw}{dx} \quad (12)$$

Wartość parametru B została wprowadzona przez Budryka [Budryk, 1953] początkowo jako:

$$B = \frac{r}{\sqrt{\pi}} \approx 0.564 r \quad (13)$$

gdzie r jest promieniem rozproszenia wpływów, następnie na podstawie danych pomiarowych została zmieniona na wartość:

$$B = \frac{r}{\sqrt{2\pi}} \approx 0.4 r \quad (14)$$

Równania teorii w płaskim stanie przemieszczeń są następujące:

- *Przemieszczenia pionowe:*

Przyjmując wybranie pokładu w granicach półpłaszczyzny (praktycznie oznacza to wybranie w obszarze dostatecznie dużym) profil niecki obniżeniowej określa równanie:

$$w(x) = \frac{w_{\max}}{r} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\pi \lambda^2}{r^2}} d\lambda \quad (15)$$

- *Nachylenie terenu:*

Nachylenie terenu w brzeżnej części profilu niecki otrzymuje się jako pierwszą pochodną przemieszczeń pionowych $\frac{dw}{dx}$

$$T(x) = -w_{\max} \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (16)$$

- *Krzywizna:*

Krzywiznę profilu niecki określa wzór:

$$K(x) = \frac{\frac{d^2 w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

Uwzględniając, że mianownik jest bliski 1, można z wystarczającą dla praktyki dokładnością przyjąć:

$$K(x) \approx \frac{d^2 w}{dx^2} = w_{\max} \frac{2\pi}{r^2} x e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (18)$$

- *Przemieszczenia poziome:*

Uwzględniając założenie zapisane równaniem (12) oraz wartość współczynnika B określoną wzorem (14) otrzymuje się rozkład przemieszczeń poziomych w postaci:

$$u(x) = w_{\max} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad [\text{m}] \quad (19)$$

- *Odkształcenia poziome:*

Odkształcenia poziome opisuje równanie:

$$\varepsilon(x) = \frac{du}{dx} = w_{\max} \frac{\sqrt{2\pi}}{r^2} x e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad [\text{m}] \quad (20)$$

7. Historyczne metody oparte na założeniach mechaniki ośrodków ciągłych

Teorie oparte na metodach mechaniki ośrodków ciągłych traktują najczęściej górotwór jako ośrodek liniowo-sprężysty, rozpatrując ugięcia nadległych warstw jako ugięcie belki na podłożu, ugięcie płyty itp. Mają one tę przewagę nad metodami geometrycznymi, że umożliwiają rozpatrywanie nie tylko pól odkształceń, ale również pól naprężeń. W odniesieniu do przemieszczeń wzory są bardziej skomplikowane i trudniejsze do stosowania niż w metodach geometrycznych.

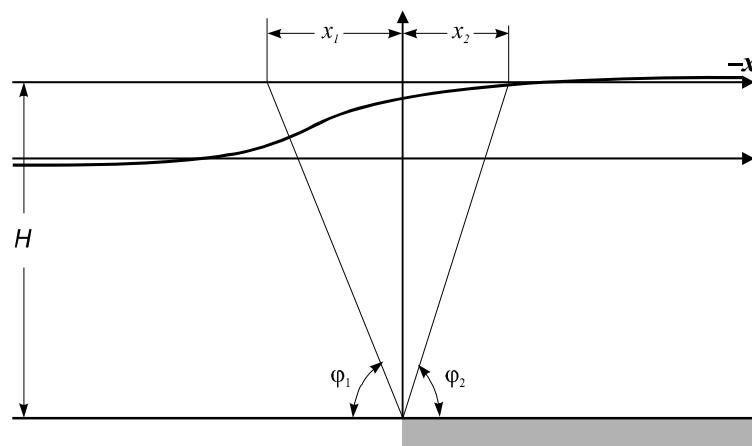
Klasycznym przykładem metody z tej grupy jest model Sałustowicza [Sałustowicz, 1954], w którym autor przyjmując podstawowe założenia teorii sprężystości i wytrzymałości materiałów (jednorodność, izotropowość, liniową sprężystość) rozważa płytę spoczywającą na sprężystym podłożu i poddaną zgięciu na krawędzi eksploatacji. Traktując zagadnienie jako płaskie Sałustowicz zastosował teorię ugięcia belki na sprężystym podłożu. Sprężystym podłożem jest z jednej strony calizna a z drugiej spąg wybranego pokładu.

