

Roman ŚCIGAŁA

Politechnika Śląska, Gliwice

Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni

KOMPLEKSOWA IDENTYFIKACJA WSPÓLCZYNNIKA PRĘDKOŚCI OSIADANIA DLA WARUNKÓW JEDNEJ Z KOPALŃ GZW

Streszczenie. W artykule przedstawiono praktyczny przykład identyfikacji wartości współczynnika prędkości osiadania na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych obniżeń według zaproponowanej przez autora metodyki [7], polegającej na jednoczesnym wyznaczaniu wartości tego parametru zarówno w przestrzeni współrzędnych geometrycznych, jak i współrzędnej czasowej. Prezentowany przykład oparto na wynikach pomiarów geodezyjnych z terenu jednej z kopalń GZW.

A COMPREHENSIVE IDENTIFICATION OF SUBSIDENCE RATE COEFFICIENT FOR ONE OF UPPER SILESIAN COAL MINES CONDITIONS

Summary. The practical example of determination of subsidence rate coefficient on the basis of geodetic measurements results has been presented in this paper. The presented example bases on the Author's proposal of parameter "c" identification methodology by simultaneous best fit searching in the space and time coordinates. In identification procedure, the geodetic measurements results were used from one of Upper Silesia Basin coal mines.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie identyfikacji parametrów teorii prognozowania wpływów należy do bardzo istotnych zadań w procesie prognozowania deformacji górotworu i powierzchni. W zależności od rodzaju wykonywanych prognoz wyznaczenie parametrów może dotyczyć stanu ustalonego (tzw. niecka asymptotyczna) lub też dodatkowo stanu nieustalonego. W większości przypadków wyznacza się parametry tylko na podstawie niecki asymptotycznej z uwagi na zdecydowanie lepszą dostępność odpowiednich wyników pomiarów.

Stąd nierzadko pomniejsza się rolę wykonywania prognoz deformacji w fazie nieustalonej, co należy uznać za działanie niewłaściwe, gdyż właśnie w fazie aktywnych ruchów górotworu występuje największe zagrożenie dla obiektów zlokalizowanych zarówno w górotworze, jak i na powierzchni.

W polskim górnictwie najszerze zastosowanie do prognozowania deformacji w stanach nieustalonych znalazł model zaproponowany przez S. Knothego [2]. W modelu tym parametrem decydującym o charakterystyce rozkładu deformacji w jego nieustalonej fazie jest tzw. współczynnik prędkości osiadania – c (więcej informacji na temat tego rozwiązania przedstawiono w następnym punkcie). Bardzo istotnym zagadnieniem jest prawidłowy dobór wartości parametru c do prognoz, w praktyce realizowany różnymi metodami na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych. Dwie współcześnie stosowane metody pozwalają na wyznaczenie wartości c na podstawie profili niecek dynamicznych, uzyskanych w kolejnych cyklach pomiarowych lub na podstawie przebiegu osiadania w czasie pojedynczych punktów obserwacyjnych. W obydwu przypadkach otrzymuje się wiele wartości parametru c , które zazwyczaj w końcowym efekcie uśrednia się dla celów wykonania prognozy wpływów.

W opracowanej przez autora metodyce proponuje się inne podejście, a mianowicie jednoczesne wykorzystanie wyników pomiarów zarówno w kolejnych cyklach pomiarowych (czyli z uwzględnieniem zmienności obniżen w czasie), jak i dla wszystkich punktów (z uwzględnieniem zmienności obniżen w przestrzeni współrzędnych geometrycznych). Pierwsze wyniki prac w tym zakresie prezentowane były w [7].

2. Identyfikacja współczynnika prędkości osiadania w świetle literatury

Najpopularniejszy w Polsce model S. Knothego [2] został oparty na założeniu, że prędkość osiadania punktu położonego nad przesuującym się frontem eksploatacyjnym jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy wartościami obniżenia końcową w_k i chwilową w_t :

