

Jan BIAŁEK, Jolanta KOWALSKA-KWIATEK
Politechnika Śląska, Gliwice

SPOSÓB OPISU NIEUSTALONYCH NIECEK OBNIŻENIOWYCH PRZY UWZGLĘDNIENIU LINIOWEGO KSZTAŁTU UGIĘCIA STROPU DO PRZESTRZENI WYBRANEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób opisu deformacji terenu (na przykładzie obniżeń) dla stanów nieustalonych przy zastosowaniu warunku brzegowego w postaci funkcji liniowej opisującej przemieszczenie stropu do przestrzeni wybranej pod wpływem eksploatacji górniczej. Dokonano również porównania praktycznych (uzyskanych na podstawie pomiarów) i teoretycznych (obliczonych programem komputerowym) kształtów niecek obniżeniowych.

DESCRIPTION METHOD OF NONSTATIONARY SUBSIDENCE TROUGHES WITH THE LINEAR SHAPE OF ROOF YIELD TO THE EXCAVATED AREA TAKEN INTO CONSIDERATION

Summary. The paper presents the deformation method of ground deformation (basing on the subsidence data) for nonstationary states, with the application of boundary condition in the form of a linear function describing the displacement of roof to the excavated area in effect of mining works. It compares also the practical (obtained from the measurements) and theoretical (calculated with a computer program) shapes of subsidence troughs.

1. Wstęp

Skutkiem prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej jest powstawanie na powierzchni terenu między innymi deformacji ciągłych. Powszechnie stosowane teorie ruchów górotworu umożliwiają najczęściej wyznaczanie wskaźników deformacji po czasie nieskończenie długim od chwili zakończenia eksploatacji górniczej. Jest to opis procesu w stanie asymptotycznym. Uwzględnienie wpływu czynnika czasu staje się konieczne ze względu na liczne zagrożenia, jakie stanowią pośrednie stany deformacji. Osiadanie

poszczególnych punktów w czasie prowadzi w konsekwencji do tworzenia się tzw. nieustalonych niecek obniżeniowych.

Podstawy teoretyczne opisujące dynamikę zjawiska podali m.in.: S. Knothe [6], J. Litwiniszyn [8], B. Skinderowicz [11]. Do nowszych prac dotyczących opisu nieustalonych niecek obniżeniowych należą prace: J. Białka [1], R. Hejmanowskiego [5], P. Gruchlika [4], J. Kwiatka [7], W. Piwowarskiego [9], A. Sroki [12], P. Strzałkowskiego [13], R. Ścigały [14]. W większości wymienionych prac stosowano opis wpływów końcowych wykorzystując teorie geometryczno-całkowe, natomiast do opisu obniżenia w czasie było stosowane rozwiązanie wynikające z równania różniczkowego S. Knothe [6] z licznymi późniejszymi modyfikacjami.

W efekcie uzyskiwano dobre opisy nieustalonych niecek obniżeniowych dla przypadków, gdy wybiegi pól ścianowych osiągnęły znaczne rozmiary w porównaniu z głębokością eksploatacji. W literaturze jednak najczęściej pomijany był etap tworzenia się niecki obniżeniowej w fazie rozruchu, gdy wybieg ściany jest mały w porównaniu z głębokością eksploatacji. Stan taki wynika z obserwowanej niezgodności proponowanych opisów z wynikami obserwacji.

Przyczyną znacznych błędów opisu nieustalonych niepełnych niecek obniżeniowych autorzy upatrują w niedoskonałości opisu ustalonych niepełnych niecek obniżeniowych, gdzie przyjmuje się mocno upraszczające założenie, że strop do przestrzeni wybranej przemieszcza się na kształt funkcji progowej Heaviside'a.

Uwzględnienie w opisie obniżenia kształtu ugięcia stropu bardziej zbliżonego do rzeczywistości może w znacznym stopniu przyczynić się do poprawy opisu deformacji nieustalonych niecek obniżeniowych we wszystkich etapach ich rozwoju, tzn. również w początkowej fazie ich kształtowania, gdy rozmiary wybranej powierzchni pokładu są małe w porównaniu z głębokością eksploatacji.