Równanie linii ugięcia belki ma postać równania różniczkowego:

$$EI \frac{d^2 w'}{dx^2} = -M \quad (21)$$

gdzie:

- M – moment zginający w danym przekroju współrzędnej x ,
- I – moment bezwładności przekroju nadkładu,
- $E = \frac{E'}{1-\nu^2}$ – przy czym E' jest modułem Younga skały, a ν liczbą Poissona,
- w' – obniżenie nadkładu w danym przekroju.



Rys. 7.1. Linia profilu brzeżnej części niecki osiadania w modelu zakładającym ugięcie warstwy na sprężystym podłożu

Inny przykład metody opartej na mechanice ośrodków ciągłych stanowi model sprężysto-lepki Drzeźli [Drzeźla, 1995], w którym autor zakłada, że deformująca się warstwa górotworu nad pokładem jest ciałem o właściwościach reologicznych, o znanej sprężystości i lepkości. Związek pomiędzy odkształceniami i naprężeniami opisuje równanie różniczkowe:

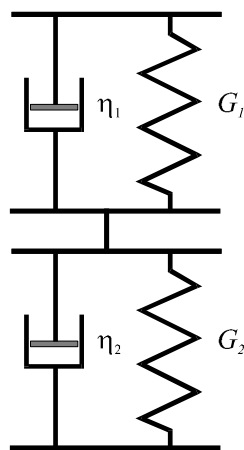
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{E}{\eta} \right) \sigma(t) = \left[(E_{\infty} + E) \frac{\partial}{\partial t} + \frac{E_{\infty} E}{\eta} \right] \sigma(t) \quad (22)$$

gdzie:

- ε, σ – odpowiednio odkształcenie i naprężenie,
- E_{∞}, E – moduły sprężystości składowych modelu,
- t – czas,
- η – współczynnik lepkości,

$$\frac{\eta}{E} = T \quad \text{– czas relaksacji.}$$

Jeszcze innym przykładem metody wykorzystującej reologiczne właściwości górotworu jest przyjęty przez Kwiatka [Kwiatek, 2000] dwuelementowy, szeregowy model Kelvina (Rys. 7.2) opisujący proces pełzania górotworu. Zastosowanie ciągłej więzi lepkiej wynika z tego, że proces deformacji nie zachodzi natychmiastowo, a przyjęcie ciągłej więzi sprężystej oznacza, że obniżenia mają wartość skończoną. Przez dobór wartości parametrów (η_i, G_i) oraz liczby elementów modelu można odpowiednio kształtować przebieg obniżeń powierzchni w czasie.



Rys. 7.2. Dwuelementowy szeregowy model Kelvina

Modele oparte na założeniach mechaniki ośrodków ciągłych umożliwiają uwzględnienie właściwości sprężystych, lepkich, kruchych i plastycznych, skał budujących górotwór. Pozwala to zarówno na konstruowanie modeli reologicznych jak również symulację procesów dynamicznych szybkiego rozchodzenia się zaburzeń przez warstwy górotworu. Duża zmienność struktury górotworu wymusza pewne ograniczenia poprzez uśrednienie parametrów skał tworzących warstwy górotworu.

8. Podsumowanie

Prawidłowe określenie zakresu, charakteru i wielkości oddziaływania eksploatacji złóż na powierzchnię terenu ma bardzo poważne znaczenie dla tej gałęzi przemysłu. Stanowi podstawę określenia metod zapobiegania szkodom, zarówno w zakresie profilaktyki górniczej, jak i budowlanej. Wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami charakteryzującymi prowadzenie robót górniczych a wielkością i zasięgiem deformacji powierzchni terenu umożliwia takie prowadzenie eksploatacji, które ogranicza niekorzystny jej wpływ na górotwór. Znajomość tych zależności pozwala także na optymalizację konstruowania obiektów budowlanych pod kątem bezpiecznego przenoszenia oddziaływań górniczych. Z powyższych powodów badania naukowe i oparte na nich metody prognozowania wpływu eksploatacji były i pozostają bardzo istotne.

