

Jolanta KOWALSKA - KWIATEK
Politechnika Śląska, Gliwice

PROPOZYCJA OPISU OSIADANIA TERENU GÓRNICZEGO W CZASIE

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób opisu obniżenia terenu górnictwa w czasie z zastosowaniem funkcji czasu, stanowiącej analogię do modelu utworzonego przez szeregowe połączenie dwóch reologicznych modeli Kelvina i elementu sprężystego. Omówiono własności tych wzorów. Wskazano na możliwość poprawy opisu niepełnych, niustalonych niecek obniżeniowych, przez uwzględnienie zmiennego, zależnego od rozmiarów eksploatacji, obniżenia stropu do przestrzeni zrobów, w sposób zaproponowany w pracy M. Pomykła [13]. Podano, sposób wyznaczenia parametrów proponowanej funkcji czasu w oparciu o pomiary geodezyjne.

THE PROPOSAL OF DESCRIPTION OF MINING AREA SUBSIDENCE OVER TIME

Summary. The paper presents the way of description of mining area subsidence over time applying the time function which parallels the model created by a series connection of two rheological Kelvin models and the spring element. The properties of these formulas were shown. The articles focus on the possibility of improve the description of incomplete transient subsidence troughs with the way of the variable, dependent on the size of exploitation, roof subsidence to the surface of abandoned workings proposed by M. Pomykła [13]. The method of suggested time function parameters based on geodesic measurements was described.

1. Wprowadzenie

Podziemna eksploatacja górnictwa powoduje naruszenie pierwotnego stanu równowagi wewnątrz górotworu. Pusta przestrzeń po wybranym złożu zostaje wypełniona przez przemieszczające się skały otaczającego masywu skalnego. W wyniku ruchów górotworu dochodzi do licznych deformacji, ujawniających się na powierzchni terenu górnictwa najczęściej w postaci niecek obniżeniowych.

Praktycznie prawie wszystkie polskie rozwiązania, opisujące obniżenia terenu górniczego w czasie, bazują na równaniu różniczkowym S. Knothego [8], opierającym się na założeniu, że prędkość ujawniania obniżeń jest proporcjonalna do parametru c oraz do różnicy pomiędzy obniżeniem $w(t)$ - zaistniałym w chwili t a obniżeniem $w_k(t)$ - potencjalnie możliwym w chwili t , czyli takim, jakie by wystąpiło, gdyby proces obniżenia przebiegał bez opóźnienia w czasie. Wzór (1.1) stanowi jedną z form rozwiązania równania różniczkowego S. Knothego:

$$w(t) = - \int_0^t \frac{dw_k(\tau)}{d\tau} [1 - \exp(-c(t-\tau))] d\tau \quad (1.1)$$

W literaturze często pokazywana jest szczególna postać równania (1.2), które uzyskamy przyjmując w (1.1) $\tau=0$. Odpowiada to teoretycznemu przypadkowi eksploatacji, zrealizowanej w sposób natychmiastowy:

$$w(t) = w_k \cdot (1 - \exp(-ct)) \quad (1.2)$$

Czas τ to czas wyeksploatowania elementu powierzchni pola dS , które potencjalnie (gdyby obniżenie przebiegało bez opóźnienia w czasie) powoduje w chwili τ przyrost obniżenia dw_k . Wielkość dw_k obliczana jest w oparciu o wzory teorii geometryczno - całkowych. Najczęściej jest to wzór S. Knothego lub jego modyfikacja.

Występująca we wzorze (1.1) lub (1.2) funkcja $[1 - \exp(-c(t-\tau))] = f(t-\tau)$ lub odpowiednio $[1 - \exp(-ct)] = f(t)$ bywa nazywana funkcją czasu.

Liczne modyfikacje wzoru (1.1), wykonywane przez różnych badaczy, polegały na ogół na przyjmowaniu różnych postaci wzoru określającego funkcję $f(t)$, jak również różnych postaci funkcji wpływów, w oparciu o które można obliczyć przyrost dw_k .