$$\frac{dw(t)}{dt} = c(w_k(t) - w_t(t)), \quad (1)$$

gdzie: c – współczynnik prędkości osiadania (współczynnik czasu),

t – czas,

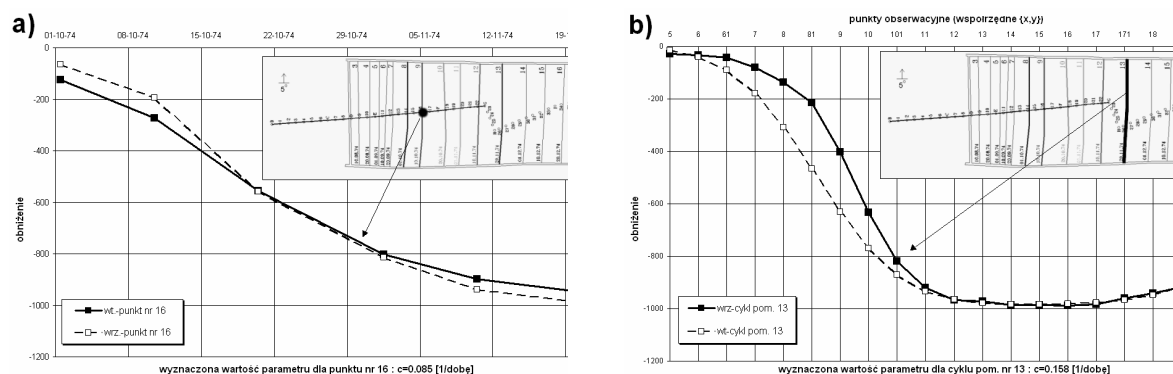
$w_k(t)$ – obniżenie końcowe, jakie wystąpiłoby w danym punkcie powierzchni terenu, gdyby front eksploatacyjny został zatrzymany w położeniu zajmowanym w chwili czasu t ,

$w_t(t)$ – obniżenie chwilowe stwierdzone w danej chwili czasu t .

Rozwiązanie równania (1) prowadzi do uzyskania formuły pozwalającej na obliczanie obniżeń nieustalonych dla dowolnej lokalizacji punktu na powierzchni o współrzędnych (x,y,t) . Wartości pozostałych wskaźników deformacji można otrzymać przez ogólnie znane przekształcenia różniczkowe oraz przy wykorzystaniu pewnych dodatkowych założeń, jak np. związek Awierszyna. Jak wynika z równania (1), parametrem decydującym o rozkładzie deformacji w jego nieustalonej fazie jest współczynnik prędkości osiadania – c . Bardzo istotnym zagadnieniem jest prawidłowy dobór jego wartości do prognoz, w praktyce realizowany różnymi metodami na podstawie odpowiednich wyników pomiarów geodezyjnych. Najpopularniejszym, a zarazem najprostszym sposobem wyznaczenia wartości parametru c jest geometryczna metoda, zaproponowana przez S. Knothego, nazywana metodą styczną [2, 3]. Pozwala ona na wyznaczenie wartości c dla pojedynczego punktu obserwacyjnego na podstawie przebiegu jego obniżenia w czasie (przy pewnych dodatkowych założeniach). Metoda ta była szeroko stosowana z uwagi na swoją prostotę i brak innych możliwości, jednakże jej dokładność pozostawia wiele do życzenia.

Rozwój technologii informatycznych umożliwił identyfikację wartości współczynnika czasu w sposób bardziej precyzyjny. Upowszechniły się przy tym dwa sposoby identyfikacji:

- Wyznaczanie wartości c na podstawie przebiegu osiadania w czasie (czyli wg współrzędnej czasowej (t)) wybranego, pojedynczego punktu obserwacyjnego o danych współrzędnych geometrycznych (x,y) . Podejście to w pewnym sensie odpowiada metodzie styczną, jednakże ma tę przewagę, iż umożliwia analizę całej krzywej osiadania punktu w czasie, a nie tylko jej fragmentu poniżej punktu przegięcia. Przykład takiego postępowania przedstawiono na rys. 1a.
- Wyznaczanie wartości c na podstawie profilu nieustalonej niecki obniżeniowej (każdy punkt ma odmienne współrzędne geometryczne (x,y)) w danym cyklu pomiarowym (współrzędna czasowa $t = \text{const}$, gdzie t odpowiada dacie pomiaru). Przykład takiego postępowania przedstawiono na rys. 1b.



Rys. 1. Identyfikacja parametru „c” według dotychczasowych metod
 Fig. 1. The identification of parameter „c” according to traditional methods

W przypadku obydwu metod w zadaniu optymalizacyjnym (jakim jest uzyskanie takiej wartości parametru c , aby opis teoretyczny zjawiska jak najlepiej aproksymował wyniki pomiarów) do budowy funkcji celu wykorzystuje się najczęściej metodę najmniejszych kwadratów, biorąc pod uwagę odchyłki pomiędzy wartościami obniżenia, uzyskanymi z modelu teoretycznego i z pomiaru. Następnie dla tak określonego kryterium optymalizacji poszukuje się minimum wspomnianej funkcji. Do poszukiwania minimum funkcji celu wykorzystuje się najczęściej metody gradientowe, ale powszechne jest także stosowanie metod bezgradientowych.