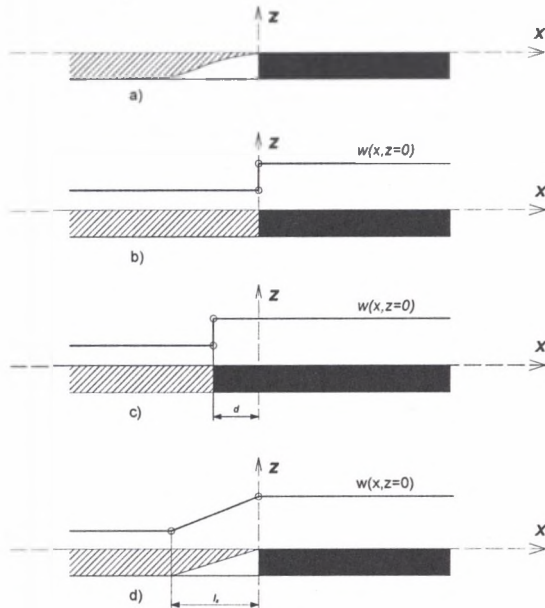
W niniejszym artykule przedstawiona zostanie propozycja sposobu opisu nieustalonych obniżenia powierzchni terenu spowodowanych eksploatacją ściany, przy uwzględnieniu opisu ugięcia stropu opisanego przez J. Białka [2], M. Pomykoła [10].

2. Podstawy teoretyczne zastosowanego sposobu opisu obniżenia powierzchni

2.1. Opis wpływów końcowych z uwzględnieniem zmodyfikowanego warunku brzegowego

Badania potwierdzają, że obniżenie stropu podczas eksploatacji ściany rozpoczyna się przed jej czołem. Pokład zostaje ściśnięty i następuje zmniejszenie jego grubości. Za ścianą strop obniża się dalej do pewnej odległości l_r od krawędzi eksploatacji, po przekroczeniu której osiąga wartość maksymalną. Ze względu na bardzo małe wartości ugięcia nad calizną węglową w stosunku do miąższości pokładu oraz skomplikowany kształt krzywej opisującej rzeczywiste przemieszczanie stropu do przestrzeni wybranej, uzasadnionym staje się przyjęcie za autorami prac [2], [10] funkcji liniowej w postaci:

$$w(x, z=0) = \begin{cases} -ag & \text{dla } x < -l_r \\ -ag \cdot (-x)/l_r & \text{dla } -l_r \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{dla } x > 0 \end{cases} \quad (1)$$



Rys. 1. Kształt linii ugięcia stropu przyjmowany do obliczeń: a) rzeczywisty kształt, b) funkcja Heaviside'a, c) funkcja Heaviside'a z obrzeżem, d) funkcja liniowa

Fig. 1. Shape of the roof yield line assumed for calculations: a) real shape, b) Heaviside function, c) Heaviside function with a rim, d) linear function

Dla przypadku przestrzennego opis powierzchni ugięcia stropu przedstawia się następująco:

$$, \eta, z = 0) = \begin{cases} -ag & \text{dla } l_p(\xi, \eta) > l_s \wedge \xi, \eta \in S \\ -ag \cdot [1 + (l_p(\xi, \eta) - l_s) / l_s] & \text{dla } l_s \leq l_p(\xi, \eta) \leq 0 \wedge \xi, \eta \in S \\ 0 & \text{dla } \xi, \eta \notin S \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

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

Jeśli do obliczania obniżeń zastosować funkcję wpływów S . Knothego, to po uwzględnieniu zmodyfikowanego opisu obniżeń stropu, obniżenia powierzchni terenu górniczego bez uwzględnienia opóźnienia w czasie można obliczyć ze wzoru:

$$W_k(x, y, S(t)) = \iint_{S(t)} \frac{w(\xi, \eta, 0)}{r'^2} e^{-\pi \left(\frac{l_d}{r'}\right)^2} dS \quad (3)$$

gdzie:

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

Jest to obniżenie liczone bez uwzględnienia opóźnienia wpływów w czasie. Jeśli uznać, że powierzchnia wybranego pola S jest funkcją czasu $S(t)$, to obniżenia $W_k(x, y, S(t))$ są również funkcją czasu.