Do najbardziej aktualnych prac z tego zakresu należą prace J. Białka [1], [2], P. Gruchlika [6], R. Hejmanowskiego [7], J. Kwiatka [11], A. Kowalskiego [9], P. Strzałkowskiego [16], R. Ściagały [17], M. Kruczkowskiego [10].

Generalnie w oparciu o uzyskane rozwiązania (zakładając niezmiennosc parametrów w czasie) można uzyskać dobry opis ustalonych (końcowych) stanów deformacji dla pełnych i niepełnych niecek obniżeniowych, jak również dosyć dobry opis nieustalonych niecek obniżeniowych, gdy wybiegi pól ścianowych są dostatecznie duże. Natomiast dla małych wybiegów ścian obliczone obniżenia w rejonie rozruchu ściany są zawsze znacznie większe od obserwowanych.

Zdaniem autorów główną przyczyną znacznych rozbieżności pomiędzy opisem i obserwacją obniżeń w czasie, szczególnie dla małych wybiegów, może być przyjmowane

założenie, że cały strop nad przestrzenią zrobów osiąga finalnie obniżenie:
 $w_{s \max} = -ag = \text{constans}$.

Liczne obserwacje in situ oraz symulacje komputerowe wykonane metodą elementów skończonych wyraźnie wskazują, że, szczególnie w przypadku małych rozmiarów eksploatacji, założenie: $w_{s \max} = -ag = \text{constans}$ nie może być spełnione i dlatego proponuje się zastosowanie do obliczeń wielkości dw_k , wzorów uwzględniających zmienne obniżenie stropu, zależne od rozmiarów wyeksploatowanego pola ścianowego oraz położenie względem granic pola wybierania, w sposób podany przez M. Pomykoła [13].

Niniejsza praca stanowi zatem kontynuację publikacji [4], w której zaproponowano postać funkcji pozwalającej na opis nieustalonych deformacji terenu z uwzględnieniem zmiennego obniżenia stropu do przestrzeni wybranej. Skupiono się w niej na omówieniu własności proponowanych wzorów i sposobu wyznaczenia parametrów występujących w tych wzorach, w oparciu o wyniki obserwacji geodezyjnych prowadzonych w rejonach wpływów eksploatacji górniczej.

2. Postać funkcji opisującej obniżenia z uwzględnieniem czynnika czasu

Jak to pokazuje wzór (1.1), dla obliczenia obniżeń musimy dysponować możliwością poprawnego opisu obniżeń potencjalnie możliwych $w_k(t)$ oraz znać postać i wartość parametrów funkcji $f(t)$, opisującej przebieg obniżenia w czasie.

2.1. Opis potencjalnie możliwych obniżeń w_k

Zgodnie z przyjętą tezą mówiącą, że opis obniżeń niepełnych niecek obniżeniowych jest możliwy jedynie wtedy, gdy uwzględnimy zmienność obniżenia stropu do przestrzeni wybranej, przyjęto, za M. Pomykołem [13], że obniżenie to zmienia się liniowo wraz z odległością l_p od krawędzi eksploatacji, by w odległości l_s osiągnąć wartość maksymalną $w_s = -ag$.

Formalny opis powierzchni obniżenia stropu przyjmuje wówczas następującą postać:

$$w_s(\xi, \eta, z=0) = \begin{cases} -ag & \text{dla } l_p(\xi, \eta) > l_s \wedge \xi, \eta \in S \\ -ag \cdot [1 + (l_p(\xi, \eta) - l_s) / l_s] & \text{dla } l_s \leq l_p(\xi, \eta) \leq 0 \wedge \xi, \eta \in S, \\ 0 & \text{dla } \xi, \eta \notin S \end{cases} \quad (2.1)$$

gdzie:

$l_p(\xi, \eta)$ – odległość od granicy pola eksploatacji S punktu o współrzędnych ξ, η , leżącego w stropie pokładu.