Przedstawiony w pracy przegląd naukowych metod opisu procesów deformowania się górotworu pod wpływem wybierania złoża ukazuje odmienność matematycznych podejść do rozwiązania tych złożonych zagadnień. Prace te stanowiły podstawę opracowania stosowanych obecnie metod prognozowania i profilaktyki. Jednakże rozwój przemysłu wydobywczego stawia wciąż nowe wyzwania w zakresie bezpieczeństwa powierzchni i zabudowy. Zmieniające się warunki geotechniczne eksploatacji i metody prowadzenia wydobycia wymagają dostosowania metod prognozowania do nowych realiów. Rozwój metod matematycznych i technologii informatycznych otwiera drogi innowacyjnych rozwiązań w tym zakresie. Druga część artykułu poświęcona zostanie przedstawieniu nowoczesnych metod obliczeniowych stosowanych w prognozowaniu wpływu eksploatacji górniczej na górotwór, powierzchnię terenu i obiekty budowlane.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych 2016 realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Awierszyn S.G., 1947: *Sdwiżenie gornych porod pri podziemnych razrabotkach*. Ugletiechizad.
- Bals R., 1931/32: *Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen*. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, t 42-43.
- Batkiewicz W., 1971: *Odchylenia standardowe poeksploatacyjnych deformacji górotworu*. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, Geodezja, nr 10, Kraków.
- Beyer F., 1945: *Über die Vorausbestimmung der beim Abbau flachgelagerter Flöze auftretenden Bodenverformungen*. Berlin.
- Budryk W., 1953: *Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1.
- Cygan J., 2004. Leśniak J., Walaszczyk J.: Wykorzystanie badań modelowych na ośrodku sytkim pionowo niejednorodnym do analizy kształtowania się przemieszczeń w brzeżnej części niecki osiadania. Prace IMG PAN
- Cygan J., 2007. Florkowska L., Leśniak J., Walaszczyk J.: *Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D*. Prace IMG PAN
- Drzęźła B., 1995: *Przybliżona ocena niektórych parametrów kinematyki niecki osiadania przy zmianach prędkości wybierania i postojach ścian*. Przegląd Górniczy, z. 9, Katowice.
- Keinhorst H., 1934: *Betrachtungen zur Bergschädenfrage*. Glückauf, s. 149.
- Kochmański T., 1955: *Calkowa teoria ruchów górotworu nad eksploatacją złoża pokładowego na podstawie pomiarów geodezyjnych*. Geodezja i Kartografia, t. 4, z. 2.
- Kwiatek J., 2000: *Zastosowanie modelu ciała Kelvina do opisu nieustalonej niecki osiadania*. Konf. nauk.-techn. „Przemysł wydobywczy na przełomie XX i XXI stulecia”, AGH, Kraków.
- Litwiniszyn J., 1954: *Przemieszczenia górotworu w świetle teorii prawdopodobieństwa*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 2, z. 1.
- Litwiniszyn J., 1993: *Teorie wpływu eksploatacji na powierzchnię wczoraj, dziś jutro*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Mat. Konf.
- Knothe St., 1951: *Wpływ podziemnej eksploatacji na powierzchnię z punktu widzenia zabezpieczenia położonych na niej obiektów*. Praca doktorska niepublikowana, Biblioteka AGH, Kraków.
- Knothe St., 1953: *Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1.
- Popiołek E., Greń K., 1990: *Wpływ eksploatacji górniczej na powierzchnię i górotwór*. Skrypt uczelniany nr 1179, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Popiołek E. i in., 1997: *Losowość pogórnich deformacji terenu i odporność obiektów powierzchniowych w świetle wyników pomiarów geodezyjnych i obserwacji budowlanych oraz jej wpływ na wiarygodność prognoz górniczych*. Projekt badawczy KBN, Kraków.
- Sałustowicz A., 1954: *Profil niecki osiadania jako ugięcie warstwy na sprężystym podłożu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 2, z. 1.
- Sann B., 1949: *Betrachtungen zur Vorausberechnung von Bodesenkungen infolge Kohlenabbaus*. Bergbau-Rundschau, t. 1.

Development of prediction methods for mining area deformation

Abstract

The search for effective methods of forecasting mining ground deformation were associated with the development of underground mining on an industrial scale. They resulted directly from the need to protect the most urbanized industrial centers against damage caused by mining activities. Research into the behavior of the rock mass, which has been disturbed by the exploitation was and is of application. These issues are on the one hand characterized by a mean (physical and mathematical) complexity on the other hand their practical application involves serious consequences.

In this work the development of scientific methods for predicting the impact of underground mining has been presented. These methods were both formulated on the basis of mathematical methods of solid mechanics, as well as using the theory of stochastic media. The best verified by measurements proved, so far, the method of giving the geometric integral relationship between the operating parameters and parameters of surface deformation (we are talking mainly about the Budryk-Knothe theory). The development of numerical calculation methods brought attempts to apply them also in solving issues related to the impact of mining on the state of the rock mass and surface of land. The progress of information technology, which allows for advanced calculations, enables the use of more complex mathematical description of the behavior of the rock mass. This made it possible to include plastic and rheological properties of the rocks and go beyond the area of continuum mechanics and the use brittle damage descriptions. Models using the properties of neural networks are also created. Issues relating to the use of modern computational techniques were included in the second part of this article

Keywords: mining surface deformation, deformation of the rock mass, protection of land surface, mining damage, mining exploitation, underground mining