ξ, η – współrzędne elementu powierzchni dS ,

r' – skorygowany promień zasięgu wpływów głównych (patrz wzór (5)),

$w(\xi, \eta, 0)$ – obniżenie stropu obliczone zgodnie z wzorem (2),

l_d – odległość punktu obliczeniowego od elementu dS .

Wartość całki (3) dla pola o kształcie wieloboku można obliczyć przy zastosowaniu jednej z metod numerycznych, np. dwuwymiarowej metody Simpsona.

W pracach [2, 10] pokazano, że stosując wzór (3) do opisu ustalonych niecek obniżeniowych można uzyskać bardzo dobre opisy zarówno pełnych, jak i niepełnych niecek obniżeniowych przy zachowaniu warunku niezmienności parametrów teorii wpływów.

2.2. Proponowany sposób opisu opóźnienia czasowego ujawnianych obniżeń

W niniejszej pracy proponuje się zastosowanie bardzo ogólnego modelu opisu propagacji obniżeń w czasie:

$$dW(t) = dW_k(\tau) [1 - a_1 e^{-c_1(t-\tau)} - a_2 e^{-c_2(t-\tau)}] \quad (4)$$

gdzie:

$dW_k(\tau)$ – obliczona wzorem (3) wielkość obniżenia spowodowana wyeksploatowaniem elementu powierzchni parceli dS w chwili τ ,

$dW(t)$ – wielkość obniżenia w chwili t wskutek wyeksploatowania elementu powierzchni parceli dS w chwili τ ,

a_1, a_2, c_1, c_2 – parametry modelu wyznaczane z obserwacji.

Powyższy wzór stanowi pewną analogię do modeli reologicznych. Można tu tylko mówić o analogii, gdyż modele reologiczne podają zależność w czasie pomiędzy składowymi tensora – naprężeniem i odkształceniem, natomiast wzór (4) opisuje przebieg przyrostu obniżenia w czasie.

Dla $a_2=0 \wedge a_1=1$ wzór (4) stanowi analogię do modelu Kelvina [3, 6, 12].

Dla $a_2=0 \wedge a_1<1$ wzór (4) stanowi analogię do modelu Zenera [14].

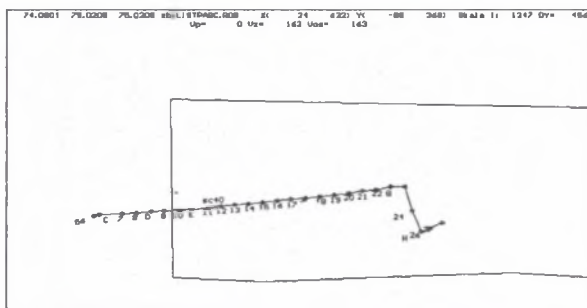
Dla $a_2>0 \wedge a_1>0 \wedge a_2 + a_1=1$ wzór (4) stanowi analogię do połączonych szeregowo dwóch elementów modelu Kelvina [4, 7].

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

Wzory (3) i (4) stanowią podstawę zaproponowanego opisu obniżeń nieustalonych niecek obniżeniowych.

3. Porównanie obniżeń pomierzonych i obliczonych teoretycznie

W celu przedstawienia możliwości aproksymacyjnych zaproponowanego modelu opisu nieustalonych niecek obniżeniowych dokonano porównania wielkości teoretycznych z wielkościami obniżeń punktów linii obserwacyjnej KWK Dębieńsko, położonej nad ścianą nr 40 w pokładzie 326/5 (rys. 2). Linię tę opisał J. Zych w pracy [16].