Do obliczenia osiadania punktu P , leżącego na powierzchni terenu górniczego, bez uwzględnienia opóźnienia w czasie można wykorzystać funkcję wpływów S . Knothego. Potencjalnie możliwe obniżenia punktu obliczeniowego o współrzędnych x, y przedstawia wzór (2.2):

$$W_k(x, y, S(t)) = \iint_{S(t)} \frac{w_s(\xi, \eta, 0)}{r'^2} e^{-\pi \left(\frac{l_{ds}}{r'}\right)^2} dS, \quad (2.2)$$

gdzie:

$W_k(x, y, S(t))$ – obniżenie punktu obliczeniowego na powierzchni o współrzędnych x, y .

Zakładając, że powierzchnia wybranego pola S jest funkcją czasu $S(t)$, obniżenia

$W_k(x, y, S(t))$ są wówczas również funkcją czasu.

ξ, η – współrzędne elementu powierzchni dS ,

r' – skorygowany promień zasięgu wpływów głównych [13],

$w_s(\xi, \eta, 0)$ – obniżenie stropu obliczone wzorem (2.1),

l_{ds} – odległość punktu obliczeniowego od elementu dS .

Wartość całki (2.2) można obliczyć w sposób numeryczny, stosując istniejące programy komputerowe [1].

2.2. Opis obniżeń w czasie

W pracy [4] do opisu propagacji w czasie potencjalnie możliwych obniżeń zaproponowano następującą funkcję czasu $f(t)$:

$$f(t) = 1 - a_1 e^{-c_1(t)} - a_2 e^{-c_2(t)}, \quad (2.3)$$

gdzie

a_1, a_2, c_1, c_2 – parametry funkcji wyznaczone z obserwacji.

Powyższy funkcja czasu opisuje proces obniżeń w czasie, analogicznie jak to czynią modele reologiczne.

Dla $a_2=0 \wedge a_1=1$ wzór (2.3) stanowi analogię do modelu Kelvina [3],[8].

Dla $a_2=0 \wedge a_1<1$ wzór (2.3) stanowi analogię do modelu Zenera [18].

Dla $a_2>0 \wedge a_1>0 \wedge a_2 + a_1=1$ wzór (2.3) stanowi analogię do połączonych szeregowo dwóch elementów modelu Kelvina [6], [9], [11].

Dla $a_2 > 0 \wedge a_1 > 0 \wedge a_2 + a_1 < 1$ wzór (2.3) stanowi analogię do połączonych szeregowo dwóch elementów modelu Kelvina i elementu sprężystego [4].

Parametry a_1, a_2, c_1, c_2 przy odpowiednim doborze mogą opisywać trzy różne sposoby ujawniania się obniżen w czasie.

1. **Wpływy ujawniane w sposób natychmiastowy** zanikają natychmiast po zatrzymaniu eksploatacji. Jeśli przyjąć, że 1 to całość wpływów, to wartość $1 - a_1 - a_2$ odpowiada wpływom ujawnianym w sposób natychmiastowy.

2. **Wpływy zasadnicze ujawniające się niedużym opóźnieniem czasowym**, które jednak dosyć szybko zanikają po oddaleniu się frontu eksploatacji na odległość równą w przybliżeniu $2r$. We wzorze (2.3) opisywane są parametrami a_1, c_1 .

3. **Wpływy długotrwałe** występujące jeszcze bardzo długo po zakończeniu eksploatacji. We wzorze (2.3) opisywane są za pomocą parametrów a_2, c_2 .

Stosując we wzorze (1.1) funkcję czasu (2.3) oraz wielkość $\frac{dW_k(\tau)}{d\tau}$ obliczoną w oparciu o wzór (2.2), otrzymujemy ostateczną postać wzoru (2.4) opisującego obniżenia w czasie:

$$W(t) = \int_0^t \frac{dW_k(\tau)}{d\tau} [1 - a_1 e^{-c_1(t-\tau)} - a_2 e^{-c_2(t-\tau)}] d\tau, \quad (2.4)$$

gdzie

$dW_k(\tau)$ - wielkość obniżenia spowodowana wyeksploatowaniem elementu powierzchni parceli dS w chwili τ .