Zastosowanie każdej z obydwu przedstawionych metod ma swoje implikacje z punktu widzenia wyznaczonej wartości parametru c , a mianowicie:

- wyznaczanie pierwszą z metod, czyli wg współrzędnej czasowej, powoduje „uśrednienie” wartości parametru dla pojedynczego punktu z uwagi na współrzędną czasową t , natomiast z uwagi na współrzędne geometryczne dla każdej lokalizacji (x_i, y_i) punktu linii obserwacyjnej otrzymuje się inne wartości c .
- na podstawie drugiej metody otrzymuje się „uśrednione” wartości parametru c z uwagi na współrzędne geometryczne wszystkich wykorzystanych do identyfikacji punktów (w danym cyklu pomiarowym analizuje się wszystkie dostępne punkty linii obserwacyjnej), natomiast z uwagi na współrzędną czasową t (czas wykonania kolejnego cyklu pomiarowego) otrzymujemy jego zróżnicowane wartości dla każdego analizowanego cyklu pomiarowego.

W praktyce (czyli dla celów wykonywania prognoz w stanie nieustalonym) otrzymane wg każdej z tych metod różne wartości parametru c zastępuje się wartością średniej arytmetycznej. Mając to na uwadze, można postawić pytanie: czy dla celów prognoz nie należałoby wyznaczać wartości współczynnika prędkości osiadania na podstawie pełnych

wyników obserwacji, czyli analizując rozwój niecki obniżeniowej zarówno we współrzędnych geometrycznych, jak i we współrzędnej czasowej? Zadanie takie zostało zrealizowane przez autora niniejszego artykułu, a podstawowe informacje na ten temat przedstawiono w następnym punkcie.

3. Charakterystyka proponowanej metodyki identyfikacji parametru „c”

Dla wyznaczenia wartości parametru c w przestrzeni współrzędnych $\{x,y,t\}$ niezbędne jest dysponowanie odpowiednimi danymi, na które składają się:

- dane dotyczące czasoprzestrzennego rozwoju frontu eksploatacyjnego, zawierające informacje o prędkości postępu frontu i jego czasowej korelacji z prowadzonymi pomiarami,
- zbiór W , zawierający dane opisujące czasoprzestrzenny rozwój niecki obniżeniowej w postaci punktów w przestrzeni \mathbf{R}^3 :

$$W = \{w_{ij}^p(x_i, y_i, t_j), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m\}, \quad (2)$$

gdzie: w_{ij}^p – zmierzone obniżenie i -tego punktu w j -tym pomiarze,

x_i, y_i – współrzędne geometryczne i -tego punktu obserwacyjnego,

t_j – data j -tego pomiaru (czas),

m – liczba analizowanych punktów obserwacyjnych,

n – liczba analizowanych cykli pomiarowych.

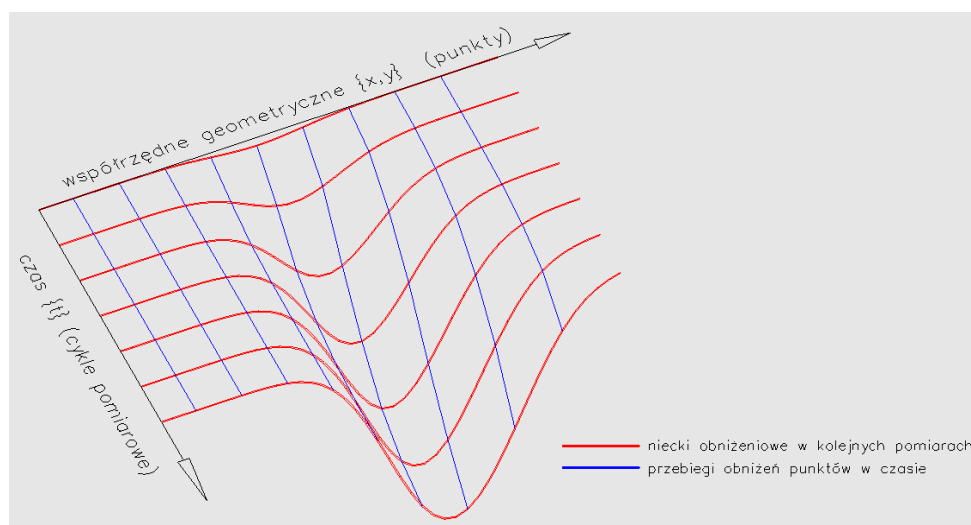
Na rys. 2 przedstawiono graficzną interpretację danych pomiarowych (2) przy upraszczającym założeniu, że zostały one zebrane dla punktów obserwacyjnych ułożonych wzdłuż linii prostej. W przypadkach, gdy punkty są zlokalizowane w sposób rozproszony, trudno jest przedstawić graficznie zmienność w czasie powierzchni niecki obniżeniowej.

Kryterium optymalizacji opracowano na podstawie metody najmniejszych kwadratów:

$$F(\Omega) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (w_{ij}^o - w_{ij}^p)^2, \quad (3)$$

gdzie: Ω – zbiór parametrów funkcji celu; w tym przypadku $\Omega = \{c\}$. Zakłada się przy tym, że zbiór pozostałych parametrów teorii: $(\{a, tg\beta\} \cup \{a, tg\beta, d\})$ został określony na podstawie profilu niecki asymptotycznej. Wartości tych parametrów są stałe w czasie i przestrzeni.

w_{ij}^0 – obniżenie i-tego punktu w chwili czasu j-tego pomiaru, określone na drodze teoretycznej, przy wykorzystaniu bieżącej wartości parametru c .



Rys. 2. Przestrzeń danych $\{w(x,y,t)\}$ do identyfikacji parametru c w przypadku punktów obserwacyjnych zlokalizowanych wzdłuż linii prostej

Fig. 2. The data space $\{w(x,y,t)\}$ for parameter „ c ” identification purposes in case of points located along straight line

Warunek optymalnego rozwiązania z uwagi na parametr c przyjmuje następującą postać:

$$c_{opt} = c : F(\Omega) \rightarrow \min, \quad (4)$$

W praktyce poszukiwanie minimum funkcji celu uważa się za zrealizowane po spełnieniu warunku:

$$c_{opt} = c : F(\Omega) < \varepsilon, \quad (5)$$

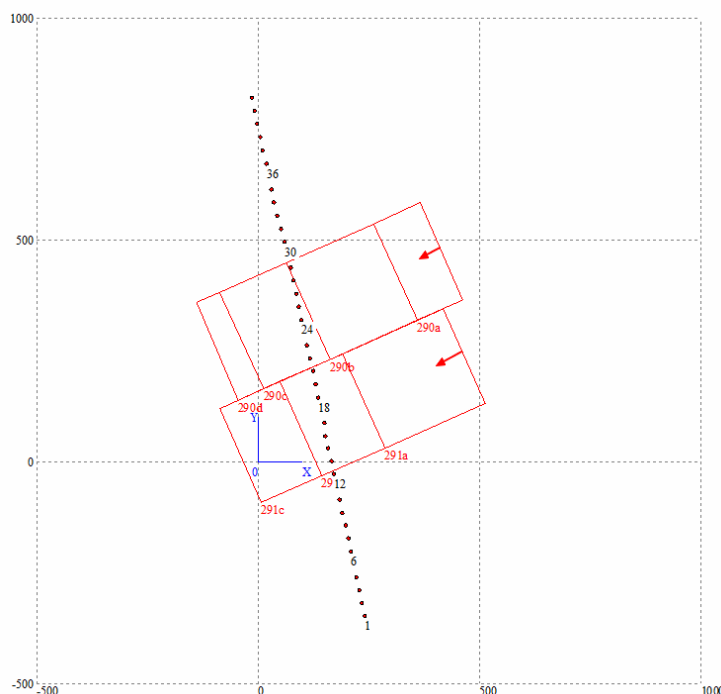
gdzie ε to kryterium stopu w postaci dopuszczalnego błędu dopasowania.

Na podstawie przedstawionych założeń opracowano algorytm obliczeniowy, a następnie odpowiednie oprogramowanie, pozwalające na praktyczną realizację zadania identyfikacji wartości współczynnika prędkości osiadania.

4. Wyniki identyfikacji wartości parametru „ c ”

Linia „ul. Spokojna” składa się z 41 punktów pomiarowych, średnia odległość pomiędzy punktami wynosi 30 m. Na linii wykonano 12 cykli pomiarowych pomiędzy 9 września 2007 r. a 6 października 2009 r.

W rejonie linii była prowadzona eksploatacja górnicza w pokładzie 118 dwoma ścianami: 290 (długość 240 m, wybieg 560 m) i 291 (długość 230 m, wybieg 560 m) z zawałem stropu na średniej głębokości około 385 m. Pokład wybierano na przeciętną wysokość 3,5 m. Lokalizację linii w stosunku do rozpatrywanej eksploatacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Lokalizacja linii obserwacyjnej względem dokonanej eksploatacji
Fig. 3. Location of observation line against finished extraction fields

W pierwszym etapie dokonano identyfikacji wartości parametrów teorii Budryka–Knothego na podstawie niecki asymptotycznej. Otrzymano następujące wartości parametrów:

- $a = 0,395$,
- $\operatorname{tg}\beta = 1,612$,

przy czym błąd procentowy dopasowania niecki teoretycznej do uzyskanej z pomiaru wyniósł $M_{\%} = 2,06\%$. Opisane wartości parametrów były przyjmowane jako wartości stałe w procesie wyznaczania współczynnika prędkości osiadania c .

Następnie dokonano identyfikacji wartości parametru wg analizowanych w niniejszym artykule metod:

1. Na podstawie opracowanej metodyki, czyli w przestrzeni współrzędnych $\{x,y,t\}$.
2. Na podstawie poszczególnych nieustalonych niecek obniżeniowych, uzyskanych w kolejnych cyklach pomiarowych.
3. Na podstawie przebiegu osiadań w czasie dla poszczególnych punktów linii obserwacyjnej.

Otrzymane wyniki przedstawiono w następujących tabelach:

- tabela 1 – zestawienie porównawcze otrzymanych wartości parametru c oraz błędów dopasowania dla identyfikacji wg metod (1) i (2),
- tabela 2 – zestawienie porównawcze otrzymanych wartości parametru c oraz błędów dopasowania dla identyfikacji wg metod (1) i (3).

W obydwu tabelach po lewej stronie przedstawiono uzyskaną wartość parametru c , wg proponowanej metodyki, wraz z błędami dopasowania do poszczególnych profili niecek obniżeniowych (tab. 1) oraz przebiegów osiadania w czasie dla poszczególnych punktów (tab. 2). Prawa część tabel przedstawia uzyskane wartości parametru c przy podejściu tradycyjnym wg metody (2) – tab. 1 oraz wg metody (3) – tab. 2. Ostatni wiersz obydwu tabel przedstawia porównanie wartości parametru c , uzyskanej wg prezentowanej metodyki ze średnią arytmetyczną obliczoną na podstawie metody (1) lub (2).

Na rys. 4 przedstawiono porównanie wybranych profili niecek obniżeniowych, określonych na drodze teoretycznej wg metod (1) i (2), z uzyskanymi na podstawie pomiarów. Z uwagi na ograniczony zakres niniejszego artykułu na wykresach nie przedstawiono porównania przebiegów osiadań w czasie dla poszczególnych punktów.

Tabela 1

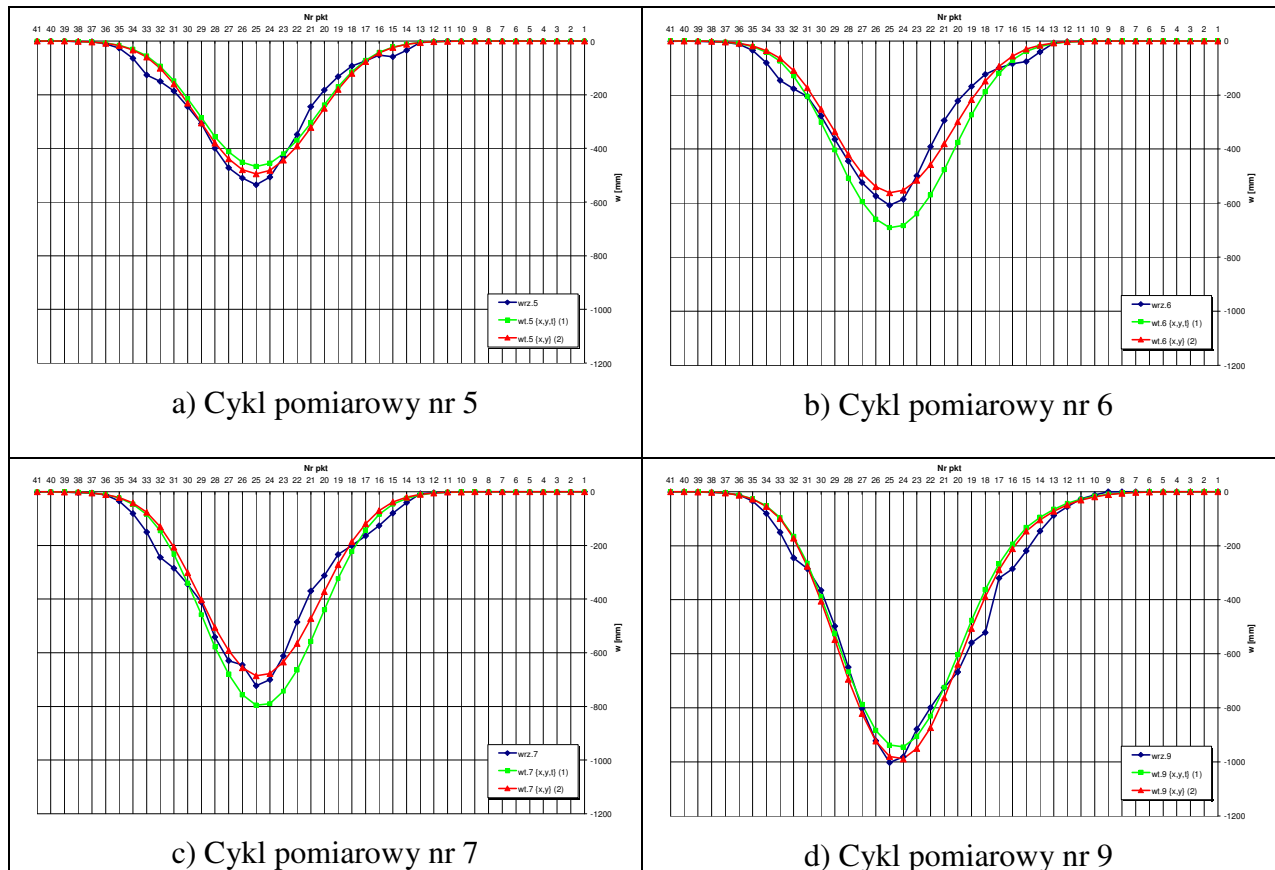
Wyniki identyfikacji w przestrzeni $\{x,y,t\}$ i porównanie z identyfikacją na podstawie indywidualnych profili niecek dynamicznych w wybranych cyklach pomiarowych

Nr pomiaru	Identyfikacja w przestrzeni $\{x,y,t\}$ (1)		Identyfikacja indywidualna profili niecek $\{x,y\}$ (2)	
	Uzyskana wartość parametru „c”, [1/rok]	Błąd procentowy $\{x,y,t\}$ (1)	Uzyskana wartość parametru „c”, [1/rok]	Błąd procentowy $\{x,y\}$ (2)
4	2,363	14,15	1,046	10,38
5		5,80	1,810	5,12
6		10,58	1,361	5,55
7		8,72	1,499	5,41
8		11,45	1,314	4,96
9		4,39	2,754	3,91
Średnia 4...9	2,363	---	1,631	---

Tabela 2

Wyniki identyfikacji w przestrzeni $\{x,y,t\}$ i porównanie z identyfikacją na podstawie indywidualnych przebiegów obniżen wybranych punktów w czasie

Nr punktu	Identyfikacja w przestrzeni $\{x,y,t\}$ (1)		Identyfikacja dla przebiegu osiadań w czasie pojedynczych punktów obserwacyjnych $\{t\}$ (3)	
	Uzyskana wartość parametru „c”, [1/rok]	Błąd procentowy $\{x,y,t\}$ (1)	Uzyskana wartość parametru „c”, [1/rok]	Błąd procentowy $\{t\}$ (3)
11	2,363	10,11	5,720	3,30
12		8,06	4,543	2,11
13		8,44	4,745	2,57
14		9,02	5,420	2,18
15		11,62	7,554	3,96
16		8,74	5,249	2,45
17		8,94	4,608	4,83
18		9,14	3,768	7,10
19		8,98	2,610	8,86
20		10,27	2,217	10,21
21		11,53	1,765	9,89
22		11,05	1,737	8,70
23		8,83	1,905	7,14
24		6,51	2,112	5,92
25		6,24	2,183	5,91
26		8,19	2,040	7,21
27		6,13	2,133	5,48
28		6,01	2,086	5,03
29		7,57	1,944	5,21
30		6,47	2,163	5,91
31		9,52	3,125	6,22
Średnia 11...31	2,363	---	3,452	---



Rys. 4. Porównanie wybranych profili niecek nieustalonych, uzyskanych na podstawie proponowanej metodyki (1), określonych tradycyjnie wg metody (2) oraz uzyskanych z pomiaru
 Fig. 4. The comparison of chosen subsidence trough profiles obtained by using proposed methodology (1), determined in traditional way (2) and taken from measurements

5. Podsumowanie

Podsumowując przedstawione w niniejszym artykule najistotniejsze wyniki badań, można stwierdzić, co następuje:

1. Stosowane obecnie metody identyfikacji współczynnika prędkości osiadania zakładają jego wyznaczenie albo na podstawie przebiegu obniżzeń pojedynczych punktów w czasie, albo na podstawie profili niecek nieustalonych, uzyskanych w danym cyklu pomiarowym, W każdym z przypadków prowadzi to do uzyskania wielu różnych wartości c .
2. Wykonywane współcześnie prognozy deformacji dla stanów nieustalonych przy wykorzystaniu teorii Budryka–Knothego wymagają przyjęcia jednej, stałej wartości parametru c , Dysponując różnymi wartościami c , uzyskanymi w procesie identyfikacji, określa się jego wartość do prognoz jako średnią arytmetyczną, Można postawić w tym miejscu pytanie: czy takie postępowanie jest prawidłowe ?

3. Rozwiązaniem problemu może być przedstawiona w ramach niniejszego artykułu metodyka, pozwalająca uzyskać jedną, optymalną (w sensie metody najmniejszych kwadratów) wartość parametru c , wyznaczoną na podstawie czasoprzestrzennego rozkładu obniżeń w nieustalanej fazie deformacji.
4. Dla celów użytkowych opracowano oprogramowanie komputerowe, umożliwiające wszechstronną analizę przebiegu nieustalonych deformacji powierzchni, wywołanych podziemną eksploatacją, pod kątem wyznaczania wartości współczynnika prędkości osiadania zarówno wg dotychczas stosowanych metod, jak i wg zaproponowanej metodyki.
5. Uzyskane w przedstawionym przykładzie wyniki pozwalają zauważyć różnice w otrzymanych wartościach parametru c wg proponowanej metodyki i jako średniej arytmetycznej, otrzymanej z metod „tradycyjnych”. Niektóre z analizowanych, innych linii, nieprezentowanych w niniejszym artykule, również wykazywały takie tendencje. Pozwala to przyjąć wstępną hipotezę, że zaproponowana w artykule metodyka pozwala na uzyskanie wartości parametru c najbardziej wiarygodnej z punktu widzenia wykorzystania jej w prognozach. Wymaga to jednak potwierdzenia na większej liczbie przypadków.

BIBLIOGRAFIA

1. Chudek M.: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
2. Knothe S.: Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania, Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1, 1953.
3. Knothe S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1984.
4. Kratsch H.: Mining subsidence engineering, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York 1983.
5. Strzałkowski P.: Ochrona środowiska na terenach górniczych. Wybrane problemy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
6. Ścigała R.: Komputerowe wspomaganie prognozowania deformacji górotworu i powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
7. Ścigała R.: Identyfikacja współczynnika prędkości osiadania, z uwzględnieniem czasoprzestrzennego rozwoju niecki obniżeniowej. „Przegląd Górniczy”, nr 11-12, Katowice 2009, s. 88-93.

Abstract

The practical example of subsidence rate coefficient determination on the basis of geodetic measurements results has been presented in this paper. The determination was carried out by using Author's proposal of new methodology.

The proposed methodology bases on the assumption that coefficient "c" should be determined in "one step" with using time-space distribution of subsidence, For practical purposed suitable software has been worked out that enables determination of parameter "c". For the exemplary identification procedure the geodetic measurements results were taken from one of Upper Silesia Basin coal mines, In the example the parameter "c" was determined by using two traditional methods as well as proposed by the Author, The obtained results show that there is significant difference between value of "c" determined from Author's proposal and mean value calculated from traditional methods.