Rys. 2. Usytuowanie punktów linii pomiarowej względem eksploatowanej ściany 40 w pokładzie 326/5
 Fig. 2. Location of measurement line points with respect to the excavated longwall 40 at the seam 326/5

Rozpatrywana ściana była eksploatowana na głębokości ok. 150 m. W przedziale czasu od 1974-08-01 do 1974-10-20 ściana 40 osiągnęła wybieg ok. 159 m. Wysokość furty eksploatacyjnej wynosiła 1,4 m. Pomiaru niwelacyjne na linii obserwacyjnej wykonywano cyklicznie w odstępach 10-dniowych. Symulacje nieustalanej niecki obniżeniowej przeprowadzone zostały dla 6 wybranych cykli pomiarowych odpowiadających wstępnej fazie rozwoju eksploatacji, przypadających na następujące dni:

1. 30-08-1974,
2. 11-09-1974,
3. 20-09-1974,
4. 01-10-1974,
5. 10-10-1974,
6. 20-10-1974.

Zastosowano trzy różne sposoby opisu obniżenia stropu:

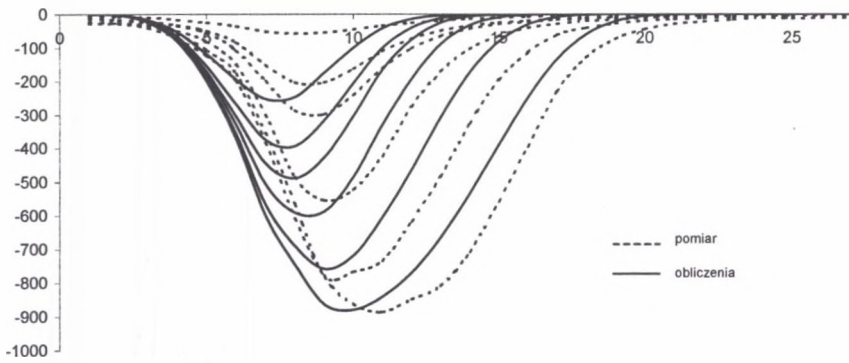
1. Opis klasyczny – krawędź eksploatacji jest tożsama z krawędzią parceli obliczeniowej (obrzeże $d=0$) (rys. 3).
2. Opis klasyczny z uwzględnieniem obrzeża eksploatacyjnego $d>0$ (rys. 4).
3. Opis z uwzględnieniem linii ugięcia stropu $l_s>0$ (rys. 5).

Dla sposobu 1 i 2 parametry niecki ustalonej dobrano dopasowując wyniki obserwacji 20 cyklu pomiarowego na odcinku od 1 do 20 punktu pomiarowego.

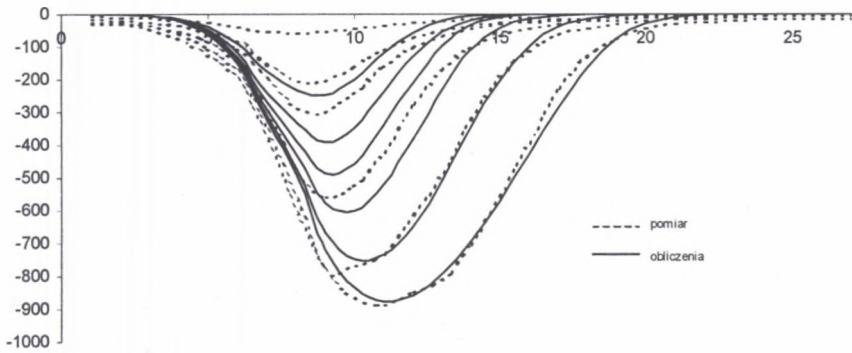
Stosując 3 sposób opisu obniżenia uwzględniający linię ugięcia stropu, dla zachowania takich samych maksymalnych nachyleń ustalonej niecki obniżeniowej, jak w opisie klasycznym z zastosowaniem obrzeża, konieczne jest przyjęcie do obliczeń wzorem (3) skróconego promienia rozproszenia wpływów r' . Skrócenie to zależy od stosunku długości linii ugięcia stropu l_s do nieskorygowanej długości promienia rozproszenia wpływów r . Wartość r' obliczono opierając się na zależności (5) podanej w pracy [10]:

$$r' = r \cdot f(l_s / r) = r \cdot (1 - 0,17(l_s / r)^2 - 0,04(l_s / r)) \quad (5)$$