3. Sposób wyznaczenia parametrów proponowanej funkcji

Dysponując wynikami pomiarów obniżen punktów linii obserwacyjnej w czasie, wykonywanych cyklicznie od momentu rozpoczęcia eksploatacji górniczego do chwili całkowitego uspokojenia się wpływów, można wyznaczyć wartości parametrów a_1, a_2, c_1, c_2 funkcji (2.3) oraz parametrów $a, tg\beta, l_s$ opisujących ustalone (końcowe) stany deformacji. Łącznie mamy 7 parametrów, których wartości można by wyznaczać jednocześnie. Kierując się wskazówkami zawartymi w pracy J. Białka [2] przyjęto jednak zasadę, że w pierwszej kolejności, w oparciu o pomiary obrazujące końcowe obniżenia pełnej niecki obniżeniowej, wyznaczone zostaną parametry $a, tg\beta, l_s$ wzoru (2.2), a następnie, w oparciu

o pomiary obrazujące rozwój obniżeń w czasie tej samej niecki obniżeniowej, wyznaczone zostaną wartości parametrów a_1, a_2, c_1, c_2 funkcji czasu (2.3).

W pierwszej kolejności należy jednak wyznaczyć parametry, charakteryzujące ustalone stany deformacji. Ich dobór można przeprowadzić wykorzystując dotychczas opracowane programy komputerowe.

3.1. Wyznaczanie parametrów charakteryzujących ustalone deformacje terenu

Wartości parametrów $a, tg\beta, l_s$ uzależnione są od warunków geologiczno – górnicych panujących w górotworze. Do ich określenia niezbędne są wyniki obserwacji geodezyjnych, dotyczące ustalonego procesu deformacji.

Jak pokazano w pracy [13], dla pełnych niecek obniżeniowych zachodzi zależność:

$$l_s = 2d, \quad (3.1)$$

gdzie d – wartość obrzeża eksploatacyjnego.

Do wyznaczenia parametrów $a, tg\beta, l_s$ można posłużyć się programem EDBJT [2], który wyznacza je na podstawie danych opisujących geometrię pól wybierania, danych o położeniu punktów linii obserwacyjnych nad eksploatowanym pokładem oraz wyników pomiarów wartości obniżeń tych punktów. W programie tym jako kryterium dopasowania przyjęto minimum funkcji B_1 , określonej wzorem (3.2):

$$B_1(a, tg\beta, d) = \sum_{i=1}^n [aW_{ki}(tg\beta, d) - W_{pi}]^2, \quad (3.2)$$

gdzie:

n – liczba punktów pomiarowych,

$aW_{ki}(tg\beta, d)$ – teoretyczne obniżenie i – tego punktu,

W_{pi} – pomierzone obniżenie i – tego punktu.

Program szuka minimalnej wartości sumy kwadratów odchyłeń obniżeń pomierzonych i obliczonych dla poszczególnych punktów linii pomiarowej. Jako statystyczne miary dopasowania przyjmuje się odchylenie standardowe i współczynnik korelacji. Z uwagi na stosowanie wzoru (3.1), wyniki pomiarów powinny w przybliżeniu obrazować pełne ustalone niecki obniżeniowe.

3.2. Parametry charakteryzujące deformacje w czasie

Wyznaczenie parametrów a_1, a_2, c_1, c_2 równania (2.3) umożliwiają wyniki pomiarów obniżeń punktów, wykonywane w niewielkich interwałach czasowych. Wartości te można

wyznaczyć na podstawie minimum wariancji resztkowej pomiędzy obniżeniami praktycznymi a teoretycznymi dla poszczególnych punktów linii pomiarowej, zgodnie ze wzorem (3.3):

$$B_2(a_1, a_2, c_1, c_2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [W_{ij}(a_1, a_2, c_1, c_2, tg\beta, a, d) - W_{pij}]^2, \quad (3.3)$$

gdzie:

n – ilość punktów pomiarowych,

m – ilość cykli pomiarowych,

$a, tg\beta, d$ – wyznaczone parametry ustalonej niecki obniżeniowej,

W_{ij} – teoretyczna wielkość obniżenia i -tego punktu pomiarowego w j -tym cyklu pomiarowym,

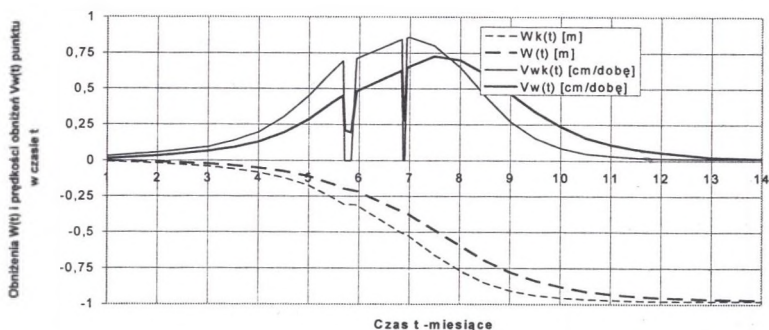
W_{pij} – pomierzona wielkość obniżenia.

Program pozwala na arbitralne narzucenie wartości dowolnie wybranych parametrów i wyznaczanie pozostałych.

W tym ogólnym przypadku można próbować jednocześnie wyznaczyć wszystkie 4 poszukiwane wartości parametrów. Poczynione próby wskazały jednak, że dla 4 jednocześnie wyznaczanych parametrów, ich wartości cechuje bardzo duża zmienność, zależna od wielu czynników losowych. Dlatego też, zdaniem autorki, należy wyznaczać te parametry grupując je w odrębne grupy, kierując się własnościami funkcji czasu (2.3), omówionymi w rozdziale 2.2.

Wyrażenie $1-a_1-a_2$, odpowiada elementowi sprężystemu w modelu i określa część wpływów przebiegających w sposób natychmiastowy. Opisuje deformacje ujawniane na powierzchni w krótkim przedziale czasu, w stosunku do czasu trwania eksploatacji pojedynczej parceli, tj. od kilku godzin do kilku dni od chwili wyeksploatowania elementarnej objętości złoża. Prędkość narastania tej części obniżeń ma charakter skokowy.

Wartość czynnika $1-a_1-a_2$ w obniżeniach całkowitych można oszacować na podstawie zmian prędkości obniżeń, spowodowanych zatrzymaniem i ponownym uruchomieniem eksploatacji ścianowej. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy rozkład obniżeń $W_k(t)$ i prędkości obniżeń $V_{wk}(t)$ punktu w czasie, obliczonych bez uwzględnienia opóźnienia czasowego ujawnianych wpływów (linie cienkie) oraz obniżeń $W(t)$ i prędkości obniżeń $V_w(t)$ obliczonych z uwzględnieniem opóźnienia czasowego ujawnianych wpływów.



Rys. 1. Wpływ zatrzymania frontu eksploacyjnego na obniżenia i prędkości obniżenia punktu w czasie
 Fig. 1. Influence of mining front stoppage on the subsidence and on the subsidence rates of the point in time

Z przedstawionego na rysunku 1 przykładu wynika, że udział obniżenia ujawniających się w sposób natychmiastowy może być znaczny, przekraczający nawet 40% do 60%.

Zakładając, że parametry a_2 , c_2 opisują długotrwałe wpływy, możliwe do zaobserwowania po zakończeniu eksploatacji, możliwość ich wyznaczenia będzie warunkowana dostępnością wyników odpowiednich pomiarów. Z istniejących doświadczeń wynika, że udział tych wpływów we wpływach całkowitych będzie się mieścił w przedziale od 0 do 10% ($a_2 < 0,1$). Będą to wpływy wolno ujawniane, więc należy oczekiwać, że parametr c_2 będzie miał małe wartości $c_2 < 1$ [1/rok].

Pozostaje zatem oszacowanie wartości parametrów a_1 i c_1 . Są to parametry opisujące ujawnianie się w czasie zasadniczej części wpływów, występujących w trakcie przechodzenia frontu ścianowego pod obiektem. Wpływy te ujawniają się dosyć szybko. Należy więc, spodziewać się znacznych wartości parametru c_1 . Analiza literatury wskazuje, że wartość tego parametru zależy od bardzo wielu czynników, szczególnie od własności reologicznych skał górotworu.

Wstępnie oszacowane wartości parametru a_2 oraz wartości wyrażenia $1 - a_1 - a_2$ pozwalają na przybliżone oszacowanie wartości parametru a_1 na poziomie ok. 0,4 do 0,6.

4. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano postać funkcji pozwalającej na opis nieustalonych deformacji terenu górnictwa, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości opisu w czasie niepełnych niecek obniżeniowych. Opisano własności zaproponowanej funkcji czasu. Przedstawiono

sposób wyznaczenia jej parametrów w oparciu o obserwacje geodezyjne i wstępnie oszacowano możliwy zakres wartości tych parametrów.

LITERATURA

1. Białek J.: Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
2. Białek J.: Opis nieustalonej fazy obniżen terenu górniczego z uwzględnieniem asymetrii wpływów końcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo z. 194, Gliwice 1991.
3. Białek J.: Wpływ prędkości frontu ścianowego na profil niecki obniżeniowej w modelu górotworu traktowanym jako ciało Kelvina i w modelu opisywanym równaniem różniczkowym S. Knothe. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo z. 254, Gliwice 2002.
4. Białek J., Kowalska – Kwiatek J.: Sposób opisu nieustalonych niecek obniżeniowych przy uwzględnieniu liniowego kształtu ugięcia stropu do przestrzeni wybranej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo z. 270, Gliwice 2005.
5. Białek J., Pomykoł M.: Wpływ kształtu linii ugięcia stropu na deformacje powierzchni. Materiały konferencji nt.: „Ochrona środowiska na terenach górniczych”, Szczryk 2004.
6. Gruchlik P.: Zastosowanie modeli reologicznych do opisu nieustalonych deformacji powierzchni. Praca doktorska niepublikowana, Katowice 2003.
7. Hejmanowski R.: Czasoprzestrzenny opis deformacji górotworu wywołanych filarowo – komorową eksploatacją złoża pokładowego. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, rozprawy monografie nr 131, Kraków 2004.
8. Knothe S.: Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t. I, z.1, 1953.
9. Kowalski A.: Weryfikacja funkcji czasu i jej parametrów na podstawie nowych pomiarów nieustalonych obniżen powierzchni. Przegląd Górniczy nr 6/2004.
10. Kruczkowski M.: Wpływ dużego postępu frontu i przerw w eksploatacji na rozkład deformacji na powierzchni. Praca doktorska niepublikowana, Gliwice 2006.
11. Kwiatek J.: O reologicznych aspektach zagrożenia obiektów budowlanych na terenach górniczych. Prace Naukowe GIG nr 827, Katowice 1998.
12. Litwiniszyn J.: Time space process in stochastic media. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Ser. Sci. Techniques, Vol. VI, no 1, 1958.
13. Pomykoł M.: Sposób opisu deformacji niepełnych niecek obniżeniowych. Praca doktorska niepublikowana, Gliwice 2003.
14. Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
15. Skinderowicz B.: Wpływ czasu na kształtowanie się dynamicznych niecek osiadania. Praca GIG, Komunikat nr 666, Katowice 1974.
16. Strzałkowski P.: Model nieustalonych przemieszczeń pionowych górotworu w obszarze objętym oddziaływaniem eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 237, Gliwice 1998.
17. Ściagała R.: Przemieszczenia i odkształcenia poziome terenu górniczego w funkcji czasu. Praca doktorska niepublikowana, Gliwice 1999.

18. Wesołowski M.: Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i oddziaływania eksploatacji na obiekty. Praca doktorska niepublikowana, Gliwice 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Zorychta