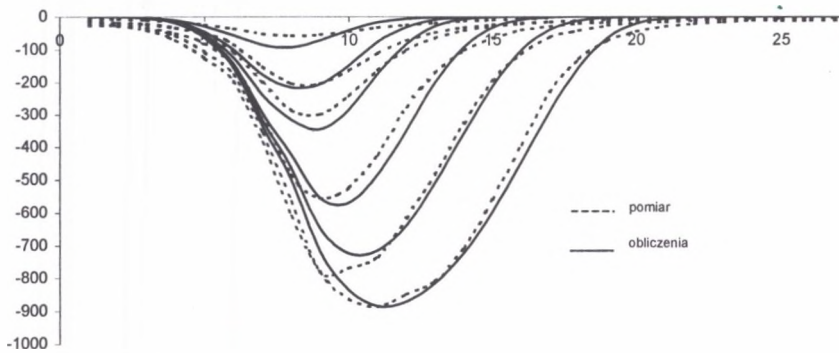
Obliczenia przeprowadzono dla przypadku, gdy wartości parametrów zastosowanego modelu wynoszą odpowiednio: $a_2=0$, $a_1=1$. Wyniki dopasowania zilustrowano poniżej przedstawionymi wykresami:



Rys. 3. Profile niecek pomierzonych i obliczonych – opis klasyczny ($d=0$)
 Fig. 3. Profiles of measured and calculated troughs – classical description ($d=0$).



Rys. 4. Profile niecek pomierzonych i obliczonych – opis klasyczny uwzględniający obrzeże $d>0$
 Fig. 4. Profiles of measured and calculated troughs – classical description allowing for the rim $d>0$



Rys. 5. Profile niecek pomierzonych i obliczonych – opis uwzględniający linię ugięcia stropu $l_s>0$
 Fig. 5. Profiles of measured and calculated troughs – description allowing for the roof yield line $l_s>0$

Analiza wyników symulacji numerycznych pokazanych w formie wykresów na rys. 3, 4, 5 pozwala stwierdzić, że stosowanie klasycznego opisu deformacji, nieuwzględniającego wielkości obrzeża eksploatacyjnego, powoduje bardzo duże rozbieżności pomiędzy praktycznymi i teoretycznymi nieckami obniżeniowymi. Duże rozbieżności dotyczą zarówno pełnych, jak i niepełnych niecek obniżeniowych.

Znaczną poprawę opisu profili obserwuje się, gdy krawędź eksploatacji zostaje przesunięta o wielkość obrzeża $d=0,5l_s$ w stronę zrobów. W początkowej fazie eksploatacji występują duże odstępstwa profilu teoretycznego od pomierzonego. Dla kolejnych cykli pomiarowych, gdy wzrastają rozmiary zrobów, opis obniżeń staje się coraz bardziej zgodny z obserwacją.

Metoda 3, uwzględniająca kształt ugięcia stropu bardziej zbliżony do rzeczywistego, najlepiej opisuje przebieg procesu obniżeń zarówno we wstępnej, jak i późniejszej fazie eksploatacji.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule przedstawiono nowy sposób opisu obniżeń nieustalonych niecek obniżeniowych. Poprawę opisu niecek dynamicznych uzyskano stosując rezultaty prac [2], [10] dające zasadniczą poprawę ustalonych niecek obniżeniowych oraz przez zaproponowaną rozbudowę modelu opisu obniżeń w czasie.

Analiza literatury oraz wykonane przez autorów symulacje komputerowe pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Przyjęcie za pracami [2], [10] tezy, że kształt linii osiadania stropu od krawędzi eksploatacyjnej do miejsca styku stropu ze spągami można opisać linią prostą, prowadzi do spójnego opisu zarówno pełnych, jak i niepełnych ustalonych niecek obniżeniowych.
- W pracy zaproponowano bardzo uniwersalny model opisu ujawniania się obniżeń w czasie. Model ten (wzór (4)) w zależności od dobru parametrów może stanowić analogię reologicznych modeli Kelvina, Zenera, szeregowego połączenia dwóch modeli Kelvina oraz szeregowego połączenia dwóch modeli Kelvina i elementu sprężystego.
- Dla pokazania wpływu zastosowania zmodyfikowanego warunku brzegowego do opisu nieustalonych niecek obniżeniowych wykonano trzema metodami dopasowanie profili teoretycznych do wyników obserwacji na linii obserwacyjnej założonej nad pokładem

326/5 KWK Dębieńsko. Wyniki obliczeń potwierdziły możliwość znacznego polepszenia jednoczesnego opisu pełnych i niepełnych dynamicznych niecek obniżeniowych proponowanym przez autorów sposobem.

LITERATURA

1. Białek J.: Opis nieustalonej fazy obniżeń terenu górniczego z uwzględnieniem asymetrii wpływów końcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z. 194, Gliwice 1991.
2. Białek J., Pomykoł M.: Wpływ kształtu linii ugięcia stropu na deformacje powierzchni. Materiały konferencji nt.: „Ochrona środowiska na terenach górniczych”, Szczyrk 2004.
3. Drzęzła B.: Przybliżona ocena niektórych parametrów kinematyki niecki osiadania przy zmianach prędkości wybierania i postojach ścian. Przegląd Górniczy nr 9, 1995.
4. Gruchlik P.: Zastosowanie modeli reologicznych do opisu nieustalonych deformacji powierzchni. Praca doktorska niepublikowana. Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
5. Hejmanowski R.: Czasoprzestrzenny opis deformacji górotworu wywołanych filarowo-komorową eksploatacją złoża pokładowego. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, rozprawy monografie nr 131, Kraków 2004.
6. Knothe S.: Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t. I, z.1, 1953.
7. Kwiatek J.: Reologiczny opis nieustalonej niecki obniżeniowej. Materiały VI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Ustroń, 25–27 czerwca 2001.
8. Litwiniszyn J.: Time space process in stochastic media. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Ser. Sci. Techniques, Vol. VI, no 1, 1958.
9. Piwowarski W.: Opis przemieszczeń pionowych aktywnego procesu deformacji górotworu w warunkach eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH, s. Geodezja z. 106, Kraków 1989.
10. Pomykoł M.: Sposób opisu deformacji niepełnych niecek obniżeniowych. Praca doktorska niepublikowana. Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
11. Skinderowicz B.: Wpływ czasu na kształtowanie się dynamicznych niecek osiadania. Praca GIG, Komunikat nr 666, Katowice 1974.
12. Sroka A.: Wpływ postępu frontu eksploatacji górniczej na kształtowanie się wskaźników deformacji górotworu. Praca doktorska, AGH, Kraków 1974.
13. Strzałkowski P.: Model nieustalonych przemieszczeń pionowych górotworu w obszarze objętym oddziaływaniem eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 237, Gliwice 1998.
14. Ściagała R.: Przemieszczenia i odkształcenia poziome terenu górniczego w funkcji czasu. Praca doktorska niepublikowana. Politechnika Śląska 1999.
15. Trojanowski K. : Określenie wartości czasowych osiadań powierzchni i górotworu. Praca habilitacyjna, GIG, Katowice 1966.
16. Zych J.: Analiza wpływu prędkości postępu frontu na wielkość deformacji na podstawie wyników pomiarów z kopalni „Dębieńsko”. Mat. konferencji nt. „Wpływ prędkości eksploatacji na ochronę obiektów na powierzchni”. Komisja Ochrony Terenów Górniczych PAN, Katowice 1978.

17. Zych J.: Metoda prognozowania wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu uwzględniająca asymetryczny przebieg procesu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 164, Gliwice 1987.

Recenzent: Dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski