ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

JAN BIAŁEK

OPIS NIEUSTALONEJ FAZY OBNIŻEŃ TERENU GÓRNICZEGO Z UWZGLĘDNIENIEM ASYMETRII WPŁYWÓW KOŃCOWYCH

GÓRNICTWO

Z. 194
GLIWICE
1991

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1106

JAN BIAŁEK

OPIS NIEUSTALONEJ FAZY OBNIŻEŃ TERENU GÓRNICZEGO Z UWZGLĘDNIENIEM ASYMETRII WPŁYWÓW KOŃCOWYCH

GLIWICE 1991

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150+85 Ark. wyd. 7,5 Ark. druk. 7 Papier offsetowy kl.III, 70x100, 70
Oddano do druku 21.01.91 Podpis do druku 10.04.91 Druk ukończ. w maju 199..
Zam 32/91 Cena zł 6.400,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

1. WSTĘP

Problematyka oceny wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na deformacje powierzchni jest od wielu lat przedmiotem licznych badań, obserwacji i studiów teoretycznych.
Według podziału dokonanego przez J.Litwiniszyna [51] można wyróżnić cztery zasadnicze kierunki badań.

Kierunek pierwszy reprezentują badania, których wynikiem są formuły empiryczne służące do przewidywania wybranych wskaźników deformacji, przy czym ich zakres stosowalności jest zazwyczaj ograniczony do oceny wielkości maksymalnych dla pewnych typowych kształtów eksploatacji.

Drugi kierunek badań obejmują prace, w których zastosowano pewien schemat dedukcyjny oparty na przyjętych aksjomatach, takich jak zasada superpozycji wpływów przyjmowana za badaczami niemieckimi H.Keinhorstem i R.Balsem [2] lub związek pomiędzy przemieszczeniami poziomymi a nachyleniem niecki osiadanie przyjmowany za S.G.Awierszynem [1]. Kierunek ten reprezentują tzw. teorie geometryczno-całkowe, opisujące proces deformacji terenu za pomocą wzorów całkowych. Wspólną cechę tych teorii jest przyjęcie założenia o istnieniu funkcji wpływów $f(L)$, gdzie L oznacza poziomą odległość rozpatrywanego punktu P na powierzchni terenu od elementu wybranej powierzchni dS. Całkowanie prowadzone jest po obszarze S, będącym rzutem wyeksploatowanego pola na powierzchnię poziomą, przy czym pod znakiem całki występuje iloczyn funkcji określającej obniżenie stropu w tym polu przez funkcję wpływów. Największy rozwój teorii całkowo-geometrycznych wiąże się z pracami polskich badaczy: W.Budryka [11], S.Knothego [38] i T.Kochmańskiego [42].

Trzecią grupę obejmują prace oparte na metodach i modelach mechaniki ośrodków ciągłych. Stan przemieszczeń i naprężeń w takim ośrodku określa układ równań różniczkowych równowagi oraz równania stanu, zależne od przyjętego modelu ośrodka, najczęściej sprężystego, lepkosprężystego, plastycznego itp. Z autorów zagranicznych zagadnieniami tymi zajmowali się: D.S.Berry, T.Sales, Z.T.Bieniawski, W.Cook, H.G.Denkhaus, G.N.Kuźniecow i wielu innych.
Z polskich prac na szczególną uwagę zasługują prace M.Chudka i M.Moroza, F.Dymka, H.Filcka, H.Gila, Z.Kłeczka, J.Litwiniszyna, A.Sałustowicza, G.Szefera, K.Szpunara i wielu innych.

Aktualnie, jakościowo nowe możliwości stosowania modeli ośrodków ciągłych wynikają z rozwoju odpowiednich metod numerycznych (Metoda Elementów Skończonych, Metoda Elementów Brzegowych) oraz powszechnej dostępności mikrokomputerów. Zastosowaniem wymienionych metod numerycznych w rozwiązywaniu praktycznych zagadnień geomechaniki górniczej w Polsce zajmuje się zespół H.Filcka i J.Walaszczyka [26].
Pracą z pogranicza kierunku drugiego i trzeciego jest praca B.Drzęźli [15]. Autor przyjmuje w niej, że rozkład przemieszczeń pionowych w całym górotworze jest zgodny z formułą całkową S.Knothego, natomiast przemieszczenie poziome wyznacza wychodząc z równań teorii sprężystości.

Czwartą grupę prac obejmują prace związane z mechaniką ośrodka stochastycznego. Kierunek ten został zapoczątkowany przez J.Litwiniszyna [48,49,50,51,52,53]. Teoria ośrodka stochastycznego, ujęta w formie układu równań różniczkowych typu parabolicznego, pozwala na rozwiązywanie różnego rodzaju zagadnień brzeżno-początkowych. Do rozwoju tej teorii przyczynili się J.Bodziony, D.Krzysztoń, J.Męczyński, J.Rogowska, A.Smolarski i inni.

Z puntku widzenia nauki o szkodach górniczych należy dodać, że każda poprawna teoria geometryczno-całkowa jest szczególnym rozwiązaniem teorii ośrodka stochastycznego.

Dotychczas w praktyce największe zastosowanie znalazły teorie geometryczno-całkowe W.Budryka-S.Knothego i teoria T.Kochmańskiego.

Wszystkie wymienione teorie wykazują w konfrontacji z pomiarami pewne stałe systematyczne rozbieżności. Rozbieżności te są szczególnie duże, gdy rozpatruje się deformacje powierzchni w czasie, z uwzględnieniem rozwoju eksploatacji.

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest opis procesu obniżeń powierzchni w czasie, spowodowanych podziemną eksploatacją złoża pokładowego, z uwzględnieniem zmiennej w czasie geometrii pola wybierania.

Rozpatrywane są dwa zagadnienia:

- opis obniżeń końcowych, tzn. takich, jakie wystąpią po czasie dostatecznie długim od zatrzymania eksploatacji,
- opis obniżeń w czasie przy uwzględnieniu zmiennej geometrii wybranych pokładów i zjawiska opóźnienia czasowego w ujawnianiu potencjalnie możliwych obniżeń końcowych.

W efekcie, bazując na opisie obniżeń podanym przez S.Knothego, otrzymano wzory pozwalające znacznie dokładniej prognozować zarówno obniżenia końcowe, jak i obniżenia w czasie.

Duża ogólność proponowanych wzorów oraz ich prostota umożliwiają wykonanie złożonych obliczeń prognostycznych.

Niniejszą pracę można zakwalifikować do kierunku drugiego, chociaż wykorzystano w niej w pewnym zakresie wyniki prac kierunku trzeciego.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Nagromadzony w ciągu wielu lat bardzo bogaty materiał obserwacyjny, dotyczący ruchów powierzchni wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej, stanowił podstawę szeregu analiz porównawczych wielkości pomierzonych i obliczonych teoretycznie.

Najbogatszą dokumentację pomiarową posiadają obniżenia powierzchni, gdyż jest to najprostszy do pomiaru wskaźnik deformacji, mający zasadnicze znaczenie dla oceny szkodliwości wpływów eksploatacji górniczej na obiekty posadowione na terenach górniczych.

Istniejąca potrzeba znajomości stosunkowo dokładnych rozkładów poziomych obniżeń powierzchni wynika z konieczności posługiwania się jako miernikami szkodliwości wpływów pierwszymi i drugimi pochodnymi z funkcji obniżeń względem położenia punktu.

Szczególnie duża dokładność opisu obniżeń końcowych wymagana jest przy opisie obniżeń w czasie, czyli przy rozważaniu tzw. dynamicznych niecek obniżeniowych, gdyż następuje tu sumowanie błędów modelu ruchów końcowych z błędami modelu propagacji obniżeń w czasie.

Przyczynami obserwowanych systematycznych rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami obliczeń prognostycznych są:

- rozproszenie losowe procesu deformacji górotworu,
- niedoskonałość stosowanych modeli opisu górotworu.

Pierwsza przyczyna ujawnia się w postaci nieregularności przebiegu samego zjawiska obniżenia, na co zwrócili uwagę W.Batkiewicz [3], G.Klein [35], E.Popiołek [63], natomiast druga przyczyna ma swoje źródło w koniecznych uproszczeniach przyjętych przy tworzeniu teorii, powodujących tzw. błąd modelu.

Przykładowo, według badań E.Popiołka i J.Ostrowskiego [63,64], stosując wzory teorii W.Budryka-S.Knothego popełniamy systematyczne błędy maksymalnych wartości końcowych wskaźników deformacji, osiągające następujące wartości:

błąd nachyleń $\Delta T_{max} = -13\%$,
błąd krzywizn $\Delta K_{max} = -34\%$,
błąd przesunięć poziomych $\Delta u_{max} = +32\%$,
błąd odkształceń poziomych $\Delta \varepsilon_{max} = +34\%$.

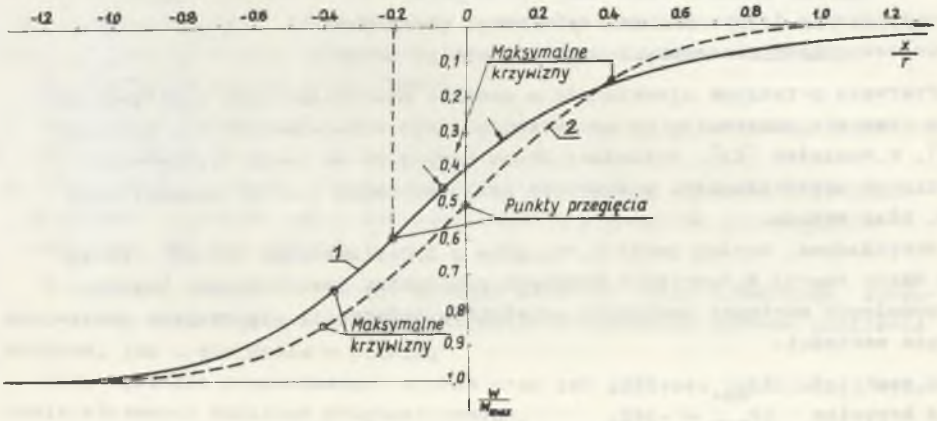
W przypadku teorii T.Kochmańskiego błędy te osiągają następujące wartości:

błąd przesunięć poziomych $\Delta u_{max} = -5,5\%$,
błąd odkształceń poziomych $\Delta \varepsilon_{max} = -36\%$.

Błędy prognoz wielkości maksymalnych można stosunkowo łatwo skorygować, np. opierając się na powyższych wynikach.

Oprócz błędów wielkości maksymalnych występują pewne systematyczne błędy poziomych rozkładów wskaźników deformacji. Jednym z systematycznych błędów rozkładu wartości obniżeń teorii W.Budryka-S.Knothego jest zaniżanie wartości obliczonych obniżeń w punktach obliczeniowych, położonych w pewnej odległości od rozpatrywanej eksploatacji. Wskazują na to wyniki prac S.Szpetkowskiego [75], Z.Rugosza [66], J.Zycha [84] i analiza wszystkich znanych autorowi wyników obserwacji.

Stosując dowolną liniową teorię wpływów, dla teoretycznego przypadku eksploatacji o kształcie półpłaszczyzny, zawsze otrzymamy profile obniżeń symetryczne względem krawędzi eksploatacji, gdy tymczasem niemal wszystkie obserwacje wykazują brak takiej symetrii. Najczęściej obserwuje się przesunięcie wpływów w stronę zrobów, polegające na tym, że obniżenie $w = 0,5w_{max}$ występuje nad zrobami w pewnej odległości d od krawędzi eksploatacji. Ponadto, według S.Szpetkowskiego [75] (rys. 2.1), obserwowane krzywizny niecki obniżeniowej nad zrobami są o 60% większe od krzywizn występujących nad calizną. W konsekwencji maksymalne nachylenia T_{max} występują w miejscu, gdzie obniżenia osiągają wartość ≃ 62% wartości maksymalnej w_{max}.



Rys. 2.1. Profil niecki obniżeniowej:
1 - według badań empirycznych S.Szpetkowskiego [75],
2 - według teorii S.Knothego [38]

Fig. 2.1. Profile of subsidence trough:
1 - acc. to the empirical studies of S.Szpetkowski [75],
2 - acc. to the theory of S.Knothe [38]

Obserwowana asymetria profilu niecki obniżeniowej spowodowana jest trzema głównymi przyczynami:

- stosowane wzory zostały wyprowadzone przyjmując upraszczające założenia, że nad krawędzią eksploatacji strop pokładu ulega obniżeniu $w = 0,5w_{max}$ lub linia ugięcia stropu jest opisywana funkcją progową Heaviside'a. W rzeczywistości, według Bilińskiego [9], nad krawędzią strop pokładu ulega obniżeniu, osiągającemu wielkość $w \simeq (0,1 \div 0,2)w_{max}$;
- wskutek deformacji górotwór zmienia swą objętość. Wskazują na to między innymi badania modelowe wykonane na modelach piaskowych [41,65] i na modelach wykonanych z materiałów ekwiwalentnych;
- wskutek deformacji zmieniają się średnie wartości parametrów fizyko-mechanicznych skał tworzących górotwór.

Zjawisko przesunięcia wpływów w stronę zrobów jest najczęściej uwzględniane poprzez zabieg cofnięcia frontu w stronę zrobów o wielkość d tzw. obrzeża. Obniżenia obliczone przy uwzględnieniu tak zmienionego zakresu eksploatacji są na ogół dość zgodne z wynikami obserwacji, gdy mniejszy z wymiarów parceli $l > (3 \div 4)d$. Dla $l < 2d$ należałoby przyjąć brak wpływów, co jest zupełnie niezgodne z obserwacją.

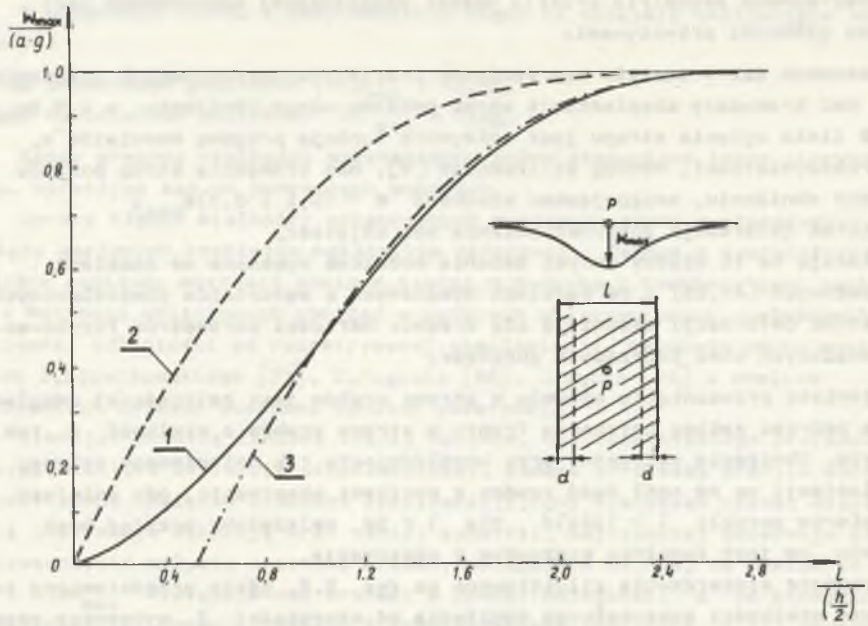
Powyższe stwierdzenia zilustrowano na rys. 2.2, gdzie przedstawiono zależność wielkości maksymalnego obniżenia od szerokości l wybranego pasa pokładu.

Nieadekwatność opisu niepełnych niecek obniżeniowych z wynikami obserwacji sprawia, że obserwacje te nie mogą stanowić podstawy do wyznaczania parametrów charakteryzujących górotwór. Jest to jedną z przyczyn słabego rozeznania wartości parametrów dla przypadków głębokiej eksploatacji.

Niedoskonałość opisu kształtowania się obniżeń nad małymi wybraniami sprawia, że w literaturze rozważa się najczęściej tylko tzw. "ustalone niecki dynamiczne", tzn. niecki, które wykształcają się nad przesuwającym się frontem ścianowym, gdy wybiegi ścian są już dostatecznie duże. W opisie pomija się fazę rozruchu i początkowego biegu ścian.

Problem uwzględnienia asymetrii końcowego profilu niecki obniżeniowej komplikuje się jeszcze bardziej przy prognozowaniu wpływów w dłuższym przedziale czasu, gdy rzeczywistą eksploatację cechuje duża złożoność geometryczna. Najczęściej eksploatacja górnicza prowadzona jest jednocześnie wieloma ścianami w kilku pokładach. Występuje wtedy dodatkowo problem superpozycji wpływów.

Stosowanie liniowej superpozycji wpływów znalazło liczne zastrzeżenia w pracach B.Dżegniuka [22], K.Grenia [29], J.Rogowskiej [65], S.Szpetkowskiego [76] i J.Zycha [84]. Dla usunięcia obserwowanych różnic profili pomierzonych i obliczonych teoretycznie podjęto szereg prac zmierzających do uzyskania lepszego opisu procesu obniżeń.



Rys. 2.2. Wpływ szerokości l wybranego pasa pokładu na wielkość maksymalnych obniżeń w_{max}
według: 1 - badań angielskich [74], 2 - wzór S.Knothego (tgβ=2, d=0), 3 - wzór S.Knothego (tgβ =2 , d=0.12h)

Fig. 2.2. Effect of the width of the extracted zone of the seam on the magnitude of the maximum subsidance W_{max}
acc. to: 1- English research [74], 2- S.Knothe's formula (tgβ=2, d=0), 3- S.Knothe's formula (tgβ =2, d=0.12h)

B.Dżegniuk [22] dla poprawy opisu niecki obniżeniowej proponuje wprowadzenie funkcji delinearyzującej w postaci operatora:

$$F(\varphi) = 1 - k \sin \pi \varphi^{q}, \tag{2.1}$$

gdzie:

k,q - parametry,

φ - funkcja obniżeń stosowana w liniowych teoriach wpływów.

K.Greń [29] proponuje następujący wzór opisujący obniżenia:

$$w(x) = ag\left(\varphi + A_1 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + A_2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\right)^2\right), \tag{2.2}$$

gdzie:

φ - jak we wzorze (2.1),

$ag = w_{max}$ - obniżenie maksymalne, jakie może wystąpić w pełnej niecce obniżeniowej,

A_1, A_2 - współczynniki ujmujące stopień asymetrii wpływów.

S.Szpetkowski [76] proponuje wprowadzenie do wzorów opisujących obniżenia punktów na zewnątrz granicy pola eksploatacyjnego funkcji zruszenia górotworu η w postaci:

$$\eta_{śr} = 8,5\left(7.5 - \frac{x}{h^{0.5}}\right)^{-1} \tag{2.3}$$

gdzie:

x - odległość od granicy pola eksploatacji,

h - głębokość eksploatacji.

J.Zych [84], analizując bogaty materiał obserwacyjny, upraszcza wzór (2.2) zaproponowany przez K.Grenia i stwierdza, że dobry opis obniżeń można uzyskać stosując wzór o postaci:

$$w(x,y) = -ag\left(f(x,y) - A_1\left(\left[\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{f(x,y)}{x}\right]^2\right)\right) \tag{2.4}$$

gdzie $f(x,y)$ - funkcja obniżeń liniowej teorii W.Budryka-S.Knothego.

Wzory (2.2), (2.4) dają zasadniczą poprawę wyników obliczeń prognostycznych. Profil niecki jest tu asymetryczny względem krawędzi eksploatacji i lepiej opisuje wpływy dalekie. Zakres stosowania powyższych wzorów jest jednak ograniczony do szczególnego przypadku sumowania wpływów eksploatacji n parcel, prowadzonej w tym samym pokładzie, dla w_{max} = constans. Uniemożliwia to skonstruowanie ogólnego algorytmu pozwalającego na wykonanie prognozy deformacji w dłuższym okresie czasu, gdy wielkości w_{max} są na ogół różne i eksploatacja jest prowadzona w wielu pokładach.

Dla prognozowania obniżeń w czasie konieczny jest w miarę dokładny opis ruchów końcowych oraz opis obserwowanego zjawiska opóźnienia w ich ujawnianiu się.

Literatura dotycząca wpływu czasu i prędkości wybierania na przebieg ruchów górotworu i powierzchni jest bardzo obszerna. Szczegółowy opis stanu badań w tym zakresie zawarty jest między innymi w pracach [78] K.Trojanowskiego i J.Białka [5]. Polskie badania oparte na założeniu, że stany końcowe obniżeń można przedstawić przy użyciu geometryczno-całkowej teorii wpływów datują się od pracy [39] S.Knothego, w której autor uwzględnił rozwój eksploatacji w czasie i zjawisko opóźnienia ujawniania się wpływów w postaci liniowego równania różniczkowego:

$$\frac{dw(t)}{dt} = c\left[w_k(t) - w(t)\right] \tag{2.5}$$

gdzie:

w(t) - obniżenie w chwili t,

$w_k(t)$ - obniżenie punktu w chwili t liczone jak dla teorii statycznej, tzn. bez opóźnienia w czasie (czas t jest tu argumentem określającym rozmiar wyeksploatowanej parceli),

c - parametr o wymiarze $[\frac{1}{czas}]$, zwany przez autora [39] współczynnikiem prędkości osiadania[x],

$\frac{dw(t)}{dt}$ - prędkość obniżania się punktu w chwili t.

Zaletą wzoru (2.5) jest jego prostota, ogólność oraz wysoka efektywność numeryczna, pozwalająca na śledzenie w czasie z krokiem Δt zmieniającej się wielkości obniżenia $w(t)$.

J.Litwiniszyn [50,52] rozpatrując ruch górotworu jako prawdopodobną wędrówkę cząstek górotworu w czasie, uzyskuje dla warunku początkowego w postaci delty Diraca i chwili początkowej $t=0$, następujące ogólne rozwiązanie, które można zapisać:

$$w(x,z,t) = w_k(x,z,t)\ \mathcal{H}[t - T(z)] \tag{2.6}$$

Nieznaną funkcję czasu $\mathcal{H}$ S.Knothe, G.Klein, J.Rogowska, J.Leśniak, W.Pielok [40] specyfikują, posługując się podobnie jak w równaniu (2.5) założeniem o proporcjonalności szybkości obniżeń do różnicy zaistniałych i potencjalnie możliwych obniżeń, uzyskując:

$$\mathcal{H}[t - T(z)] = 1 - \exp(-c\ [t - T(z)]), \tag{2.7}$$

gdzie $T(z)$ - czas zależny od wysokości z punktu obliczeniowego.

Równania (2.6), (2.7) lepiej od równania (2.5) opisują proces opóźniania w ujawnianiu się pierwszych ruchów po rozpoczęciu eksploatacji. Przyjmując w (2.7) $T(z) = 0$, rozwiązanie (2.6) odpowiada rozwiązaniu wynikającemu z (2.5).

Wyniki zbliżone do uzyskiwanych wzorem (2.7) można otrzymać posługując się rezultatami prac T.Lubiny [54] i T.Niemca [55]. Autorzy tych prac rozprzestrzenianie się wpływów w górotworze opisują jako falę kulistą lub elipsoidalną przemieszczającą się ze stałą prędkością od źródła zaburzenia do punktu obserwacyjnego. Wadą opisanych rozwiązań jest mała efektywność numeryczna.

Najnowszą pracą z omawianego zakresu jest praca W.Piwowarskiego [58]. Autor modeluje numerycznie proces przemieszczeń pionowych w stanie nieustalonym, stosując paraboliczne równanie różniczkowe o postaci:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right), \tag{2.8}$$

---

[x] W licznych pracach [23,28,31,70,71,82] parametr c nazywany jest współczynnikiem czasu.

gdzie:

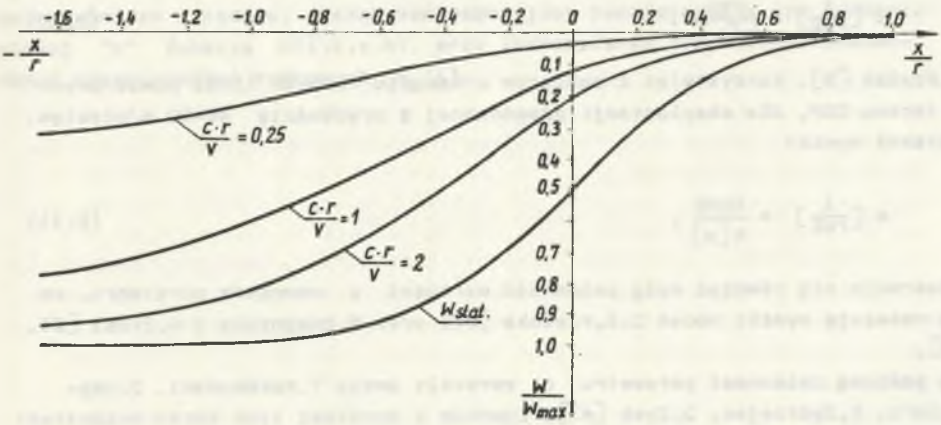
t - zmienna charakteryzująca czas trwania zjawiska,

u - przemieszczenia pionowe,

D - parametr.

Obniżenia końcowe według W.Piwowarskiego są zależne nie tylko od końcowej geometrii zrobów w pokładzie, ale również od przebiegu eksploatacji w czasie.

Zasadniczym wnioskiem wynikającym ze stosowania wzorów (2.5), (2.7) jest stwierdzenie, że ze wzrostem prędkości eksploatacji następuje silne wygładzenie profilu niecki osiadania nad czynnym frontem ścianowym, co powoduje spadek wartości nachyleń i krzywizn (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Wpływ prędkości postępu frontu ścianowego na kształt obliczonej wzorem (2.5) niecki obniżeniowej (V [m/rok], c [1/rok], r [m])

Fig. 2.3. Effect of the rate of the advance of the longwall front on the shape of subsidence trough V [m/year], c [1/year], r [m] calculated by formula (2.5)

Obserwacje raczej nie potwierdzają tego zjawiska. Świadczą o tym wyniki badań B.Skinderowicza [67,68], na podstawie których stwierdza on, że maksymalne nachylenie tzw. ustalonej niecki dynamicznej T_{maxdyn} osiąga wielkość 56% ÷ 73% maksymalnego nachylenia fazy statycznej T_{max}, niezależnie od prędkości postępu frontu ścianowego. Podobną wielkość (75%) przytacza J.Zych [83] oraz ten sam rząd wielkości uzyskał autor analizując szereg linii pomiarowych.

Dalsza ewolucja wzoru (2.5) polegała na zastąpieniu stałego w założeniu współczynnika prędkości osiadania c funkcją czasu cf(t), co prowadzi do równania (2.9), które zaproponował K.Trojanowski [78]:

$$\frac{dw(t)}{dt} = c\ f(t)\ [w_k(t) - w(t)] \tag{2.9}$$

K.Trojanowski proponuje nadać tej funkcji postać $f(t) = t^b$, co jak wykazano w pracy własnej [5], prowadzi do niejednoznaczności opisu tzw. ustalonych dynamicznych niecek obniżeniowych, gdyż funkcja $f(t)$ musi być funkcją ograniczoną.

Próby dopasowania profili niecek pomierzonych i obliczonych przy zastosowaniu wzoru (2.5) prowadzą do wniosku, że parametr c charakteryzuje się bardzo dużym rozrzutem wielkości. W szczególności obserwuje się bardzo silną zależność c od głębokości eksploatacji h. Wielkości c uzyskane dla Zagłębia Dolnośląskiego przez K.Wycisłę [82] (bardzo małe postępy ścian) można aproksymować wzorem:

$$c\ [\frac{1}{rok}] = \frac{720}{h\,[m]}\ , \tag{2.10}$$

J.Białek [5], korzystając z pomiarów z sześciu różnych linii pomiarowych z terenu GOP, dla eksploatacji prowadzonej z prędkością 40-80 m/miesiąc, uzyskał wynik:

$$c\ [\frac{1}{rok}] = \frac{1840}{h\,[m]}\ . \tag{2.11}$$

Obserwuje się również dużą zmienność wartości c wewnątrz górotworu, na co wskazują wyniki badań J.S.Pieloka [57] oraz B.Dżegniuka i A.Sroki [23, 71].

Na poziomą zmienność parametru c zwracali uwagę T.Kochmański, J.Magdziorz, E.Jędrzejec, J.Zych [43]. Zgodnie z wynikami tych badań bezpośrednio nad eksploatowanym polem wybierania wartośc c jest znacznie większa niż na zewnątrz pola wybierania.

Stwierdzono również istotną zależność c od prędkości postępu frontu wybierania. A.Sroka [70] podaje następujące wzory:

$$c = 4.8\ \frac{V_f}{r_o\ \sqrt{h}}\ [\frac{1}{rok}] \tag{2.12}$$

lub:

$$c = 1.2\ \frac{V_f}{r}\ [\frac{1}{rok}], \tag{2.13}$$

gdzie:

V_f - prędkość postępu frontu eksploatacyjnego $[\frac{m}{rok}]$,

r_o - parametr teorii T.Kochmańskiego,

r - promień rozproszenia wpływów w teorii W.Budryka-S.Knothego.

Propozycję uogólnienia obserwowanej zmienności współczynnika prędkości osiadania "c" przedstawiono w pracy własnej [7]. Autor zastępując w równaniu (2.5) parametr c funkcją o postaci $c = C_1 - C_2\, dw(t)/dt$, uzyskuje nieliniowe równanie różniczkowe I rzędu:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \left(C_1 - C_2 \frac{dw(t)}{dt}\right)\left[w_k(t) - w(t)\right], \qquad (2.14)$$

gdzie:

C_1, C_2 - parametry podlegające wyznaczeniu.

W niniejszej pracy rozważana jest możliwość zastosowania do opisu obniżeń w czasie uproszczona (zlinearyzowana) wersja równania (2.14).

Przedstawione rezultaty badań terenowych i analiza możliwości ich opisu wskazują, że równanie (2.5) S.Knothego może być dokładnym narzędziem opisu obniżeń w czasie, jednak konieczne jest zastąpienie w tym równaniu stałej "c" funkcją $c(t,x,y,h)$, przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności opisu obniżeń końcowych $w_k(t)$.

3. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Na podstawie analiz teorii geometryczno-całkowych stosowanych do opisu obniżeń oraz wyników obserwacji własnych i przedstawionych w literaturze, sformułowano następującą tezę:

Bazując na równaniu (2.5) S.Knothego można opracować znacznie dokładniejszy opis procesu obniżeń w czasie z uwzględnieniem czasoprzestrzennego rozwoju eksploatacji, który będzie eliminował szereg dotychczas obserwowanych, systematycznych rozbieżności.

W tym celu należy:

- opracować wzory, które dokładniej i wystarczająco ogólnie będą opisywały profile niecek ustalonych W_k,
- zastąpić w równaniu (2.5) współczynnik prędkości osiadania c=constans odpowiednio dobraną funkcją.

Powyższą tezę można zrealizować następująco:

1. Uwzględniając pozytywne rezultaty prac [29,84] należy opracować wzory, które delinearyzując opis obniżeń końcowych będą lepiej opisywały tzw. niepełne niecki obniżeniowe i wpływy dalekie. Opracowane wzory powinny umożliwiać sumowanie obniżeń wywołanych eksploatacją prowadzoną w kilku pokładach.

Przyjmując, że obserwowana asymetria profilu niecek obniżeniowych jest wynikiem zmian objętościowych deformowanych skał, analizowana będzie możliwość zastosowania do opisu obniżeń końcowych funkcji o postaci:

$$W_k(t,x,y,h) = w(t,x,y,h) - A_1 \Delta W\,[w(t,x,y,h), \gamma_{oct}(t,x,y,h)] \quad (3.1)$$

gdzie:

$W_k(t,x,y,h)$ - końcowe zdelinearyzowane obniżenie punktu w chwili t, obliczane przy przyjęciu założenia, że wpływy ujawniają się bez opóźnienia,

t - czas; określa we wzorze (3.1) zmieniające się rozmiary pól ścianowych,

$w(t,x,y,h)$ - składowa liniowa obniżeń końcowych, obliczana na podstawie wzoru (4.1) S.Knothego,

ΔW - funkcja delinearyzująca obniżenia końcowe,

γ_{oct} - odkształcenie oktaedryczne liniowej części wpływów (γ_{oct} jest funkcją odkształceń postaciowych - rozdział 4.2),

A_1 - bezwymiarowy parametr ujmujący stopień delinearyzacji obniżeń.

Opracowany wzór będzie zweryfikowany na podstawie wyników pomiarów przedstawiających końcowe (ustalone) profile niecek obniżeniowych.

2. Obserwowaną zależność wartości współczynnika prędkości osiadania "c" od prędkości postępu frontu eksploatacyjnego V_f, głębokości eksploatacji h i położenia x,y punktu obserwacyjnego można uogólnić zastępując w równaniu (2.5) stałą c=constans, funkcją c(t,x,y,h) o postaci:

$$c(t,x,y,h) = C_1 - C_2 \frac{dW_k(t,x,y,h)}{dt} \tag{3.2}$$

gdzie:

C_1, C_2 - parametry wyznaczane z pomiarów obniżeń w czasie,

$dW_k(t,x,y,h)/dt$ - prędkość obniżeń, zależna od postaci funkcji określającej wpływy końcowe i szybkości przyrostu wyeksploatowanej objętości pokładów.

Znak minus przed parametrem C_2 wynika z przyjętej konwencji traktowania obniżeń jako wielkości ujemnych.

Wzór (3.2) spełnia wszystkie postulaty wynikające z obserwowanej zmienności parametru c, gdyż prędkość dW_k/dt jest proporcjonalna do prędkości postępu frontu wybierania, maleje ze wzrostem głębokości eksploatacji oraz jest większa w rejonie wpływów bezpośrednich, a mniejsza na zewnątrz pola wybierania.

Stosując (3.2) w równaniu (2.5) otrzymujemy następujące liniowe równanie różniczkowe pierwszego rzędu:

$$\frac{dW(t)}{dt} = [C_1 - C_2 \frac{dW_k(t)}{dt}][W_k(t) - W(t)] \tag{3.3}$$

Proponowane równanie (3.3) zostanie zweryfikowane na podstawie pomiarów nieustalonych (dynamicznych) niecek obniżeniowych. Równanie (3.3) jest zlinearyzowaną wersją równania (2.14).

Celem pracy jest opracowanie wzorów eliminujących obserwowane systematyczne rozbieżności występujące przy opisie obniżeń końcowych oraz próba dokładniejszego wyjaśnienia wpływu czasu i prędkości wybierania na kształt niecki obniżeniowej.

Opracowane wzory powinny być dostatecznie ogólne i dobrze opisywać proces obniżeń w czasie we wszystkich fazach rozwoju eksploatacji. Ponadto, wzory te winny umożliwiać superpozycję wpływów w sposób ogólniejszy od wzorów (2.2), (2.4). Pozwoli to opracować programy komputerowe umożliwiające wykonanie praktycznie dowolnych prognoz obniżeń, nachyleń i krzywizn w czasie.

Zakres pracy obejmuje:

- podanie sposobu poprawy liniowego opisu wpływów dalekich,

- analizę wyników trójosiowego ściskania próbek skał w celu ustalenia wpływu zmian stanu odkształcenia na zmiany objętości,
- dobór postaci funkcji delinearyzującej ΔW i analizę jej własności,
- przykłady dopasowania wzorem autora pomiarów profili ustalonych niecek obniżeniowych,
- weryfikację równania (3.3) na podstawie pomiarów obniżeń w czasie, z określeniem zależności parametrów C_1, C_2 od wartości parametrów charakteryzujących nieckę statyczną,
- analizę wpływu prędkości wybierania na wielkość maksymalnych wskaźników deformacji nieustalonej niecki obniżeniowej,
- wnioski końcowe.

4. OPRACOWANIE OPISU PROFILU USTALONEJ NIECKI OBNIŻENIOWEJ

4.1. Sposób poprawy liniowego opisu wpływów dalekich

Wspólną cechą liniowych teorii W.Budryka-S.Knothego [11,38], J.Litwiniszyna [46], S.Szpetkowskiego [75], B.Drzęźli [15] są wzory opisujące obniżenia w postaci całek z funkcji Gaussa.

Wzory te cechuje bardzo szybki zanik wpływów w pewnej odległości od wyeksploatowanego pola, co prowadzi do dosyć znacznych błędów w ocenie szkodliwości eksploatacji górniczej, szczególnie w obiektach chronionych filarami ochronnymi.

Problem oceny wpływów dalekich wydaje się być szczególnie istotny w południowym rejonie ROW. Stwierdza się tam duże wartości parametru $tg\beta$ i jednocześnie obserwuje się stosunkowo znaczne obniżenia dosyć daleko od wybranych pól ścianowych.

Autor analizując wpływy w rejonie obiektów chronionych filarem szybu nr 6 KWK "Jankowice" dobrą zgodność z pomiarami uzyskiwał przyjmując $tg\beta < 1,5$, gdy w pobliżu wpływy bezpośrednie charakteryzowały się wartością $tg\beta = 2,5$ (rys. 4.4).

Można znacznie poprawić opis obniżeń zewnętrznych rezygnując z gaussowskiej funkcji wpływów. Przykładem mogą być: teoria statystyczno-całkowa T.Kochmańskiego [42], wzory H.Gila, W.Kraja [27] i F.Dymka [20], wyprowadzone dla ośrodka sprężystego lub wzory F.Dymka [19], wyprowadzone dla tzw. ośrodka bezrozporowego Kandaurowa.

Wzory wymienionych teorii cechuje jednak znacznie niższa efektywność numeryczna w porównaniu ze wzorami teorii, w których obniżenie wyrażone jest jeko całka z funkcji Gaussa.

W niniejszej pracy proponuje się bardzo prosty sposób poprawy opisu wpływów dalekich, który można zastosować dla praktycznie dowolnej teorii wpływów. Sposób ten przedstawiono szczegółowo na przykładzie teorii W.Budryka-S.Knothego.

W teorii tej obniżenie opisuje wzór S.Knothego:

$$w(x,y,ag,r,S(t)) = \frac{-ag}{r^2} \iint\limits_{S(t)} \exp\left(-\pi\left[\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{r^2}\right]\right) dS, \quad (4.1)$$

gdzie:

r - promień rozproszenia wpływów wyznaczonych z pomiarów na podstawie wzoru (4.2) lub obliczany ze wzoru $r=h/tg\beta$,

x,y - współrzędne punktu obliczeniowego,

S(t) - powierzchnia wyeksploatowanego pokładu będące najogólniej funkcję czasu t,

ξ, η - współrzędne elementu powierzchni dS,

$a_g = W_{max}$ - maksymalne obniżenie punktu obliczeniowego, które wystąpi, gdy powierzchnia wybrana S wokół punktu obliczeniowego P(x,y) będzie dostatecznie duża.

Dla eksploatacji o kształcie zbliżonym do półpłaszczyzny maksymalne nachylenie obliczone na podstawie wzoru (4.1) osiąga wielkość:

$$T_{max} = \frac{w_{max}}{r} \tag{4.2}$$

Dowolny kształt profilu niecki obniżeniowej uzyskamy sumując cząstkowe obniżenia obliczone wzorem (4.1), przy przyjęciu różnych promieni r_i:

$$w = a_{w1}\, w(r_1) + a_{w2} w(r_2) + \dots + a_{wi} w(r_i) + \dots + a_{wn} w(r_n). \tag{4.3}$$

Współczynniki a_{wi} określają, jaką część wpływów obliczono przyjmując promień rozproszenia r_i.

Gdy powierzchnia wybrana wokół punktu P jest dostatecznie duża, to równanie (4.3) upraszcza się do równania (4.4):

$$w = w_{max} = a_{w1} w_{max} + a_{w2} w_{max} + \dots + a_{wi} w_{max} + \dots + a_{wn} w_{max}. \tag{4.4}$$

Z równania (4.4) wynika, że współczynniki a_{wi} muszą spełniać równanie:

$$a_{w1} + a_{w2} + \dots + a_{wi} + \dots + a_{wn} = 1, \tag{4.5}$$

Maksymalne nachylenie T_{max} obliczone dla wybrania w kształcie półpłaszczyzny na podstawie wzorów (4.3) i (4.2) osiągnie wielkość:

$$T_{max} = a_{w1} \frac{w_{max}}{r_1} + a_{w2} \frac{w_{max}}{r_2} + \dots + a_{wi} \frac{w_{max}}{r_i} + \dots + a_{wn} \frac{w_{max}}{r_n} \tag{4.6}$$

Dzieląc równanie (4.6) przez w_{max} uzyskujemy równanie:

$$\frac{1}{r} = \frac{a_{w1}}{r_1} + \frac{a_{w2}}{r_2} + \dots + \frac{a_{wi}}{r_i} + \dots + \frac{a_{wn}}{r_n} \tag{4.7}$$

Spełnienie równań (4.5) i (4.7) gwarantuje nam uzyskanie wielkości $w = w_{max}$ dla dostatecznie dużego wybrania oraz wielkości T_{max} zgodnej z teorią W.Budryka-S.Knothego.

Dostateczną dowolność kształtowania profilu niecki obniżeniowej można uzyskać ograniczając do dwóch ilość promieni r_i. Wówczas wzory (4.3), (4.4) i (4.7) redukują się do postaci:

$$w = (1-a_w)w(r_1) + a_w w(r_2), \tag{4.8}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1-a_w}{r_1} + \frac{a_w}{r_2} \tag{4.9}$$

Analiza możliwości opisu wzorem (4.8) wyników pomiarów obniżeń, przeprowadzona w oparciu o badania własne i materiał obserwacyjny przedstawiony w pracach S.Szpetkowskiego [75], Z.Rogusza [66] i J.Zycha [84] wskazuje, że parametry a_w, r_1, r_2, powinny spełniać zależności:

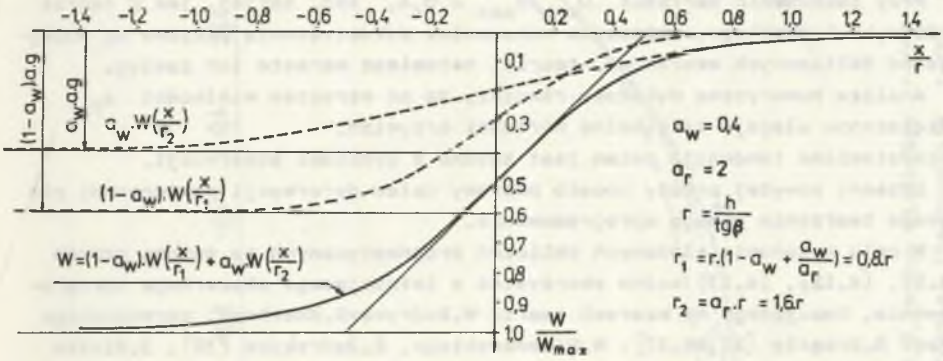
$$a_w = 0.2 \text{ do } 0,5 \quad \text{- udział wpływów } w(r_2) \text{ we wpływach całkowitych}$$

$$a_r = \frac{r_2}{r_1} = 2 \text{ do } 4 \quad \text{- stosunek długości promieni.} \tag{4.10}$$

Jeśli znana jest wielkość promienia rozproszenia wpływów r, to promienie r_1, r_2 spełniające równanie (4.9) można obliczyć ze wzorów:

$$r_1 = r(1 - a_w + \frac{a_w}{a_r}), \tag{4.11}$$

$$r_2 = a_r \cdot r$$



Rys. 4.1. Graficzna interpretacja wzoru (4.8) dla przypadku eksploatacji o kształcie półpłaszczyzny

Fig. 4.1. The graphical interpretation of formula (4.8) for half-plane form exploitation example

Przyjmując założenie, że dla każdego z obniżeń cząstkowych $w(r_1)$, $w(r_2)$ odrębnie spełniona jest hipoteza Awierszyna [1], można uzyskać wzory opisujące ruchy poziome:

$$u_x = -b\, r_1\, (1-a_w)\, \frac{\partial w(r_1)}{\partial x} - b\, r_2\, a_w\, \frac{\partial w(r_2)}{\partial x}\,,$$
$$u_y = -b\, r_1\, (1-a_w)\, \frac{\partial w(r_1)}{\partial y} - b\, r_2\, a_w\, \frac{\partial w(r_2)}{\partial y}\,, \qquad (4.12)$$

gdzie:

u_x - składowa przemieszczenia poziomego w kierunku osi x,

u_y - składowa przemieszczenia poziomego w kierunku osi y,

b - współczynnik proporcjonalności przyjmujący wartość:

$b = 0{,}4$ - według W.Budryka [11],

$b = 0{,}32$ - według E.Popiołka, J.Ostrowskiego [63,64],

$b = \frac{r}{2\pi tg\beta}\,\frac{1-\nu}{\nu}$ - według B.Drzęźli [15] (ν - liczba Poissona).

Przyjmując $a_w = 0{,}4$; $b = 0{,}4$, obliczono wzorami (4.8) i (4.12) poziome rozkłady obniżeń w, przemieszczeń poziomych u_x i odkształceń poziomych $\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$. Wyniki tych obliczeń dla $a_r = 2$, $a_r = 4$ przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 4.2 i 4.3.

Z wykresów widać, że ze wzrostem wartości parametru a_r następuje wzrost obniżeń w miejscach położonych dalej od krawędzi eksploatacji oraz następuje rozszerzenie zasięgu ruchów poziomych.

Przy zachowaniu wartości $u_{max}/w_{max} = 0{,}4$, tzn. takiej, jak w teorii W.Budryka-S.Knothego, obliczone maksymalne odkształcenia poziome są mniejsze od obliczonych wzorem ww. teorii, natomiast wzrasta ich zasięg.

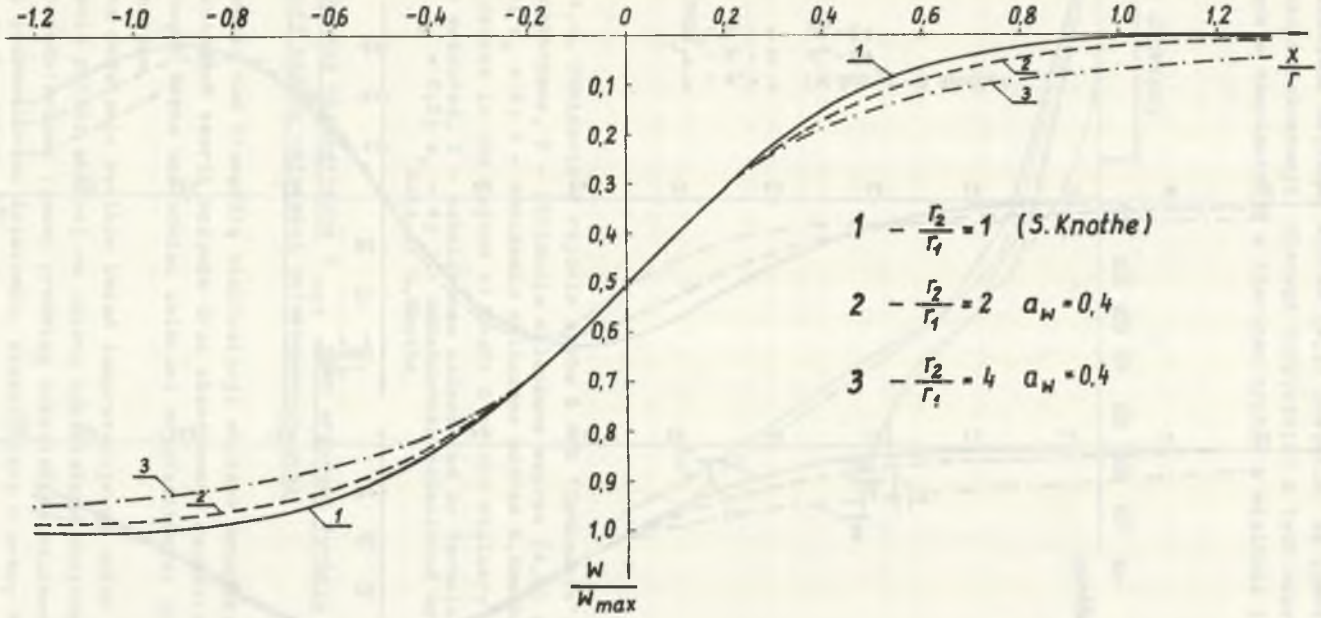
Analiza numeryczna wykazała również, że ze wzrostem wielkości a_r zwiększeniu ulegają maksymalne wartości krzywizn.

Przedstawiona tendencja zmian jest zgodna z wynikami obserwacji.

Opisany powyżej prosty sposób poprawy opisu deformacji powierzchni nie wymaga tworzenia nowego oprogramowania.

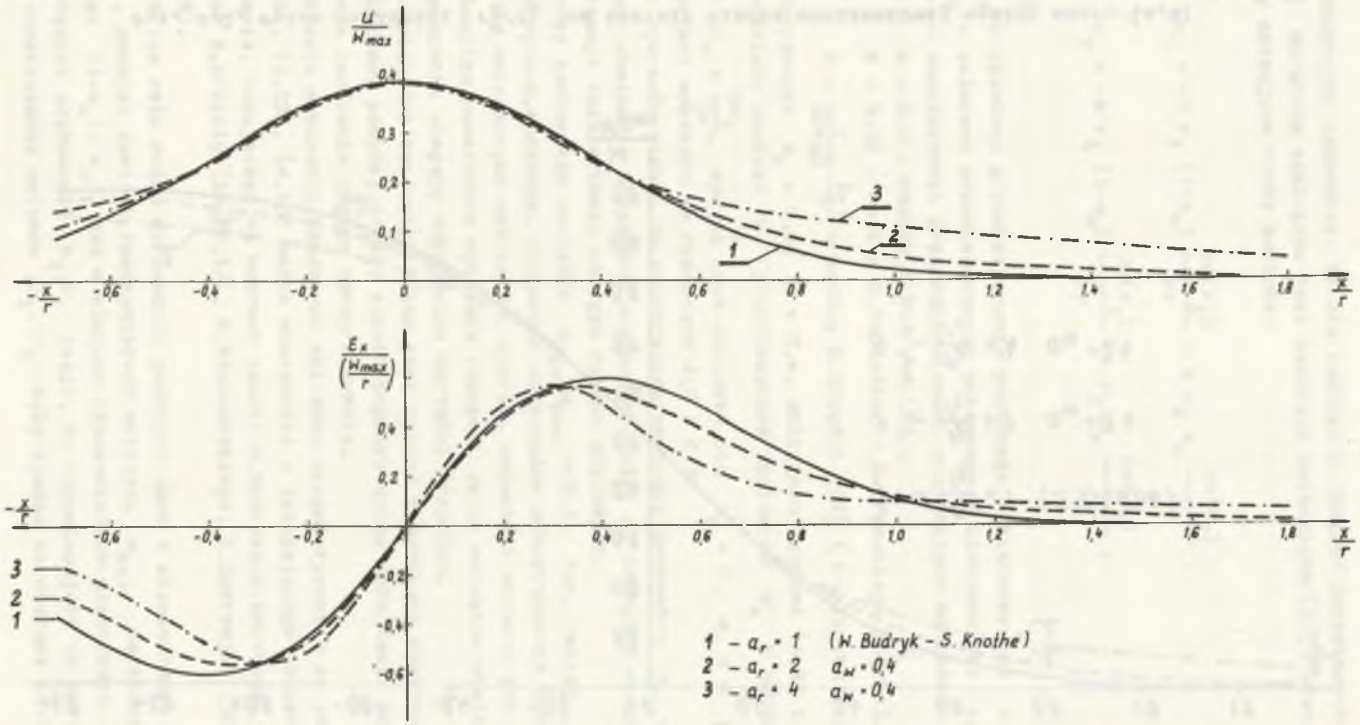
W celu wykonania złożonych obliczeń prognostycznych ze pomocą wzorów (4.8), (4.12), (4.13) można skorzystać z istniejącego obszernego oprogramowania, bazującego na wzorach teorii W.Budryka-S.Knothego, opracowanego przez B.Drzęźlę [15,16,17], W.Piwowarskiego, E.Jędrzejca [32], J.Białka [6,8].

W tym celu można wprowadzić podwójne dane o eksploatacji każdej z parcel, podając zamiast rzeczywistych wartości w_{max}, wartości pomnożone przez $(1-a_w)$, a_w, zaś w miejsce rzeczywistych głębokości h podać zastępcze głębokości h_1, h_2 takie, by odpowiadające im wielkości promieni rozproszenia wpływów r_1, r_2 były zgodne ze wzorami (4.11).



Rys. 4.2. Wpływ wielkości r_2/r_1 na kształt niecki obniżeniowej według wzoru (4.8)

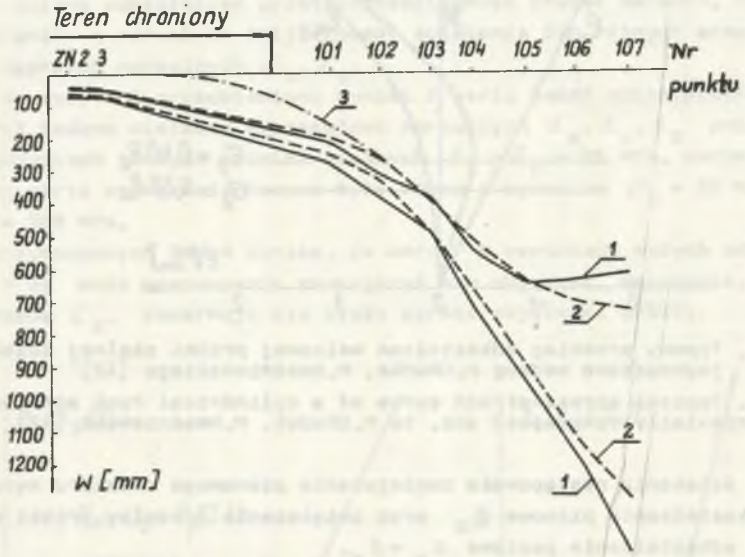
Fig. 4.2. Effect of the quantity r_2/r_1 on the shape of subsidence trough acc. to formula (4.8)



Rys. 4.3. Poziome rozkłady przemieszczeń i odkształceń poziomych obliczone wzorem (4.12) dla różnych wartości $a_r = r_2/r_1$

Fig. 4.3. Horizontal patterns distributions of displacements and horizontal strains calculated by formula (4.12) for various values of $a_r = r_2/r_1$

Profile obniżeniowe uzyskane wzorem (4.3) lub (4.8) są symetryczne względem krawędzi eksploatacji, dlatego korzystając z tych wzorów należy przesunąć krawędzie eksploatacji w kierunku zrobów o wielkość tzw. "obrzeża" d.



Rys. 4.4. Obniżenia w rejonie szybu 6 KWK "Jankowice":
1 - obniżenia pomierzone, 2 - obniżenia obliczone wzorem (4.8) autora dla $a_w = 0,2$; $a_r = 4$; 3 - obniżenia obliczone wzorem S.Knothego

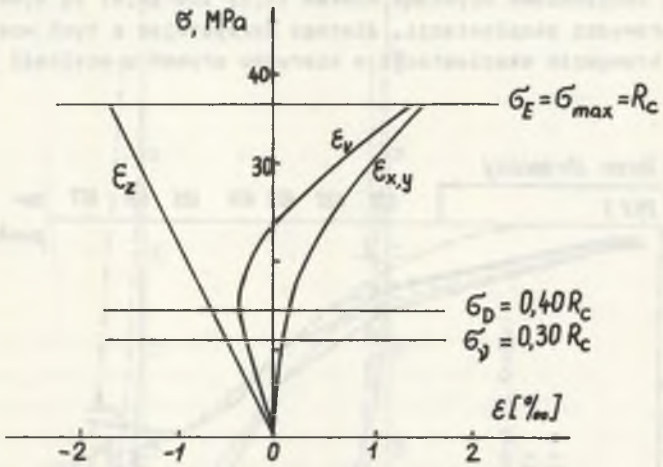
Fig. 4.4. Subsidences in the region of Shaft 6 of the colliery "Jankowice": 1 - subsidences measured, 2 - subsidences calculated by formula (4.8) of the author for $a_w = 0,2$; $a_r = 4$; 3 - subsidences calculated by the formula of S.Knothe

4.2. Odkształcenia oktaedryczne γ_{oct} jako argument funkcji opisującej zmiany objętości deformowanych skał

Fakt występowania nad krawędzią eksploatacji obniżeń mniejszych niż by to wynikało z liniowych teorii wpływów oraz obserwowaną asymetrię profilu niecek obniżeniowych można uzasadniać zmianami objętościowymi górotworu poddanego deformacjom.

Prześledźmy na podstawie wyników badań laboratoryjnych wpływ zmian stanu odkształcenia próbki skalnej na zmianę odkształceń objętościowych.

Na rys. 4.5 przedstawiono typowy przebieg odkształceń walcowej próbki skalnej poddanej jednoosiowemu ściskaniu, zaczerpnięty z pracy M.Chudka, M.Kwaśniewskiego [12].



Rys. 4.5. Typowy przebieg odkształceń walcowej próbki skalnej ściskanej jednoosiowo według M.Chudka, M.Kwaśniewskiego [12]

Fig. 4.5. Typical stress-strain curve of a cylindrical rock specimen uniaxially compressed acc. to M.Chudek, M.Kwaśniewski [12]

W wyniku ściskania następowało zmniejszenie pionowego rozmiaru wyrażone przez odkształcenie pionowe ε_z oraz zwiększenie średnicy próbki wyrażone przez odkształcenia poziome $\varepsilon_x = \varepsilon_y$.

Miernikiem zmian objętościowych jest tu dylatacja Θ.

$$\Theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{4.13}$$

Z przeprowadzonego doświadczenia (rys. 4.5) wynika, że dla małych wartości ε_z dylatacja jest ujemna, tzn. próbka zmniejsza swą objętość, a następnie ze wzrostem ε_z następuje wzrost objętości próbki, trwający aż do jej zniszczenia.

Na ogół wszystkie fizykalno-liniowe rozwiązania teorii sprężystości opisują tę część procesu deformacji, w której następuje niemal liniowy spadek objętości próbki skalnej. W teorii plastyczności przyjmuje się najczęściej upraszczające założenie, że zmiana objętości jest pomijalnie mała.

Maksymalne odkształcenia skał ściskanych jednoosiowo są bardzo małe. W cytowanym doświadczeniu próbka uległa zniszczeniu, gdy odkształcenie pionowe osiągnęło wielkość ε_z = -1,74 mm/m.

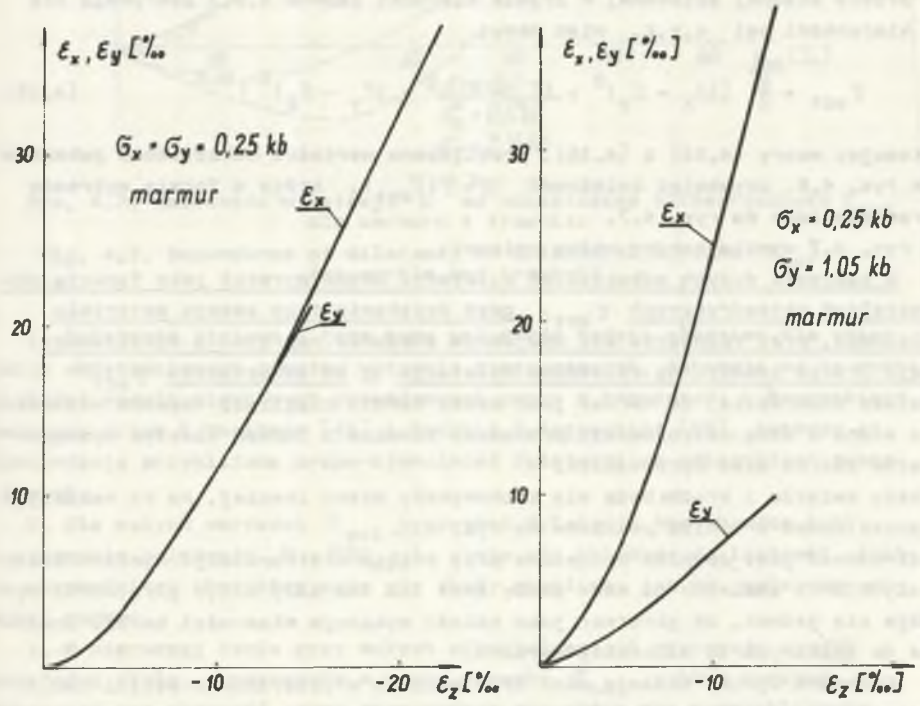
Odkształcenia górotworu i powierzchni zaistaniałe w wyniku eksploatacji górniczej są z reguły znacznie większe, osiągając w niektórych przypadkach wartość kilku procent. Jest to możliwe dzięki trójosiowemu stanowi naprężeń i odkształceń panującemu wewnątrz górotworu.

W literaturze dotyczącej badań mechanicznych własności skał praktycznie nie ma wyników badań zmian objętości skał poddanych trójosiowemu ściskaniu, gdyż trudność techniczną stanowi pomiar dużych odkształceń w komorze trójosiowej.

Do unikalnych należy zaliczyć wyniki badań Kiyoo Mogi [34], który badał zmiany odkształceń prostopadłościennych próbek marmuru, trachitu i granitu w warunkach trójosiowego ściskania dla różnych stosunków wartości naprężeń normalnych σ_x, σ_y.

Na rys. 4.6 przedstawiono wyniki 2 serii badań odkształceń. W pierwszej serii badano wielkość odkształceń normalnych $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ próbki marmuru w warunkach równych ciśnień bocznych $\sigma_x = \sigma_y = 25$ MPa, natomiast w drugiej serii naprężenia boczne były różne i wynosiły $\sigma_x = 25$ MPa, $\sigma_y = 105$ MPa.

Z przytoczonych badań wynika, że marmur w warunkach małych odkształceń $\varepsilon_z < 1\%$ może nieznacznie zmniejszyć swę objętość. Następnie, w miarę wzrostu ε_z, obserwuje się stały wzrost objętości próbki.



Rys. 4.6. Odkształcenia ściskanej trójosiowo próbki marmuru według K.Mogi [34]

F g 4.6. Strains of a triaxially compressed marble specimen acc. to K.Mogi [34]

Dla potrzeb niniejszej pracy konieczne było znalezienie funkcji φ opisującej zmiany objętości próbki w warunkach dużych odkształceń. Argumentów funkcji φ poszukiwano wśród niezmienników dewiatora stanu odkształcenia, gdyż zmiany objętości skały są niezależne od przyjętego kierunku osi współrzędnych układu pomiarowego.

W mechanice ośrodków ciągłych, teorii plastyczności i wytrzymałości materiałów bardzo ważną rolę odgrywa niezmiennik kwadratowy dewiatora stanu odkształcenia i wywodzące się z niego odkształcenie oktaedryczne γ_{oct} [80] wyrażone wzorem:

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3}\left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\right]^{0.5} \tag{4.14}$$

gdzie:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - odkształcenia główne.

Wielkość γ_{oct} opisuje zmiany, jakim podlega elementarny ośmiościan zbudowany na kierunkach osi głównych.

W próbce skalnej ściskanej w prasie kierunki główne 1,2,3 pokrywają się z kierunkami osi x,y,z, więc mamy:

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3}\left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2\right]^{0.5} \tag{4.15}$$

Stosując wzory (4.13) i (4.15), przeliczono wartości odkształceń pokazane na rys. 4.6, uzyskując zależność $\Theta = \varphi(\gamma_{oct})$, którą w formie wykresów przedstawiono na rys. 4.7.

Z rys. 4.7 wynika bardzo ważny wniosek:

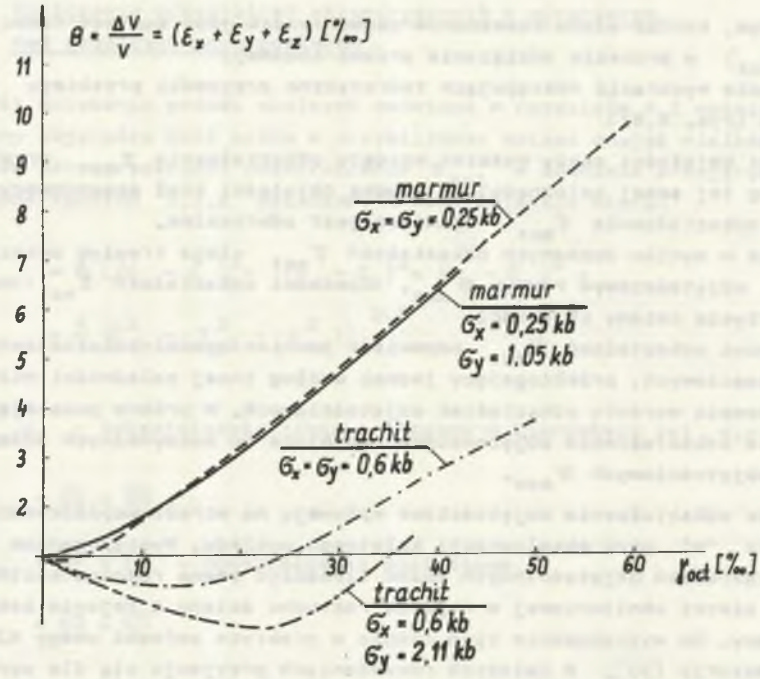
<u>W zakresie dużych odkształceń dylatację można wyrazić jako funkcję odkształceń oktaedrycznych γ_{oct}, gdyż ściskanie tego samego materiału skalnego, przy różniącym się wzajemnym stosunku naprężeń i odkształceń, daje prawie identyczną zależność dylatacji Θ od odkształceń γ_{oct}</u>

Należy podkreślić, że marmur jest skałą bardzo ciągliwą. Podobne własności można z dużą ostrożnością przypisać iłowcom i łupkom ilastym występującym pośród skał karbońskich.

Skały zwięzłe i kruche będą się zachowywały nieco inaczej, na co wskazują wyniki badań trachitu pokazane na rys. 4.7.

Ostrożność jest również konieczna przy próbie ekstrapolacji wyników badań małych prób skalnych na duże próby skał lub na cały masyw górotworu. Wydaje się jednak, że górotwór jako całość wykazuje własności bardzo podobne do opisanych tu własności marmuru.

Omówione wyniki badania skał oraz opisane w literaturze wyniki badań materiałów sypkich wskazują, że zależność dylatacji od odkształcenia oktaedrycznego γ_{oct} może być opisana przy użyciu następujących typów funkcji (rys. 4.7):



Rys. 4.7. Zależność dylatacji Θ od odkształceń oktaedrycznych γ_{oct} dla marmuru i trachitu

Fig. 4.7. Dependence of dilatancy on octahedral strains γ_{oct} for marble and trachyte

1. Zależność liniowa - tego typu zależność będzie właściwa dla opisu zmian objętościowych gruntów wstępnie zagęszczonych. Wskazują na to wyniki badań modeli piaskowych prowadzonych przez D.Krzyształoń, L.Rogowskiego, omówione przez S.Knothego [41] i badania J.Rogowskiej [65]. Autorzy ci stwierdzają przybliżoną proporcjonalność dylatacji do odkształceń postaciowych.

2. Dla małych wartości γ_{oct} przyrost dylatacji jest bardzo mały, a następnie zależność $\Theta = \varphi(\gamma_{oct})$ staje się zbliżona do liniowej. Takimi własnościami charakteryzują się skały ciągliwe, jak np. opisywany powyżej marmur.

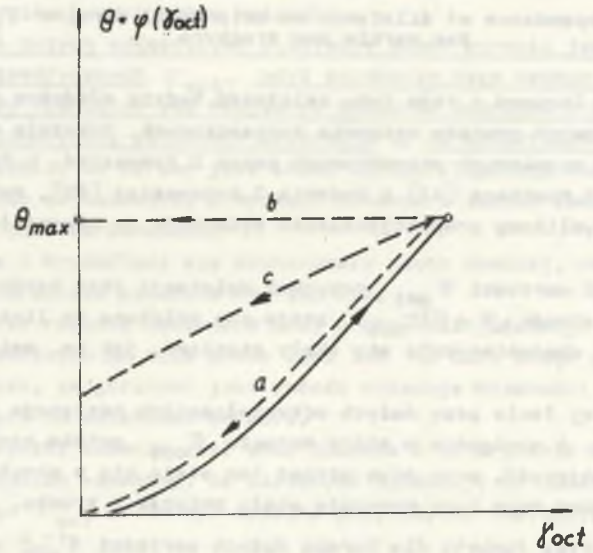
3. W pierwszej fazie przy małych odkształceniach następuje spadek objętości skały, a następnie w miarę wzrostu γ_{oct} próbka zaczyna zwiększać swą objętość, przy czym wzrost ten staje się w przybliżeniu liniowy. Własności tego typu wykazują skały zwięzłe i kruche.

Wszystkie 3 typy funkcji dla bardzo dużych wartości γ_{oct} muszą zmieniać przebieg z niemal liniowego, dążąc do pewnej wielkości stałej, gdyż skała nie może nieograniczenie zwiększać swej objętości.

Osobnym, bardzo słabo rozeznanym zagadnieniem jest kształt funkcji $\Theta = \varphi(\gamma_{oct})$ w procesie odciążania próbki skalnej.
Można sobie wyobrazić następujące teoretyczne przypadki przebiegu tego zjawiska (rys. 4.8):

a) Wzrost objętości skały wskutek wzrostu odkształcenia γ_{oct} przebiega według tej samej zależności co spadek objętości skał spowodowany spadkiem odkształcenia γ_{oct} - zjawisko jest odwracalne.
b) Próbka w wyniku doznanych odkształceń γ_{oct} ulega trwałym odkształceniom objętościowym równym Θ_{max}. Spadkowi odkształceń γ_{oct} nie towarzyszą zmiany objętości.
c) Spadkowi odkształceń γ_{oct} odpowiada pewnien spadek odkształceń objętościowych, przebiegający jednak według innej zależności niż w procesie wzrostu odkształceń objętościowych. W próbce powstają trwałe odkształcenia objętościowe, mniejsze od maksymalnych odkształceń objętościowych Θ_{max}.

Trwałe odkształcenia objętościowe wpływają na wzrost współczynnika osiadania "a" przy eksploatacji kolejnego pokładu. Występowaniem trwałych odkształceń objętościowych można tłumaczyć pewne różnice kształtu profili niecki obniżeniowej w rejonie rozruchu ściany i rejonie zakończenia ściany. Na występowanie tych różnic w praktyce zwracał uwagę K.Greń i współautorzy [30]. W dalszych rozważaniach przyjmuje się dla uproszczenia, że proces zmian objętościowych jest procesem odwracalnym.



Rys. 4.8. Typowe zależności $\Theta = \varphi(\gamma_{oct})$ dla próbki skalnej obciążanej i odciążanej

Fig. 4.8. Typical dependences $\Theta = \varphi(\gamma_{oct})$ for a rock specimen loaded and relieved

4.3. Obliczanie odkształceń oktaedrycznych w górotworze nad eksploatowanym pokładem

Wyniki ściskania próbek skalnych omówione w rozdziale 4.2 wskazują, że zmiany objętości skał można w przybliżeniu opisać znając wielkość odkształceń oktaedrycznych. Odkształcenie γ_{oct} w dowolnie przyjętym układzie współrzędnych x,y,z obliczamy z następującego wzoru:

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3}\left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \frac{4}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)\right]^{0.5} \tag{4.16}$$

gdzie:

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - odkształcenia liniowe liczone w kierunkach osi x,y,z,

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y},$$

$$\gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{- odkształcenia postaciowe,} \tag{4.17}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x},$$

u, v, w - składowe wektora przemieszczenia w kierunkach osi x,y,z.

Przebieg składowej pionowej "w" ruchów górotworu jest dość dobrze zbadany. Istotną trudność sprawia opis ruchów poziomych wewnątrz górotworu nad eksploatowanym pokładem. Opisy składowych poziomych u,v, proponowane przez różnych autorów, różnią się nawet jakościowo.

Zgodnie z teoriami W.Budryka-S.Knothego, T.Kochmańskiego, J.Litwiniszyna, S.Szpetkowskiego w całym górotworze nad eksploatowanym pokładem wektor przemieszczeń poziomych jest skierowany w stronę zrobów. Według B.Drzęźli [15] w pobliżu krawędzi pokładu, blisko stropu, wektor przemieszczeń poziomych skierowany jest w stronę calizny eksploatowanego pokładu, a w pobliżu powierzchni wektor przemieszczeń poziomych jest skierowany zawsze w stronę zrobów. Rozwiązanie B.Drzęźli wyjaśnia "nienormalny" przebieg ruchów poziomych obserwowany w trakcie eksploatacji filara ochronnego szybu Szymon [61].

Wobec istniejącej różnicy poglądów odnośnie do przebiegu ruchów poziomych oraz uwzględniając fakt, że składowe poziome u,v są znacznie mniejsze od składowej pionowej, w dalszych rozważaniach obliczając γ_{oct} pominięto wpływ ruchów poziomych, przyjmując:

$$u = 0; \quad v = 0;$$

a stąd: $\varepsilon_x = 0$; $\varepsilon_y = 0$; $\gamma_{xy} = 0$;

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x}\ ; \qquad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} \tag{4.18}$$

Wstawiając związki (4.18) do wzoru (4.16), pomijamy wpływ ruchów poziomych na wartość γ_{oct}, uzyskując uproszczony wzór:

$$\gamma_{oct} = \left(\frac{2}{3}\right)^{0.5} \left(\frac{4}{3}\varepsilon_z^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right)^{0.5} \tag{4.19}$$

W dalszych rozważaniach, dla wygody, zamiast wielkości γ_{oct} określonej wzorem (4.19), stosowana będzie wielkość γ, różniąca się stałym mnożnikiem od wielkości γ_{oct}.

$$\gamma = \left(\frac{4}{3}\varepsilon_z^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right)^{0.5} \tag{4.20}$$

Przyjmując, że do liniowego opisu ruchów pionowych stosowany będzie wzór (4.1) S.Knothego, odkształcenie pionowe ε_z występujące w (4.20) można obliczyć według wzoru:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{r}{2\pi}\frac{dr(z)}{dz}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right), \tag{4.21}$$

Rezygnując z możliwości analizy wpływu pionowego rozkładu wielkości promienia rozproszenia wpływów $r(z)$ w górotworze na wielkość wyrażenia $\frac{4}{3}\varepsilon_z^2$, wzór (4.20) można przedstawić w postaci:

$$\gamma = \left(\left[A_2 r\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\right]^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right)^{0.5} \tag{4.22}$$

gdzie:

A_2 - parametr wyznaczany z pomiarów lub szacowany zgodnie ze wzorem:

$$A_2 = \frac{1}{\pi\sqrt{3}}\frac{dr}{dz}, \tag{4.23}$$

Dla teoretycznego przypadku eksploatacji w kształcie półpłaszczyzny, zgodnie ze wzorem (4.22), $\gamma(z)$ nad krawędzią eksploatacji osiąga wielkość:

$$\boxed{\gamma(z)_{x=0} = |T_{max}| = \frac{w_{max}}{r(z)}}, \tag{4.24}$$

Jeśli porównamy wzór (4.22) ze wzorem (2.2), zaproponowanym przez K.Grenia lub wzorem (2.4), stosowanym przez J.Zycha, to okaże się, że wzory te są szczególnymi przypadkami ogólniejszego wzoru (4.25):

$$W_k = w + A_1 \frac{r}{w_{max}} \tau^2 , \qquad (4.25)$$

gdzie:

w - liniowa część obniżeń liczona zgodnie ze wzorem (4.1) S.Knothego,

W_k - obniżenie całkowite,

A_1 - współczynnik ujmujący stopień asymetrii wpływów.

Wzór (2.2) uzyskamy ze wzoru (4.25) przyjmując, że zagadnienie jest dwuwymiarowe, tzn. $\frac{\partial w}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$; natomiast wzór (2.4) można uzyskać, przyjmując we wzorze (4.22) $A_2 = 0$.

Stwierdzona zależność pomiędzy odkszkałceniem τ a dość dobrze opisującymi obniżenia wzorami (2.2) i (2.4) pośrednio stanowi potwierdzenie tezy o możliwości stosowania odkształcenia τ (lub τ_{oct}) do opisu asymetrii profilu i niecki obniżeniowej. Świadczy również o istnieniu wyraźnych związków pomiędzy dość odległymi metodologicznie wynikami badań laboratoryjnych i wynikami pomiarów obniżeń powierzchni.

4.4. Dobór postaci funkcji $\Delta W(\varphi(\tau))$ dla opisu asymetrycznego profilu ustalonej niecki obniżeniowej

Jak stwierdzono w rozdziale 4.2, argumentem funkcji opisującej zmiany objętości górotworu może być odkształcenie oktaedryczne τ. Pomijając w rozważaniach ruchy poziome, można w uproszczeniu przyjąć, że zmiana objętości elementu górotworu powoduje zwiększenie istniejących liniowych odkształceń pionowych ε_z o nieliniowy przyrost $\Delta\varepsilon_z$, którego wielkość zależy od pewnej funkcji $\varphi(\tau)$ opisującej ten przyrost.

Zagadnienie desymetryzacji profilu niecki obniżeniowej wskutek zmian objętości ośrodka stochastycznego było rozważane przez J.Litwiniszyna i A.Smolarskiego [53]. W celu uzyskania równania profilu niesymetrycznej niecki obniżeniowej autorzy rozwiązują nieliniowe równanie różniczkowe o postaci:

$$\frac{\partial w(x,z)}{\partial z} = B \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \beta w \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 , \qquad (4.26)$$

W równaniu (4.26) autorzy przyjmują, głównie ze względu na prostotę obliczeń, że nieliniowy przyrost $\Delta\varepsilon_z$ jest zależny od kwadratu nachyleń.

Uzyskanie analogicznego rozwiązania dla przypadku czasoprzestrzennego, przy przyjęciu innej postaci funkcji delinearyzującej, prowadzi do bardzo złożonego problemu matematycznego.

Zagadnienie poszukiwania funkcji opisującej nieliniowy profil niecki obniżeniowej można znacznie uprościć przyjmując, że przyrost odkształceń $\Delta\varepsilon_z$ zależy wyłącznie od odkształceń γ liczonych na podstawie liniowej teorii wpływów, tzn. pomija się wpływ zmian objętości na wartość odkształceń γ, które te zmiany powodują.

W tym ujęciu nieliniowy profil niecki obniżeniowej W można opisać jako sumę obniżeń liniowych w i nieliniowej poprawki $\Delta W[\varphi(\gamma)]$. Ścisłe obliczenie poprawki ΔW wymaga znajomości rozkładu odkształceń γ w całej przestrzeni górotworu, w której te odkształcenia zaistniały, gdyż trzeba przyjąć, że każda lokalna zmiana objętości ulega w górotworze wtórnemu rozproszeniu.

Zgodnie z powyższym poprawkę ΔW można określić jako całkę potrójną po przestrzeni V górotworu z iloczynu funkcji $\bar{\bar{\varphi}}(\gamma)$ określającej zmianę objętości przez funkcję f, opisującą proces rozpraszania w górotworze lokalnych zmian objętości.

$$\Delta W(x,y,x) = \iiint_V A\bar{\bar{\varphi}}[\gamma(\xi,\eta,\zeta)]\ f(\xi-x,\eta-y,\zeta-z)\ d\xi\ d\eta\ d\zeta \qquad (4.27)$$

Wzór (4.27) stwarza możliwość doboru funkcji $\bar{\bar{\varphi}}$ na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Funkcja φ może być dosyć dowolnie dobrana w szczególności może miec nawet nieciągłe drugie pochodne. Obliczanie poprawki ΔW zgodnie z powyższym wzorem jest jednak niezwykle czasochłonne, stąd konieczność szukania uproszczonych formuł, które kosztem pewnych ograniczeń pozwalałyby obliczać poprawkę ΔW z wystarczającą dla potrzeb praktyki dokładnością.

Pierwsze zasadnicze uproszczenie wzoru (4.27) polega na założeniu, że w górotworze nie następuje proces wtórnego rozproszenia wpływów, tzn. $f(\xi-x,\eta-y,\zeta-z) \equiv 1$.

Wówczas dla obliczenia poprawki ΔW wystarczy znajomość rozkładu odkształceń γ wzdłuż linii pionowej od stropu pokładu do punktu obliczeniowego $P(x,y,z)$.

$$\Delta W(x,y,z) = \int_0^z \bar{A}_1\bar{\varphi}(\gamma(x,y,\zeta)\ d\zeta \qquad (4.28)$$

Dla zachowania ciągłości funkcji ΔW i jej pochodnych konieczne jest przyjęcie założenia, że w stropie pokładu promień rozproszenia wpływów jest większy od zera (co jest zgodne z wynikami rozwiązania B.Drzęźli [15]) lub że funkcja $\bar{\varphi}$ jest ograniczona.

Wzór (4.28) po odpowiedniej specyfikacji funkcji $\bar{\varphi}$ umożliwia superpozycję obniżeń spowodowanych eksploatacją prowadzoną na różnych głębokościach. Obliczanie obniżeń z uwzględnieniem rozwoju eksploatacji w czasie na podstawie tego wzoru jest jednak nadal bardzo czasochłonne.

Mając na uwadze cel pracy, tzn. opis obniżeń powierzchni w czasie, aby nie wnikać w całą złożoną problematykę ruchów wnętrza górotworu, dokonano

kolejnego uproszczenia, polegającego na zastąpieniu całki (4.28) jej wartością średnią. Otrzymano w ten sposób wzór (4.29) opisujący poprawkę ΔW dla punktu $P(x,y)$, znajdującego się na powierzchni.

$$\Delta W(x,y) = A_1 h \varphi(\gamma(x,y,\bar{z})), \tag{4.29}$$

gdzie:

h - głębokość eksploatacji,

$\bar{z}$ - wysokość średniego poziomu obliczeniowego wewnątrz górotworu,

A_1 - współczynnik ujmujący stopień delinearyzacji obniżeń.

Wzór (4.29) wskutek dokonanych uproszczeń stanowi bardzo odległą analogię wzoru (4.27). Stosowanie wzoru (4.29) eliminuje z rozważań przypadki sumowania obniżeń spowodowanych eksploatacją pokładów różniących się znacznie głębokością. Wyniki doświadczeń laboratoryjnych mogą mieć jedynie pomocnicze znaczenie przy ustalaniu postaci funkcji φ we wzorze (4.29).

Dokonane uproszczenia przy przejściu od wzoru (4.27) do wzoru (4.29) spowodowały znaczne zawężenie możliwych postaci funkcji φ. Stosując wzór (4.29) zrezygnować trzeba z liniowej postaci funkcji $\varphi(\gamma) = \gamma$ gdyż funkcja $\gamma(x,y,z)$ posiada lokalne nieciągłości drugich pochodnych względem współrzędnych x,y.

Analiza numeryczna wskazuje, że ciągłe pochodne drugiego rzędu posiada funkcja $\varphi(\gamma) = \gamma^2$. Zastosowanie we wzorze (4.29) funkcji $\varphi = \gamma^2$ prowadzi jednak do sprzecznego z obserwacją wniosku, że przy dwukrotnym zwiększeniu wielkości w_{max} nastąpi czterokrotne zwiększenie wielkości ΔW nad krawędzią eksploatacji.

Poszukując funkcję φ ciągłą, liniową względem wielkości $w_{max} = sg$ i dobrze opisującą zdelinearyzowany profil niecki obniżeniowej dochodzimy do wniosku, że poprawka ΔW może mieć ogólną postać:

$$\Delta W = A_1 h \, \phi\left(\gamma^2, A_3 \frac{w}{h}\right) \tag{4.30}$$

lub:

$$\Delta W = A_1 r \, \phi\left(\gamma^2, A_3 \frac{w}{r}\right) \tag{4.31}$$

W opracowanych przez autora [8] programach komputerowych serii EDN, służących do wykonywania prognoz deformacji powierzchni, ze śledzeniem ekstremalnych w czasie wartości wskaźników deformacji, zastosowano funkcję ΔW o następującej postaci:

$$\Delta W(x,y) = A_1 \left(\left[2\,[r_1 \gamma(x,y,r_1)]^2 + w(x,y,r_2)^2 \right]^{0.5} - w(x,y,r_2) \right) \tag{4.32}$$

gdzie:

r_1, r_2 - dwa różne promienie rozproszenia wpływów. Promienie r_1, r_2 są zależne od A_1 i od wielkości $r = \frac{h}{tg\beta}$. Dobierane są w ten sposób, by maksymalne nachylenie T_{max} dla teoretycznego przypadku eksploatacji w kształcie półpłaszczyzny było zgodne ze wzorem S.Knothego,

A_1 - bezwymiarowy parametr określający stopień zdelinearyzowania profilu obniżeniowego.

Wzór (4.32) umożliwia nieliniową superpozycję wpływów dowolnie rozmieszczonej eksploatacji górniczej, prowadzonej w różnych pokładach zalegających na podobnej głębokości. Dla pojedynczej parceli wyniki obliczeń są bardzo zbliżone do wyników uzyskiwanych wzorem (2.4) J.Zycha.

Wadą wzoru (4.32), podobnie zresztą jak i wzoru (2.4), jest niezadowalający opis obniżeń w niepełnych nieckach obniżeniowych.

Nieco lepszy opis pomierzonych obniżeń, szczególnie w niepełnych nieckach obniżeniowych, można uzyskać stosując następującą funkcję:

$$\boxed{\Delta W = -A_1 \left(2 + \frac{A_3}{2}\right) \frac{w(r_1)\left[r_1 \gamma(r_1)\right]^2}{A_3 w(r_2)^2 + \left[r_1 \gamma(r_1)\right]^2}} \qquad (4.33)$$

gdzie:

A_1, r_1, r_2 - jak we wzorze (4.32),

A_3 - parametr o możliwym zakresie wielkości $0 \ll A_3 < \infty$.

Zgodnie ze wzorami (4.32) i (4.33) wielkość ΔW przy pojedynczym wybraniu będzie proporcjonalna do wielkości $w_{max} = ag$, gdyż liniowo względem w_{max} wzrastają wielkości $w(r_1)$, $w(r_2)$ i $\gamma(r_2)$. Eksploatując uprzednio jeden lub więcej pokładów na dostatecznie dużym obszarze, w miejscach gdzie wykształciła się pełna niecka obniżeniowa, odkształcenie oktaedryczne γ posiada zerową wielkość. W czasie eksploatacji kolejnego i-tego pokładu wielkość $r\gamma$ będzie proporcjonalna do obniżenia powodowanego i-tym pokładem, a obniżenia $w(r_1)$, $w(r_2)$ będą sumą obniżeń spowodowanych eksploatacją wszystkich pokładów. W efekcie stosując wzory (4.32) lub (4.33), obliczone ΔW dla i-tego pokładu będzie znacznie mniejsze od wielkości ΔW obliczonej dla tego samego pokładu, lecz eksploatowanego w pierwszej kolejności. Opisany powyżej efekt jest stwierdzany pomiarami [77].

W dalszej części pracy stosowany będzie wzór (4.33).

5. POSTAĆ I WŁASNOŚCI WZORU OPISUJĄCEGO PROFIL USTALONEJ NIECKI OBNIŻENIOWEJ

5.1. Postać wzoru (5.1)

Wzór (5.1), opisujący końcowy zdelinearyzowany profil niecki obniżeniowej, otrzymano sumując obniżenia liniowe określone wzorem (4.8) i nieliniową poprawkę ΔW określoną wzorem (4.33).

$$\boxed{W_k(t) = (1-a_w)w(r_1) + a_w w(r_2) - A_1\left(2 + \frac{A_3}{2}\right) \frac{w(r_1)\,[r_1\gamma(r_1)]^2}{A_3 w(r_2)^2 + [r_1\gamma(r_1)]^2}} \quad (5.1)$$

gdzie:

$W_k(t)$ - obniżenia zdelinearyzowane, które mogą być funkcją czasu t, jeśli uwzględnimy w obliczeniach zależność wybranej powierzchni pokładów S od czasu.
Indeks k oznacza, że są to obniżenia obliczone bez uwzględnienia zjawiska opóźnienia obniżeń w czasie.

$w(r_1), w(r_2)$ - obniżenia obliczone wzorem (4.1) liniowej teorii WB-SK, dla dwóch różnych promieni rozproszenia wpływów r_1, r_2,

$\gamma(r_1)$ - odkształcenie oktaedryczne obliczone wzorem (4.22),

$$\gamma(r_1)^2 = \left[\frac{\partial w(r_1)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial w(r_1)}{\partial y}\right]^2 + \left[A_2 r_1 \left(\frac{\partial^2 w(r_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(r_1)}{\partial y^2}\right)\right]^2$$

Składowe nachyleń $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$ i krzywizn $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ obliczamy przyjmując, że liniowe obniżenie w opisuje wzór (4.1).

5.2. Specyfikacja parametrów wzoru (5.1)

Dla obliczenia wzorem (5.1) obniżeń W_k konieczna jest znajomość parametrów $a, a_w, r_1, r_2, A_1, A_2, A_3$. Duża ilość parametrów teoretycznie umożliwia bardzo dokładny opis obserwowanych obniżeń.

Jednoczesna specyfikacja wszystkich wymienionych parametrów wymaga bardzo obszernego zakresu wyników obserwacji, obrazujących rozwój obniżeń po wybraniu kolejnych ścian w kilku pokładach.

W praktyce na ogół nie dysponujemy takimi wynikami, dlatego aby ograniczyć do niezbędnego minimum ilość specyfikowanych parametrów, wyodrębniono grupę parametrów podstawowych wyznaczanych z pomiarów oraz grupę parametrów stałych lub funkcyjnie zależnych od wartości parametrów podstawowych.

Za podstawowe uznano parametry $tg\beta, A, a$, które można jednoznacznie wyznaczyć na podstawie profilu pełnej ustalonej niecki obniżeniowej, tj.:

$$tg\beta = \frac{h}{r} = \frac{h\ T_{max}}{W_{max}}, \tag{5.2}$$

$tg\beta$ - parametr teorii W.Budryka-S.Knothego określony na podstawie pomierzonych maksymalnych nachyleń T_{max}, maksymalnego obniżenia W_{max} przy znanej głębokości eksploatacji h,

a - współczynnik eksploatacyjny wyznaczany na podstawie pomierzonego W_{max} pełnej niecki obniżeniowej i wysokości furty eksploatacyjnej nej g.

$$a = \frac{W_{max}}{g}, \tag{5.3}$$

A_1 - bezwymiarowy współczynnik ujmujący asymetrię profilu niecki obniżeniowej, posiadający takie samo znaczenie jak we wzorach K.Grenia (2.2) lub J.Zycha (2.4). Można w przybliżeniu przyjąć, że wielkość obrzeża "d" jest proporcjonalna do wielkości parametru A_1.
Wartości najczęściej obserwowane: $A_1 = 0{,}1 \div 0{,}25$.
Wartości skrajne zaobserwowane przez autora:

$A_1 = 0{,}07$ (KWK Jankowice), $A_1 = 0{,}317$ (KWK Ziemowit).

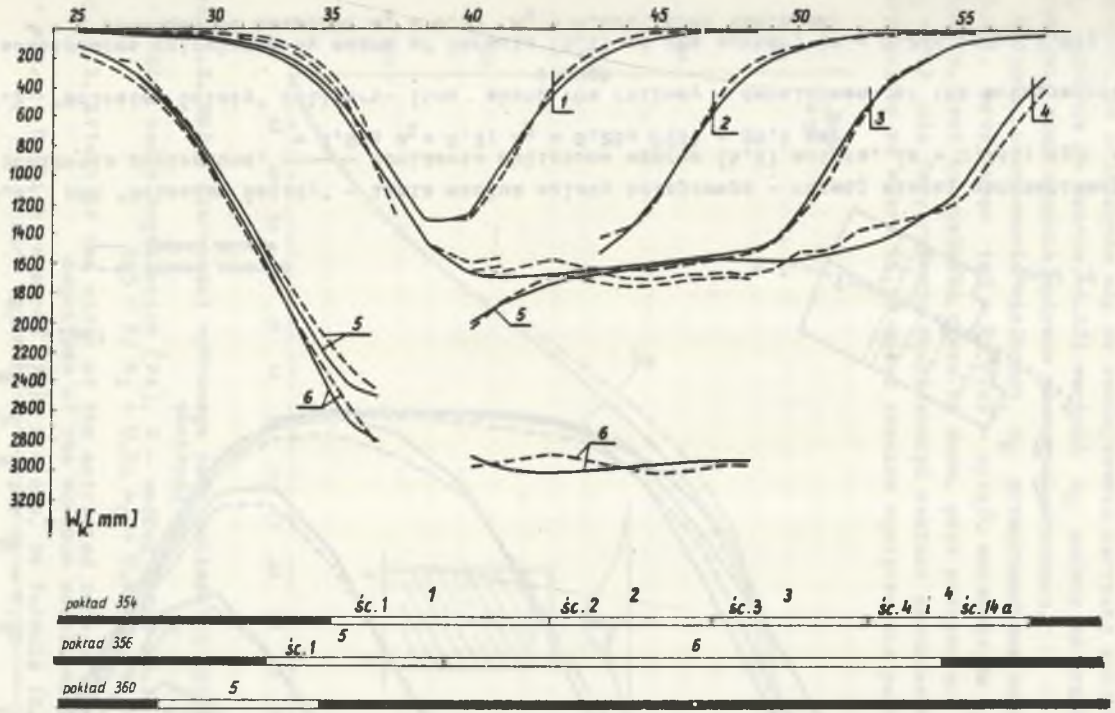
Dla wyznaczenia A_1 konieczna jest znajomość wartości obniżenia W(x=0) nad krawędzią eksploatacji:

$$A_1 = \frac{\Delta W(x=0)}{W_{max}} = \frac{(W_{max} - W_k(x=0))}{W_{max}} \tag{5.4}$$

Specyfikacji wartości pozostałych parametrów dokonano na podstawie wyników prac [56,66,75,77,84] oraz analizy własnej (rozdz. 6) 8 linii obserwacyjnych, kierując się możliwością uzyskania najlepszego, w sensie metody najmniejszych kwadratów, opisu wszystkich dostępnych autorowi wyników pomiarów obniżeń.

Poniżej przedstawiono rezultaty tej analizy, omawiając jednocześnie wpływ wielkości poszczególnych parametrów na kształt niecki obniżeniowej.

A_2 - parametr określający udział drugich pochodnych $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ w wielkości odkształcenia oktaedrycznego τ.

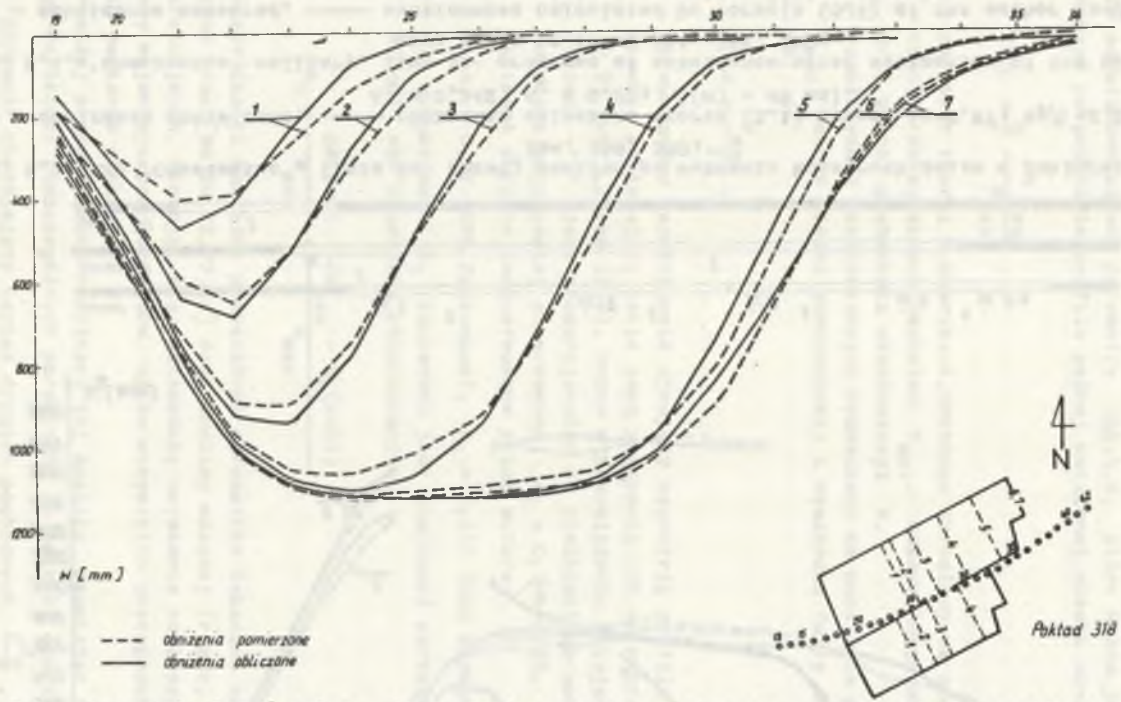


Rys. 5.1. KWK "Chwałowice", linia 1a- rozwój obniżeń po wybraniu kolejnych ścian w pokładach 354, 356, 360:

- - - obniżenia pomierzone, ——— obniżenia obliczone wzorem (5.1) autora (a=0,97; $tg\beta$ =2,267; A_1 = 0,142: A_2 = 0,25; $\delta(W)$ = 49 mm)

Fig. 5.1. "Chwałowice" colliery, line 1a- progress of subsidence after extraction of the successive walls in seams 354, 356, 360:

- - - subsidence measured, ——— subsidences calculated by formula (5.1) of the author (a=0,97; $tg\beta$ = 2,267; A_1 = 0,142; A_2 = 0,25, $\delta(W)$ = 49 mm)

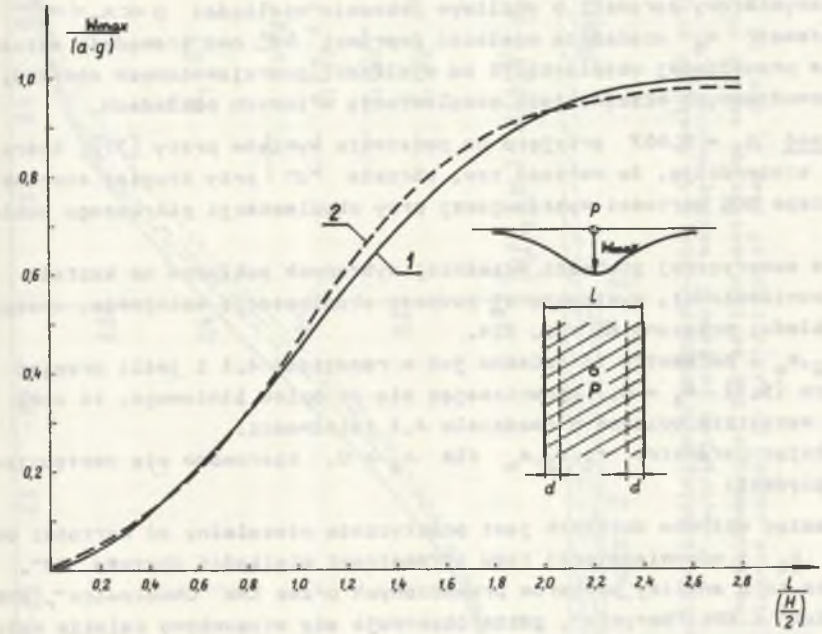


Rys. 5.2. KWK "Bolesław Śmiały" - linia wzdłuż szlaku kolejowego - rozwój niecki obniżeniowej:
- - - obniżenia pomierzone, ——— obniżenia obliczone wzorem (5.1) autora, (a = 0,741; $tg\beta$ = = 1,95; A_1 = 0,3; A_2 = 0,25; $\delta(W)$ = 28,5 mm)

Fig. 5.2. "Bolesław Śmiały" colliery- line along the railway - development of the subsidences trough
——— subsidences calculated by means of formula (5.1) of the author, (a = 0,74; $tg\beta$ = 1,95;
- - - subsidences measured A_1 = 0,3; A_2 = 0,25; $\delta(W)$ =28,5 mm)

Wartość A_2 decyduje o wartości poprawki ΔW w punktach obliczeniowych położonych nad środkową częścią eksploatowanej parceli, szczególnie gdy względne rozmiary parceli są małe.
Wartość A_2 powoduje wzrost wielkości ΔW w niepełnych nieckach obniżeniowych, co przyczynia się do zmniejszenia wartości obliczonych obniżeń W_k. Zgodnie ze wzorem (4.23) wartość A_2 zależy od przebiegu zmienności promienia rozproszenia wpływów wewnątrz górotworu.

Wstępne oszacowanie wielkości A_2 przeprowadzone na podstawie wzoru (4.23), przyjmując $tg\beta = 2$, $r(z) = z/tg\beta$, wskazuje że $A_2=0,3$. Jak się okazało, jest to wielkość nieco za duża, gdyż przyjmując $A_2 = 0,3$ dla fazy rozwoju eksploatacji zamiast spodziewanych obniżeń otrzymujemy ze wzoru (5.1) dosyć znaczne wypiętrzenia punktów.



Rys. 5.3. Wpływ szerokości wybranego pasa pokładu na wielkość maksymalnych obniżeń:
1 - według badań angielskich [74], 2 - według wzoru (5.1) autora dla $tg\beta = 2$; $A_1 = 0,2$; $A_2 = 0,25$

Fig. 5.3. Effect of the width of the extracted zone of the seam on the magnitude of the maximum subsidences:
1 - acc. to English research [74], 2 - acc. to formula (5.1) of the author for $tg\beta = 2$; $A_1 = 0,2$; $A_2 = 0,25$

Ostatecznie, analizując możliwość opisu obniżeń zaobserwowanych po eksploatacji kolejnych ścian w pokł. 354 KWK "Chwałowice" (rys. 5.1) oraz rozwój obniżeń w czasie, towarzyszący eksploatacji pokładu 326/5 KWK "Dębieńsko" (rys. 6.1, 6.7) i pokładu 318 KWK "Bolesław Śmiały" (rys.5.2), uzyskano dobry opis obniżeń niepełnych niecek, przyjmując $A_2 = \underline{0,25}$.

Dla celów praktycznych ważna jest zależność maksymalnych obniżeń od szerokości wybranego pasa pokładu. Zależność tę (rys. 5.3) uzyskano na podstawie wzoru (5.1), przyjmując średnie dla rozpatrywanych niecek obniżeniowych wielkości parametrów $A_1 = 0,2$; $tg\beta = 2$; $A_2 = 0,25$. Zgodność wyników uzyskanych wzorem (5.1) z wynikami badań angielskich [74] świadczy o możliwości dobrego opisu niepełnych niecek obniżeniowych i trafnym ustaleniu wartości parametru A_2.

A_3 - bezwymiarowy parametr o możliwym zakresie wielkości $0 \ll A_3 < \infty$
Parametr A_3 uzależnia wielkość poprawki ΔW nad krawędzią aktualnie prowadzonej eksploatacji od wielkości już ujawnionych obniżeń, spowodowanych wcześniejszą eksploatacją w innych pokładach.

<u>Wartość</u> $A_3 = 6,667$ przyjęto na podstawie wyników pracy [77], której autorzy stwierdzają, że wartość tzw. obrzeża "d" przy drugiej eksploatacji osiąga 50% wartości występującej przy eksploatacji pierwszego pokładu.

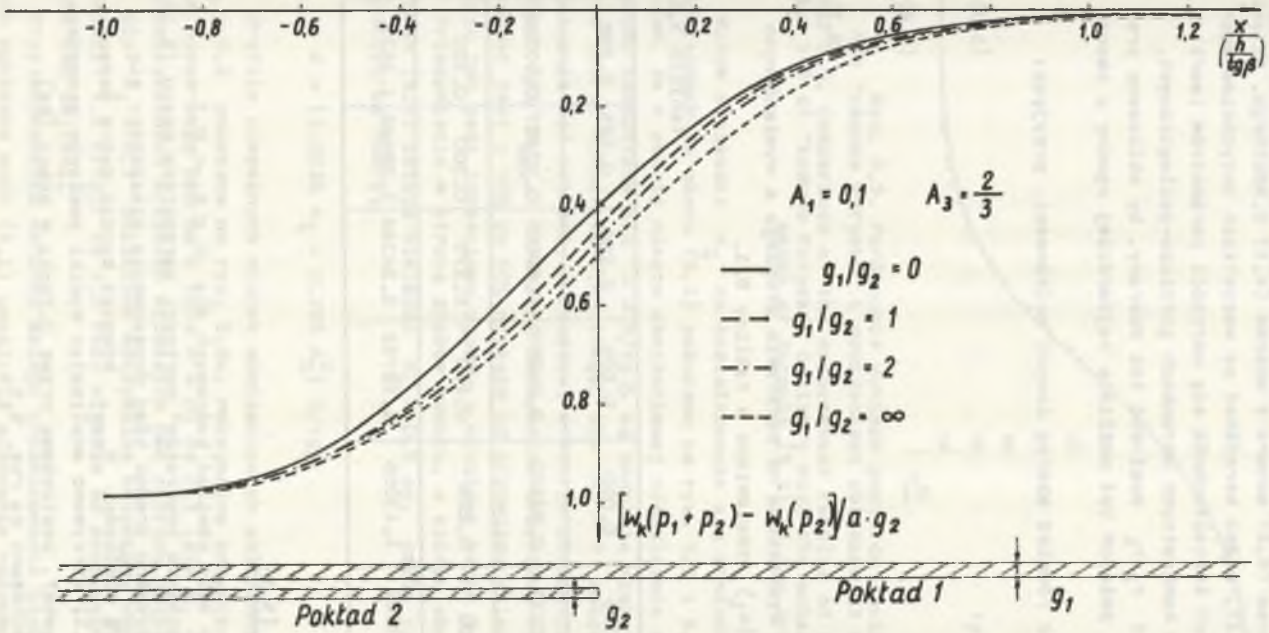
Wpływ sumarycznej grubości wcześniej wybranych pokładów na kształt niecki obniżeniowej, występującej podczas eksploatacji kolejnego, następnego pokładu, pokazano na rys. 5.4.

r_1, r_2, a_w - parametry te opisano już w rozdziale 4.1 i jeśli przyjąć we wzorze (5.1) $A_1 = 0$, ograniczając się do opisu liniowego, to obowiązują wszystkie opisane w rozdziale 4.1 zależności.
Specyfikując parametry r_1, r_2, a_w dla $A_1 > 0$, kierowano się następującymi względami:

1. Zasięg wpływów dalekich jest praktycznie niezależny od wartości parametru A_1 i odpowiadającej temu parametrowi wielkości obrzeża "d".
Wynika to z analizy pomiarów prowadzonych przez KWK "Chwałowice", KWK "Jankowice" i KWK "Borynia", gdzie obserwuje się stosunkowo dalekie wpływy zewnętrzne przy małych wielkościach parametru $A_1 < 0,15$ oraz pomiarów prowadzonych przez KWK "Dębieńsko", KWK "Janina", KWK "Bolesław Śmiały" gdzie dużym wielkościom parametru $A_1 > 0,24$, towarzyszyły podobne wpływy zewnętrzne.

Wzór (2.4) J.Zycha nie spełnia powyższego postulatu, opisując dobrze wpływy dalekie tylko dla $A_1 \gg 0$.

2. Wielkości r_1, r_2, a_w muszą być tak funkcyjnie uzależnione od A_1, by dysponując wielkościami $tg\beta$ wyznaczonymi z pomiarów pełnej niecki obniżeniowej, maksymalne nachylenie T_{max} obliczone ze wzoru (5.1) było takie samo, jak obliczone wzorem S. Knothego, niezależnie od wartości parametru A_1.



Rys. 5.4. Wpływ grubości wcześniej wybranego pokładu 1 na wielkość przyrostu obniżeń spowodowanych wybraniem pokładu 2, według wzoru (5.1)

Fig. 5.4. Effect of the thickness of the earlier-extracted seam 1 on the magnitude of the increase of subsidence caused by extraction of seam 2, acc. to formula (5.1)

Spełnienie powyższego warunku ma na celu zapewnienie porównywalności profili obliczonych wzorem (5.1) autora i wzorem (4.1) S.Knothego. Dzięki temu, stosując wzór (5.1), można korzystać ze wszystkich dotychczasowych wyników badań dotyczących kształtowania się wartości parametrów teorii W.Budryka, S.Knothego w konkretnych warunkach górniczo-geologicznych.

3. Stosunek wielkości r_2/r_1 musi być tak dobrany, by obliczony profil niecek niepełnych i pełnych był możliwie najbardziej zgodny z obserwacją.

Ostatecznie, testując również szereg innych zależności, przyjęto:

$$a_w = 0{,}4 - 1{,}25\ A_1, \tag{5.5}$$

$$r_1 = \frac{h}{tg\beta} F(A_1), \tag{5.6}$$

$$r_2 = 2\ r_1. \tag{5.7}$$

Funkcja $F(A_1)$ została wyznaczona na podstawie drugiego z wymienionych postulatów. Wartości $F(A_1)$ zestawiono w tablicy 5.1.

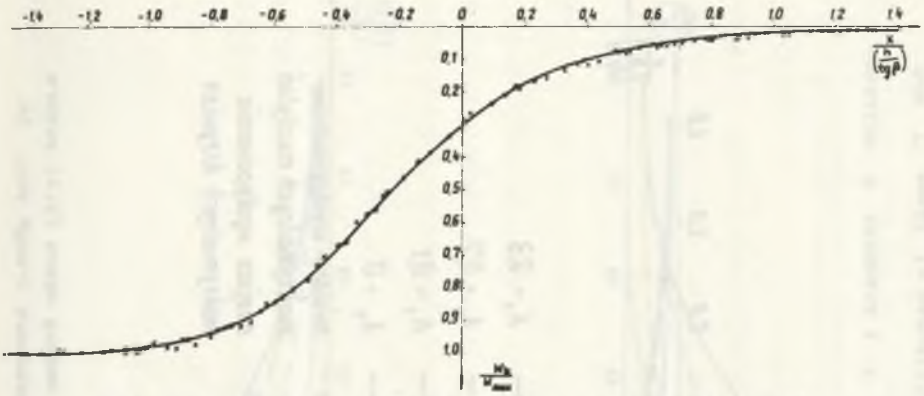
Tablica 5.1

A_1	0	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150
$F(A_1)$	0.80000	0.80171	0.81559	0.84293	0.8800	0.92427	0.97288
A_1	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325
$F(A_1)$	1.02356	1.07669	1.13056	1.18712	1.24344	1.29948	1.3573

5.3. Własności wzoru (5.1)

Wzór (5.1) daje dobry opis obniżeń końcowych dla $0 \leqslant A_1 < 0{,}3$.

Wyznaczając metodą "minimum kwadratów" wartości parametrów wzoru (5.1) dla 8 różnych niecek, uzyskano średni błąd dopasowania mieszczący się w przedziale 1,2% do 2.7% wielkości W_{max}. Również bardzo dobre dopasowanie obniżeń wzorem (5.1) otrzymano analizując wyniki pomiarów prowadzonych na KWK "Komuna Paryska", zestawione przez J.Zycha w pracy [84]. Wynik tego dopasowania pokazano na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Porównanie wyników pomiarów obniżeń linii 1-5 KWK "Komuna Paryska" z obniżeniami obliczonymi wzorem (5.1) autora

Fig. 5.5. Comparison of the measurement results of the subsidence of the line 1-5 of "Komuna Paryska" colliery with the subsidences calculated by means of formula (5.1) of the author

Wpływ wielkości A_1 na kształtowanie się obniżeń, nachyleń i krzywizn obliczonych ze wzoru (5.1) pokazano na rys. 5.6 i 5.7. Z wykresów tych widać, że w pełnej niecce obniżeniowej niezależnie od wielkości A_1 wpływy zewnętrzne dla $x > h/tg\beta$ są znacznie większe od obliczonych wzorami teorii W.Budryka-S.Knothego. Dla $A_1 > 0$ maksymalne nachylenia występują nad zrobami, w miejscu, w którym obniżenia osiągają wielkość 55% do 58% W_{max}, natomiast maksymalne krzywizna wypukła występująca nad zrobami jest o 50% do 60% większa od krzywizny wklęsłej nad calizną. Wynik ten jest jakościowo zgodny z wynikami badań S.Szpetkowskiego [75].

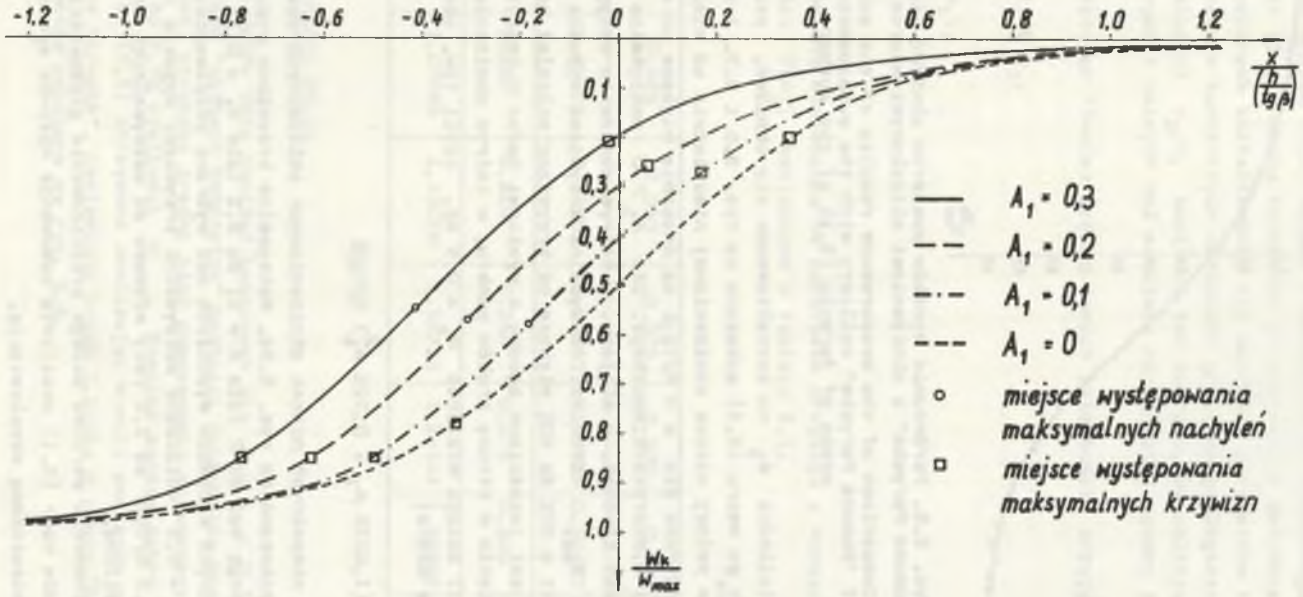
Przesunięcie w stronę zrobów punktu, w którym obniżenie W_k obliczone wzorem (5.1) osiąga wielkość $W_k = 0,5$ ag, czyli tzw. obrzeże d, można obliczyć ze wzoru:

$$d = (1,0235\ A_1 + 0,725\ A_1^2)\ h/tg\beta \qquad (5.8)$$

Profile niepełnych niecek obniżeniowych obliczonych wzorem (5.1) dla $A_1 = 0,2$ pokazano na rys. 5.8a. Maksymalne krzywizny wypukłe nad wybranym pasem mogą być od 2 (dla A = 0) do 2,1 (dla $A_1 = 0,2$) razy większe od maksymalnych krzywizn wypukłych nad wybraną półpłaszczyznę.

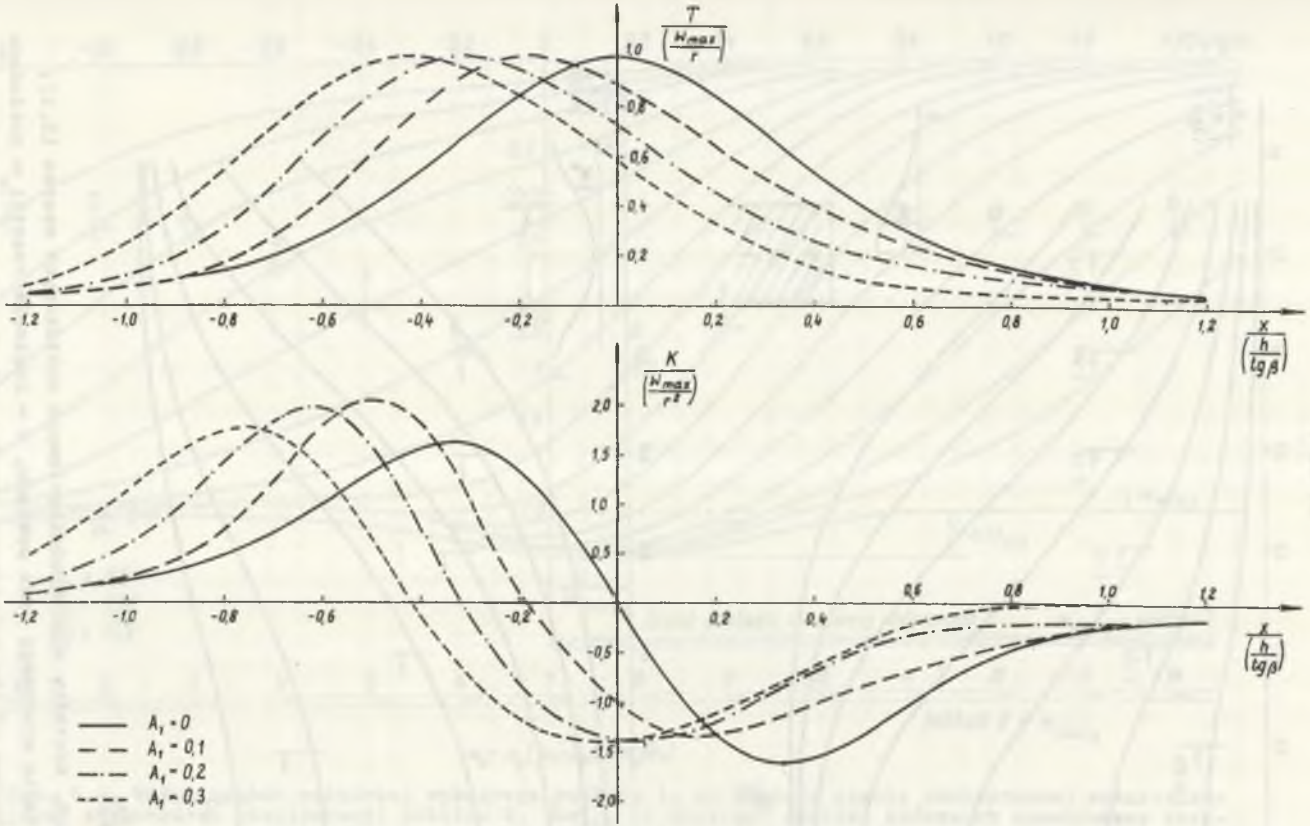
Dla $A_1 = 0,1$ obliczone maksymalne krzywizny wypukłe nad pasem o szerokości $1,2\ h/tg\beta$ są 3,2 razy większe od maksymalnych krzywizn wklęsłych nad calizną.

Przy zachowaniu warunku małego zróżnicowania głębokości eksploatowanych pokładów wzór (5.1) umożliwia sumowanie wpływów spowodowanych dowolnie rozmieszczoną eksploatację.



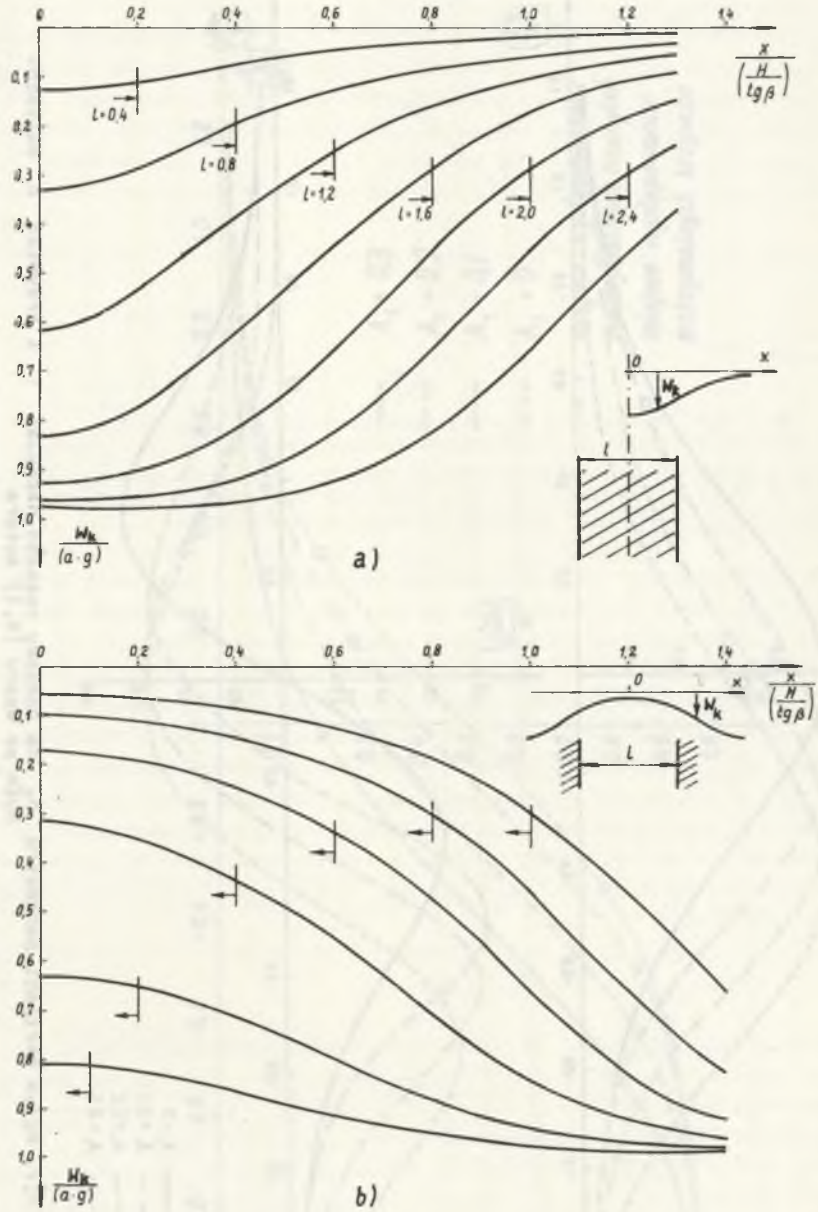
Rys. 5.6. Wpływ wartości parametru A_1 na kształt niecki obniżeniowej według wzoru (5.1) autora

Fig. 5.6. Effect of the value of parameter A_1 on the shape of the subsidence trough acc. to formula (5.1) of the author



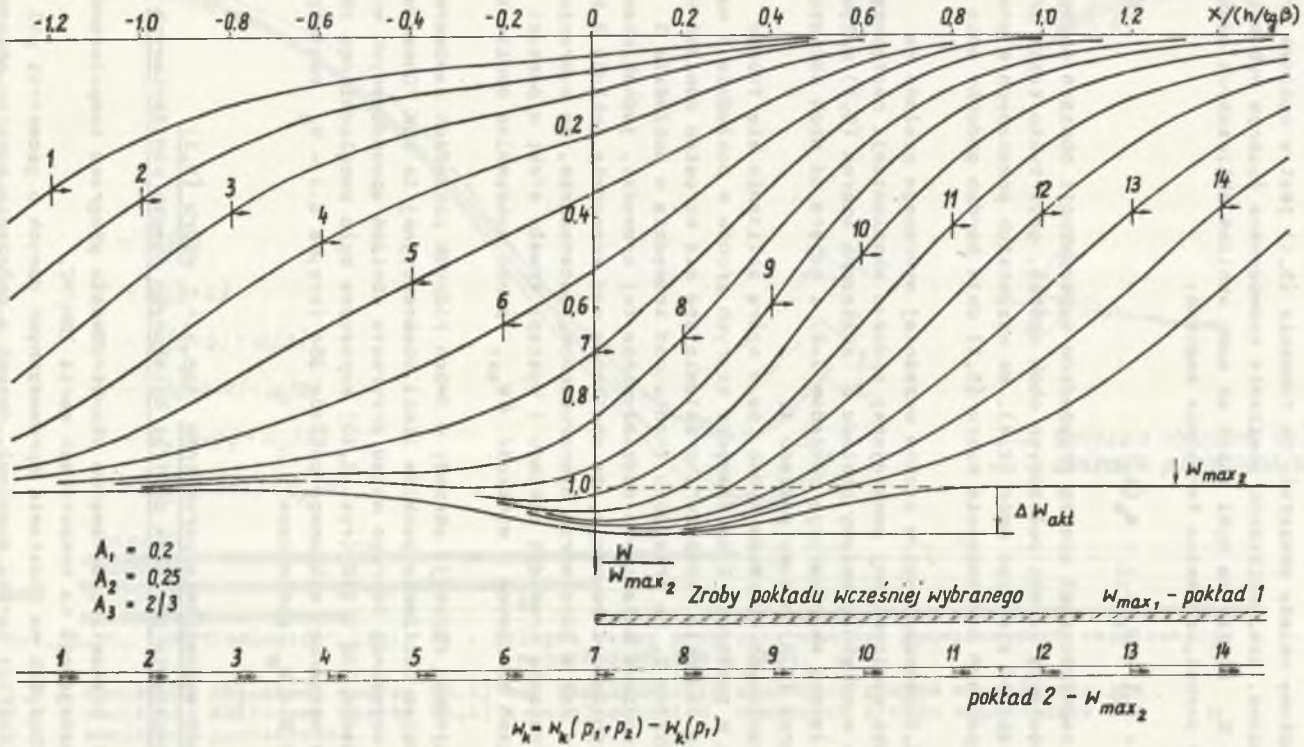
Rys. 5.7. Wpływ wartości parametru A_1 na poziomy rozkład nachyleń T i krzywizn K obliczonych ze wzoru (5.1) autora

Fig. 5.7. Effect of the value of parametr A_1 on the horizontal distributed of slope T and curves K, calculated from formula (5.1) of the author



Rys. 5.8. Kształty niecek obniżeniowych obliczonych wzorem (5.1):
a - rozszerzanie wybranego pasa pokładu, b - zwężanie resztki w pokładzie

Fig. 5.8. Shapes of the subsidence troughs calculated by means of formula (5.1):
a - widening of the extracted zone of the seam, b - narrowing of the remainder in the seam



Rys. 5.9. Wpływ zrobów wcześniej wybranego pokładu 1, na kształt niecki obniżeniowej wykształcającej się wskutek eksploatacji pokłłdu 2, Δw_{akt} - przyrost obniżeń końcowych spowodowany aktywacją obrzeża na krawędzi eksploatacji pokładu 2

Fig. 5.9. Effect of the abandoned workings of the earlier-extracted seam 1, on the shape of the subsidence trough being formed as a result of the mining of seam 2, Δw_{akt} - increase of the final subsidences caused by the activation of the periphery at the edge of the mining of seam 2

Sumując wpływy należy pamiętać, że równanie (5.1) jest w ogólnym przypadku nieliniowe, tzn. obliczone obniżenie spowodowane łącznym wybraniem parcel $S_1 + S_2$ będzie na ogół różne od sumy obniżeń obliczonych oddzielnie dla tych parcel, co można formalnie zapisać:

$$W_k(S_1 + S_2) \neq W_k(S_1) + W_k(S_2). \tag{5.9}$$

J.Zych [84] zaprezentował szereg przypadków superpozycji obniżeń spowodowanych eksploatacją parcel położonych obok siebie, gdyż tylko takie przypadki można opisać stosując wzór (2.4). We wszystkich pokazanych w pracy J.Zycha przypadkach zastosowanie wzoru (5.1) daje bardzo podobny opis obniżeń.

Na rys. 5.9 pokazano wpływ zrobów wcześniej wybranego pokładu na kształt niecki obniżeniowej powstającej podczas eksploatacji następnego pokładu. Aby wyodrębnić wpływy pokładu 2 obliczono wzorem (5.1) wpływy spowodowane łączną eksploatacją pokładów 1+2 i odjęto od nich obliczone odrębnie wzorem (5.1) wpływy pokładu 1.

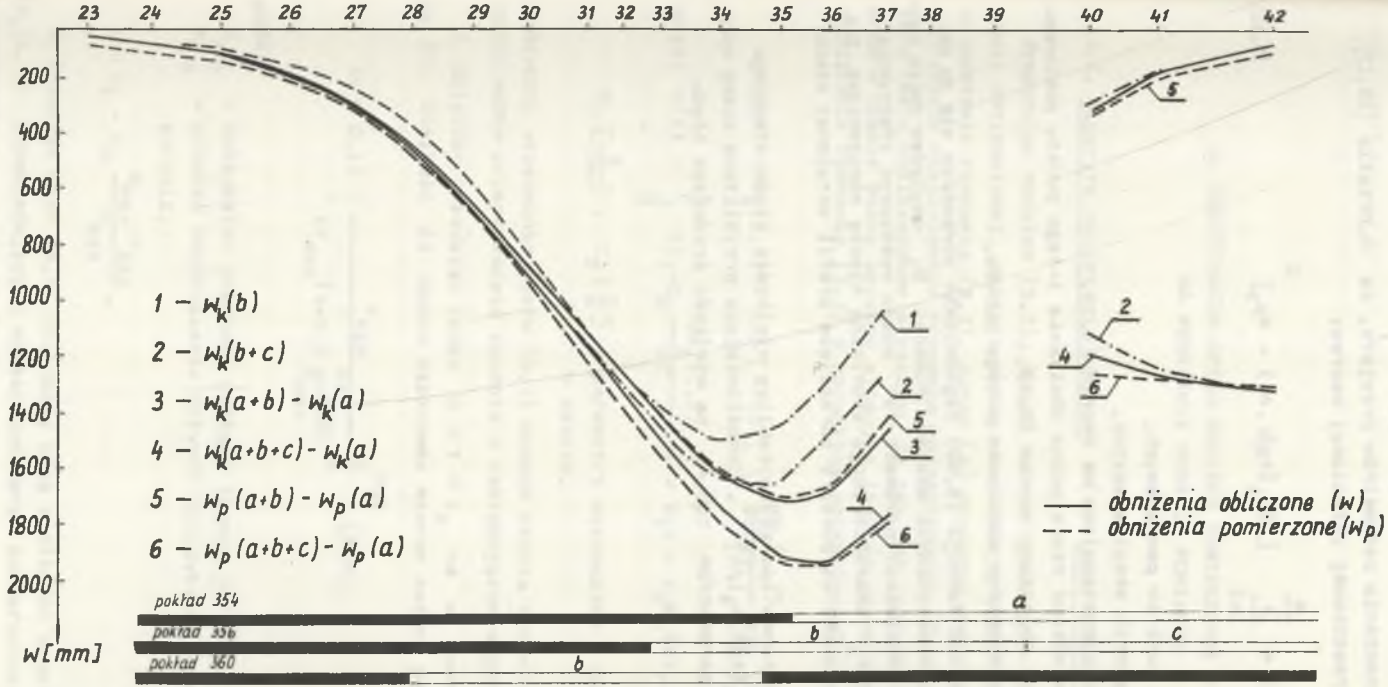
Z przedstawionych wykresów widać, że w miarę zbliżania się frontu eksploatacji w pokładzie 2 do krawędzi starych zrobów w pokładzie 1 następuje wzajemna redukcja "obrzeży", przejawiająca się wzrostem obniżeń nad krawędzią pokładu 2. Po przejściu frontu pod krawędzią w pokładzie 1 następuje stopniowe osłabienie oddziaływania tej krawędzi, jednak obecność zrobów pokładu 1 powoduje, że obniżenia nad krawędzią pokładu 2 będą nieco większe niż w górotworze nienaruszonym. Ostatecznie, po wybraniu pokładu 2 w rejonie krawędzi pokładu 1 wystąpi trwały efekt w postaci wzrostu obniżeń końcowych o wielkość ΔW_{akt} ponad maksymalne obniżenia ag_2.

Efekt wzajemnej redukcji obrzeży w dwóch różnych pokładach zaobserwowano analizując obniżenia punktów linii obserwacyjnej 1a KWK "Chwałowice". W celu uzyskania dobrego opisu przyrostu obniżeń spowodowanych wybraniem pokładów 356 i 360 (rys. 5.10) konieczne było uwzględnienie obecności zrobów wcześniej wybranego pokładu 354 (krzywe 3,4 - W_k teoretyczne, krzywe 5,6 - W_p pomierzone).

5.4. Sposób wyznaczania parametrów $tg\beta, a, A_1$ wzoru (5.1) na podstawie pomiarów profili ustalonych niecek obniżeniowych

Wzór (5.1) stanowił podstawę do skonstruowania programu komputerowego TG12.EXE działającego na komputerach serii IBM/PC.

Program TG12.EXE na podstawie wprowadzonych danych o geometrii pól wybierania (kształt parcel dowolny), danych o położeniu punktów obserwacyjnych i wartościach pomierzonych obniżeń w tych punktach wyznacza parametry a, $tg\beta$, A_1 wzoru (5.1).



Rys. 5.10. KWK "Chwałowice", linia 1a - kolejne etapy przyrostu obniżeń spowodowynych eksploatacją w pokładach 356 i 360:

1,2 - obniżenia obliczone wzorem (5.1) bez uwzględnienia obecności zrobów w pokładzie 354
3,4 - obniżenia obliczone wzorem (5.1) z uwzględnieniem obecności zrobów w pokładzie 354
5,6 - obniżenia pomierzone

Fig. 5.10. "Chwałowice", colliery, line 1a - successive stages of the increase of the subsidence caused by the mining in seams 356 and 360

1,2 - subsidence calculated by formula (5.1) without taking into account the presence of old workings in seam 354, 3.4 - subsidence calculated by formula (5.1) taking into account the old workings in seam 354, 5,6 - subsidence measured

Jako kryterium wyznaczania parametrów przyjęto, za B.Drzęźlą [16,17], minimum wariancji resztkowej określonej wzorem:

$$B_1(a, tg\beta, A_1) = \sum_{i=1}^{n} [aW_{ki}(tg\beta, A_1) - Wp_i]^2 \qquad (5.10)$$

gdzie:

- n - liczba punktów pomiarowych,
- a - współczynnik eksploatacyjny,
- $tg\beta, A_1$ - parametry występujące we wzorze (5.1),
- $aW_{kt}(tg\beta, A_1)$ - wielkość teoretyczna obniżenia i-tego punktu pomiarowego obliczona wzorem (5.1),
- Wp_i - pomierzone obniżenie i-tego punktu.

Uwzględniając postać funkcji (5.10) zagadnienie sprowadza się do poszukiwania metodami numerycznymi minimum funkcji B_1 względem dwóch parametrów A_1 i $tg\beta$, natomiast parametr "a" można wyznaczyć efektywnie.

Parametry $a, tg\beta, A_1$ charakteryzują statyczną niecką obniżeniową. Dla ich wyznaczenia konieczne są pomiary obrazujące profil ustalonej niecki obniżeniowej.

Program TG12 dodatkowo sporządza tablicę wielkości błędu średniego $\delta(W_k(A_1, tg\beta)) = (B_1(tg\beta, A_1)/n)^{0.5}$, umożliwiającą przybliżoną ocenę wpływu zmian wielkości parametrów $tg\beta, A_1$ na wielkość średniego błędu obniżeń.

6. WERYFIKACJA OPISU OBNIŻEŃ POWIERZCHNI W CZASIE NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARÓW

6.1. Algorytm obliczania obniżeń $W(t)$ jako funkcji czasu

Dysponując modelem (5.1), dosyć dobrze opisującym profil ustalonej niecki obniżeniowej, podjęto próbę weryfikacji opisu obniżeń w czasie na podstawie równania (3.3). Autor [7] rozważał możliwość opisu obniżeń przy użyciu nieliniowego równania różniczkowego (2.14), jednak przeprowadzone testy obliczeniowe wykazały, że ten sam rząd dokładności opisu obniżeń w czasie można uzyskać stosując liniowe równanie różniczkowe (3.3). Rozwiązanie równania (3.3) z warunkiem początkowym $\{W(t=0)=0\}$ ma postać:

$$W(.,t) = W_k(.,t) - \exp\left[-F(t)\right] \int_0^t \frac{dW_k(.,\tau)}{d\tau} \exp\left[F(\tau)\right] d\tau \qquad (6.1)$$

gdzie: $F(t) = \int_0^t \left(C_1 - C_2 \frac{dW_k(.,\tau)}{d\tau}\right) d\tau = C_1 t - C_2 W_k(t)$,

$C_1 \left[\frac{1}{rok}\right]$, $C_2 \left[\frac{1}{m}\right]$ - parametry wyznaczane z pomiarów obniżeń w czasie.

Praktyczne stosowanie wzoru (6.1) wymaga użycia techniki cyfrowej. Obliczenia można przeprowadzić zgodnie z następującym algorytmem:

1. Dzielimy przedział czasu $0 < t < t_z$ na m równych odcinków czasu Δt. Wielkość Δt można oszacować wzorem autora podanym w pracy [5]:

$$\Delta t < 0.11 \left(\frac{r_{min}}{cV_{max}\left(1+0.5 \frac{cr_{max}}{V_{max}}\right)} \right)^{0.5} \quad [rok] \qquad (6.2)$$

gdzie:

V_{max} - maksymalna prędkość postępu frontu [m/rok],

r_{min} - promień rozproszenia wpływów najpłytszej z analizowanych parceli,

$c = C_1 - C_2 \frac{W_{max} V_{max}}{r_{min}}$.

2. Stosując wzór (5.1) obliczamy ciąg wielkości przyrostów obniżeń $\Delta W_k(i, t)$ odpowiadających wyeksploatowanym powierzchniom parcel ΔS_i w przedziale czasu $(i-1)\Delta t < t < i\Delta t$.

Dla $i > m$, tzn. gdy $t > t_z$, wzory (6.5) upraszczają się do postaci:

$$T_x(t) = T_{xk}(m\Delta t) - \frac{\partial A_m}{\partial x} \exp(-C_1(t-t_z)). \qquad (6.6)$$

Wysoka efektywność numeryczna wzorów (6.3 - 6.6) pozwala na wykonanie bardzo obszernych obliczeń prognostycznych.

6.2. Wyznaczanie parametrów równania (3.3) na podstawie wyników pomiarów obniżeń w czasie

Parametry C_1, C_2 występujące w równaniu (3.3) w założeniu mają charakteryzować własności mechaniczne deformowanego górotworu. Wartości tych parametrów można wyznaczyć dysponując wynikami pomiarów geodezyjnych obniżeń w czasie. Zgodnie ze wzorami (3.3), (6.1) wielkość obniżeń w czasie jest uzależniona od wielkości obniżeń $W_k(t)$.

W wyniku obserwacji można uzyskać dyskretny rozkład w czasie wielkości obniżeń $W(t_j)$ oraz profil obniżeń końcowych $W_k(t_z)$, odpowiadający rozmiarom wyeksploatowanych pokładów w chwili t_z zatrzymania eksploatacji, gdyż $\lim_{t\to\infty} W(t) = W_k(t_z)$.

Wielkość $W_k(t)$ dla $0 < t < t_z$ jest pewną, niemierzalną wielkością teoretyczną. Zakładamy, że wielkość ta zależy od zmieniającej się geometrii eksploatacji i pewnych stałych, niezmiennych w czasie parametrów charakteryzujących górotwór.

Identyfikacja parametrów C_1, C_2 równania (3.3) wymaga odtworzenia przebiegu obniżeń $W_k(t_j)$ dla $t_j < t_z$. Aby tego dokonać należy:

- przyjąć matematyczny model opisu obniżeń końcowych $W_k(t)$,
- wyznaczyć parametry modelu opisu obniżenia $W_k(t)$ na podstawie znanego profilu pomierzonych obniżeń $W_k(t_z)$ i znaną geometrię eksploatacji w chwili t_z,
- znając przebieg zmiennej w czasie geometrii eksploatacji obliczyć obniżenia $W_k(t_j)$.

W dalszych rozważaniach przyjmuje się model obniżeń końcowych $W_k(t)$ określony wzorem (5.1). Stosowanie tego wzoru wymaga uprzedniego wyznaczenia za pomocą programu TG12.EXE parametrów $tg\beta, a, A_1$.

Istniejące wyniki pomiarów obniżeń można, ze względu na ich zakres, podzielić na trzy grupy:

1 - pomiary całych linii obserwacyjnych prowadzone z dużą częstotliwością (stosunkowo mało przypadków),

2 - pomiary całych linii prowadzone stosunkowo rzadko, natomiast obniżenia kilku wybranych punktów obserwacyjnych mierzone często,

3 - pomiary całych linii obserwacyjnych prowadzone z małą częstotliwością (przypadek najczęściej spotykany).

3. Ciąg wielkości obniżeń $W(i\Delta t)$ dla $1 \leqslant i \leqslant m$ odpowiadający wzorowi (6.1) uzyskujemy zgodnie z następującym rekurencyjnym schematem:

$$
\begin{aligned}
&A_o = 0;\\
&\dots\dots\dots\\
&E_i = \exp(-C_1\Delta t + C_2\Delta W_k(i\Delta t));\\
&A_i = (A_{i-1} + \Delta W_k(i\,\Delta t))E_i;\\
&W_k(i\Delta t) = W_k((i-1)\Delta t) + \Delta W_k(i\Delta t);\\
&W(i\Delta t) = W_k(i\Delta t) - A_i.
\end{aligned}
\tag{6.}
$$

4. Gdy zatrzymamy front eksploatacji lub front znajduje się poza zasięgiem wpływów, tzn. $t > t_z$, $(i > m)$, wzory (6.3) upraszczają się do postaci:

$$W(t) = W_k(m\,\Delta t) - A_m \exp(-C_1(t - t_z)). \tag{6.4}$$

Jeśli Δt jest zgodne ze wzorem (6.2), to numeryczny błąd wielkości $W(t)$ jest mniejszy od $0{,}001\ W_k(t)$.

Podobnie można obliczyć zmienne w czasie wartości pozostałych wskaźników deformacji, takich jak: nachylenia, krzywizny itd. Przykładowo, składową nachylenia powierzchni $T_x(t) = \frac{\partial W(x,y,t)}{\partial x}$ obliczamy zgodnie ze schematem (6.5) uzyskanym przez różniczkowanie względem zmiennej x wyrażeń schematu (6.3), (6.4):

$$
\begin{aligned}
&A_o = 0; \qquad \frac{\partial A_o}{\partial x} = 0;\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&E_i = \exp(-C_1\Delta t + C_2\,\Delta W_k(i\Delta t)); \qquad \frac{\partial E_i}{\partial x} = C_2\,\Delta Tx_k(i\Delta t)E_i;\\
&A_i = (A_{i-1} + \Delta W(i\Delta t))E_i;\\
&\frac{\partial A_i}{\partial x} = \left(\frac{\partial A_{i-1}}{\partial x} + \Delta T_{xk}(i\,\Delta t)\right)E_i + (A_{i-1} + \Delta W_k(i\,\Delta t))\frac{\partial E_i}{\partial x};\\
&T_x(i\,\Delta t) = T_{xk}(i\,\Delta t) - \frac{\partial A_i}{\partial x}.
\end{aligned}
\tag{6.5}
$$

Dla $i > m$, tzn. gdy $t > t_z$, wzory (6.5) upraszczają się do postaci:

$$T_x(t) = T_{xk}(m\Delta t) - \frac{\partial A_m}{\partial x} \exp(-C_1(t-t_z)). \qquad (6.6)$$

Wysoka efektywność numeryczna wzorów (6.3 - 6.6) pozwala na wykonanie bardzo obszernych obliczeń prognostycznych.

6.2. Wyznaczanie parametrów równania (3.3) na podstawie wyników pomiarów obniżeń w czasie

Parametry C_1, C_2 występujące w równaniu (3.3) w założeniu mają charakteryzować własności mechaniczne deformowanego górotworu. Wartości tych parametrów można wyznaczyć dysponując wynikami pomiarów geodezyjnych obniżeń w czasie. Zgodnie ze wzorami (3.3), (6.1) wielkość obniżeń w czasie jest uzależniona od wielkości obniżeń $W_k(t)$.

W wyniku obserwacji można uzyskać dyskretny rozkład w czasie wielkości obniżeń $W(t_j)$ oraz profil obniżeń końcowych $W_k(t_z)$, odpowiadający rozmiarom wyeksploatowanych pokładów w chwili t_z zatrzymania eksploatacji, gdyż $\lim_{t\to\infty} W(t) = W_k(t_z)$.

Wielkość $W_k(t)$ dla $0 < t < t_z$ jest pewną, niemierzalną wielkością teoretyczną. Zakładamy, że wielkość ta zależy od zmieniającej się geometrii eksploatacji i pewnych stałych, niezmiennych w czasie parametrów charakteryzujących górotwór.

Identyfikacja parametrów C_1, C_2 równania (3.3) wymaga odtworzenia przebiegu obniżeń $W_k(t_j)$ dla $t_j < t_z$. Aby tego dokonać należy:

- przyjąć matematyczny model opisu obniżeń końcowych $W_k(t)$,
- wyznaczyć parametry modelu opisu obniżenia $W_k(t)$ na podstawie znanego profilu pomierzonych obniżeń $W_k(t_z)$ i znaną geometrię eksploatacji w chwili t_z,
- znając przebieg zmiennej w czasie geometrii eksploatacji obliczyć obniżenia $W_k(t_j)$.

W dalszych rozważaniach przyjmuje się model obniżeń końcowych $W_k(t)$ określony wzorem (5.1). Stosowanie tego wzoru wymaga uprzedniego wyznaczenia za pomocą programu TG12.EXE parametrów $tg\beta, a, A_1$.

Istniejące wyniki pomiarów obniżeń można, ze względu na ich zakres, podzielić na trzy grupy:

1 - pomiary całych linii obserwacyjnych prowadzone z dużą częstotliwością (stosunkowo mało przypadków),

2 - pomiary całych linii prowadzone stosunkowo rzadko, natomiast obniżenia kilku wybranych punktów obserwacyjnych mierzone często,

3 - pomiary całych linii obserwacyjnych prowadzone z małą częstotliwością (przypadek najczęściej spotykany).

Pomiary prowadzone z dużą częstotliwością, to pomiary na podstawie których można dostatecznie dokładnie ustalić rozkład obniżeń i prędkości obniżeń jako funkcje czasu t.

Wymaganą częstotliwość pomiarów można oszacować na podstawie wskazań podanych w pracy B.Dżegniuka, A.Sroki [23].

Sposób wyznaczania parametrów równania (3.3) jest uzależniony od zakresu przeprowadzonych pomiarów.

6.2.1. Wyznaczanie parametrów C_1, C_2 z pomiarów obniżeń pojedynczych punktów obserwacyjnych prowadzonych z dużą częstotliwością

Oznaczając przez $c(t_j)$ wielkość wyrażenia:

$$c(t_j) = C_1 - C_2 \frac{dW_k(t_j)}{dt_j} \tag{6.7}$$

oraz utożsamiając obserwowane obniżenie $W_p(t)$ z obniżeniem teoretycznym $W(t)$, równanie (3.3) można przekształcić do postaci:

$$c(t_j) = \frac{\frac{dW_p(t_j)}{dt_j}}{W_k(t_j) - W_p(t_j)}, \tag{6.8}$$

gdzie:

$\frac{dW_p(t_j)}{dt_j}$ - obserwowana prędkość obniżania się punktu pomiarowego w chwili t_j,

$W_p(t_j)$ - obserwowane obniżenie w chwili t_j,

j - numer cyklu pomiarowego,

$W_k(t_j)$ - obliczona wzorem (5.1) wielkość obniżenia końcowego w chwili t_j.

Traktując wielkość $c(t_j)$ jako zmienną zależną Y_j a wielkość $\frac{dW_k(t_j)}{dt_j}$ - jako zmienną niezależną X_j, zagadnienie wyznaczania parametrów C_1, C_2 sprowadza się, zgodnie z równaniem (6.7), do wyznaczenia współczynników regresji liniowej funkcji:

$$\bar{Y}_{|x} = C_1 + C_2 X \tag{6.9}$$

Stosując metodę najmniejszych kwadratów otrzymujemy następujące wzory na ocenę współczynników regresji C_1, C_2 równania (6.9):

$$C_1 = \frac{(\sum x_j^2)(\sum Y_j) - (\sum x_j)(\sum x_j Y_j)}{n\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2} \tag{6.10}$$

$$C_2 = \frac{n\sum x_j Y_j - (\sum x_j)(\sum Y_j)}{n\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2} \tag{6.11}$$

gdzie:

n - ilość wyznaczonych wielkości $c(t_j)$.

Nieobciążona ocena wariancji równania (6.10) wynosi:

$$s^2 = \frac{1}{n-2}(Y_j - C_1 - C_2 x_j)^2 \tag{6.12}$$

Oceny względnych błędów średnich współczynników C_1, C_2 wyliczamy ze wzorów:

$$\Delta C_1 = 100\left(s^2 \frac{\sum x_j^2}{n\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2}\right)^{0.5} / C_1 \quad [\%] \tag{6.13}$$

$$\Delta C_2 = 100\left(s^2 \frac{n}{n\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2}\right)^{0.5} / C_2 \quad [\%] \tag{6.14}$$

Współczynnik korelacji liniowej r obliczamy ze wzoru:

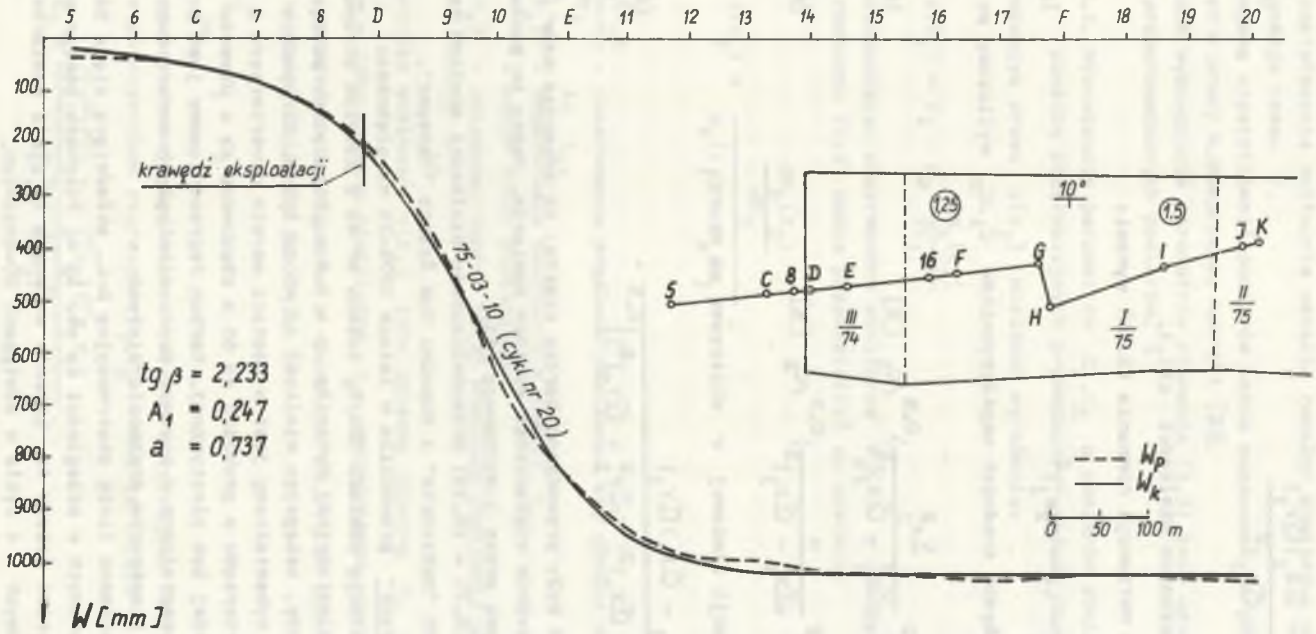
$$r = \frac{n\sum x_j Y_j - (\sum x_j)(\sum Y_j)}{\left\{[n\sum x_j^2 - (\sum x_j)^2]\,[n\sum Y_j^2 - (\sum Y_j)^2]\right\}^{0.5}}. \tag{6.15}$$

Gdy pomiary obniżeń były prowadzone bardzo często, to stosując wzór (6.8) konieczne jest uprzednie wygładzenie wyników pomiarów. Można tu posłużyć się wzorami opisanymi przez J.Wędzonego [81].

Stosując wzory (6.7) - (6.15) przeanalizowano wielkości obniżeń zaobserwowanych na KWK "Dębieńsko" i Kopalni Rud Żelaza "Tadeusz".

Kopalnia "Dębieńsko" prowadziła w latach 1974-75 na głębokości $h_{śr}$ = 155 m eksploatację pokładu 326/5, ścianę nr 4a z zawałem stropu. Wysokość furty eksploatacyjnej wynosiła g = 1.4 m. Miesięczny postęp ściany 4a był zmienny, osiągając wielkość od 45 do 125 m. Górotwór w rozpatrywanym rejonie wykształcony jest w postaci warstw czwartorzędu i karbonu. Warstwy czwartorzędu o grubości do 65 m zbudowane są z utworów o konsystencji sypkiej lub plastycznej. Karbon reprezentowany jest przez warstwy orzeskie wykształcone w postaci naprzemianległych warstw łupków ilastych szarych i piaskowców drobnoziarnistych.

Nad ścianę 4a założono linię obserwacyjną B-L, składającą się z 58 punktów zastabilizowanych w odległości co ok. 15 m. Pierwszy pomiar wykonano przed rozpoczęciem ściany 4a. Łącznie wykonano 16 cykli pomiarowych w odstępach 10-dniowych i 4 cykle w odstępach 20-dniowych.



Rys. 6.1. KWK "Dębieńsko", ściana 4a w pokł. 326/5:
- - - pomierzony i ——— obliczony wzorem (5.1) profil końcowy niecki obniżeniowej

Fig. 6.1. "Dębieńsko" colliery, longwall 4a in seam 326/5:
- - - measured and ——— calculated by means of formula (5.1) final profile of subsidence trough

W oparciu o pomiar z dnia 75/03/10 (cykl nr 20) programem TG12 wyznaczono parametry wzoru (5.1). Otrzymano: $tg\beta = 2,233$; $A_1 = 0,247$; $a = 0,737$. Średni błąd dopasowania obniżeń $\delta(W) = 12,2$ mm, co stanowi ok. 1,2% W_{max}. Wyniki dopasowania i plan sytuacji pokazano na rys. 6.1. W tablicy 6.1 przedstawiono wyniki pomiarów obniżeń $W_p(t_j)$ i obliczone wzorem (6.7) wielkości $c(t_j)$, dla 3 wybranych punktów pomiarowych.

Tablica 6.1

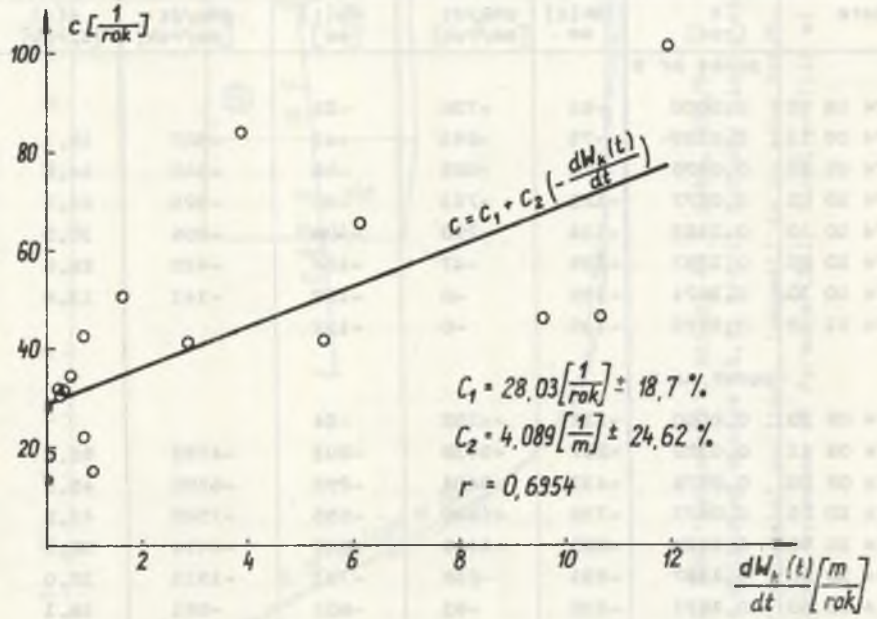
Data	t [rok]	Wk(t) mm	dWk/dt [mm/rok]	Wp(t) [mm]	dWp/dt [mm/rok]	c(t) [1/rok]
	punkt nr 8					
74 08 30	0.0000	-53	-726	-25		
74 09 11	0.0329	-75	-693	-49	-507	19.1
74 09 20	0.0575	-92	-885	-56	-540	14.8
74 10 01	0.0877	-123	-713	-80	-925	21.7
74 10 10	0.1123	-134	-290	-106	-856	30.5
74 10 20	0.1397	-139	-47	-124	-420	28.0
74 10 30	0.1671	-139	-0	-129	-141	13.4
74 11 10	0.1973	-139	-0	-132		
	punkt nr E					
74 08 30	0.0000	-112	-4192	-54		
74 09 11	0.0329	-267	-5938	-203	-4192	65.3
74 09 20	0.0575	-433	-9401	-298	-6190	45.9
74 10 01	0.0877	-739	-5240	-555	-7589	41.2
74 10 10	0.1123	-808	-1449	-719	-4494	50.5
74 10 20	0.1397	-831	-218	-783	-1533	32.0
74 10 30	0.1671	-835	-93	-803	-581	18.1
74 11 10	0.1973	-837	-32	-816		
	punkt nr 16					
74 08 15	0.0000	-12	-110	-2		
74 08 30	0.0411	-22	-349	-11	-335	31.6
74 09 11	0.0740	-34	-445	-25	-314	34.5
74 09 20	0.0986	-46	-709	-30	-682	42.4
74 10 01	0.1288	-103	-3722	-65	-3217	83.6
74 10 10	0.1534	-286	-11780	-195	-9243	101.3
74 10 20	0.1808	-801	-10507	-557	-11297	46.2
74 10 30	0.2082	-979	-2699	-814	-6764	41.0
74 11 10	0.2384	-1021	-308	-939		

Dane zestawione w tablicy 6.1 posłużyły do wyznaczania parametrów regre równania (6.9). Uzyskano następujące wyniki:

C_1 = 28,03 [1/rok] ± 18,7%; C_2 = 4,089 [1/m] ± 24,67%;

r = 0,6954; s = 17,058 [1/rok]; n = 18.

Wykres funkcji (6.9) przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Zależność $c = C_1 + C_2 (-dW_k/dt)$ dla punktów pomiarowych nr 8, E,16 linii pomiarowej nad pokładem 326/5 KWK "Dębieńsko"

Fig. 6.2. Dependence $c = C_1 + C_2 (-dW_k/dt)$ for the measuring points no 8, E, 16 of the measuring line over the seam 326/5 of the "Dębieńsko" colliery

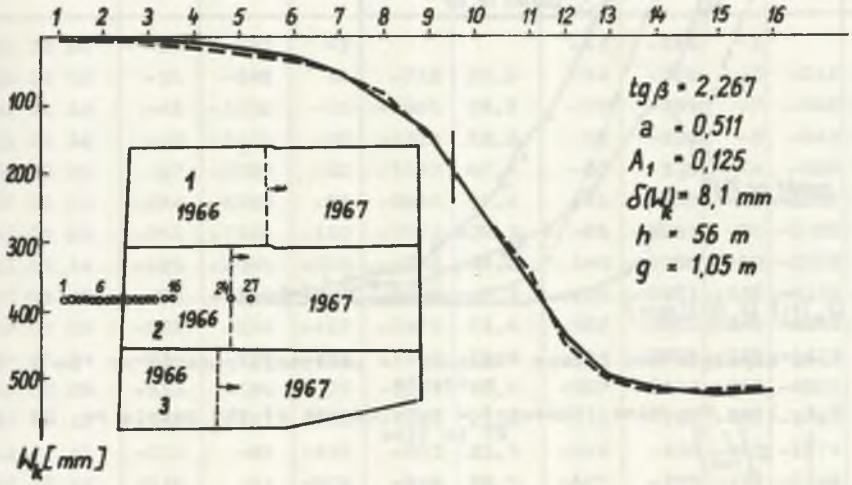
Kopalnia Rud Żelaza "Tadeusz" eksploatowała w latach 1966-67 pokład rudy żelaza o grubości 0,2 - 0,3 m, zalegający na głębokości ok. 56 m. Pokład wybierany był systemem ścianowym z podsadzką suchą. Wysokość ścian wynosiła 1,0 - 1,1 m. Średnia prędkość postępu ścian wynosiła ok. 0.97 m/dobę. Pokład zalega pośród iłów jurajskich. Nadkład stanowię piaski dyluwialne o grubości 2 do 4 m.

Nad rejonem eksploatacji zastabilizowano łącznie 27 punktów obserwacyjnych w odległości co ok. 5 m. Obserwacje geodezyjne obniżeń punktów

wykonywano w odstępach od 2 do 14 dni, wykonując łącznie 25 cykli pomiarowych. Wyniki pomiaru z dnia 67-03-01 stanowiły podstawę do wyznaczenia programem TG12 parametrów wzoru (5.1).

Otrzymano: $tg\beta = 2,267$; $a = 0,516$; $A_1 = 0,125$; $\delta(W) = 9,5$ mm, tj. 1,8% W_{max}.

Wyniki dopasowania i plan sytuacji górniczej pokazano na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Kopalnia Rud Żelaza "Tadeusz":
- - - pomierzony i ——— obliczony wzorem (5.1) profil końcówki niecki obniżeniowej

Fig. 6.3. Iron Ore Mine "Tadeusz":
- - - measured and ——— calculated by means of formula (5.1) final profile of the subsidence trough

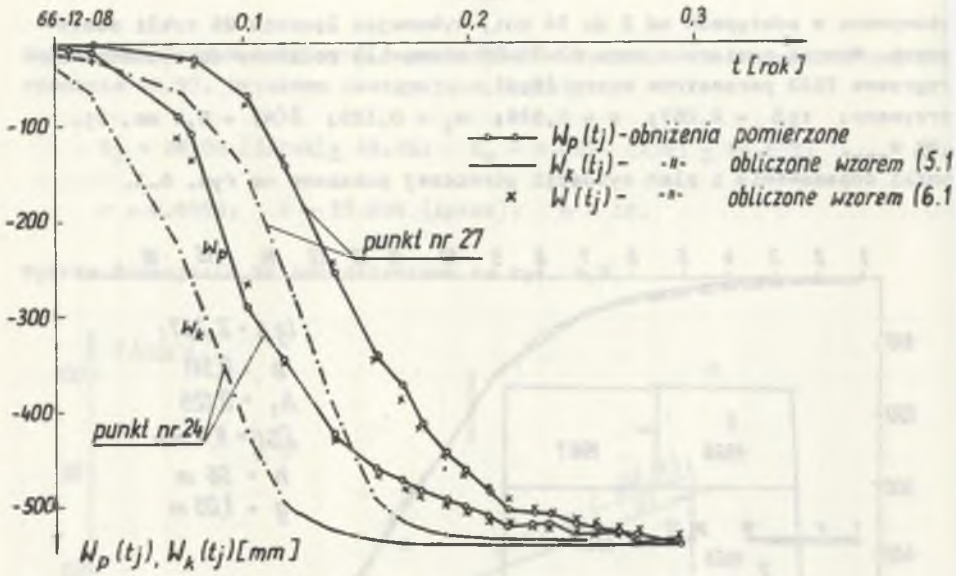
Współczynniki czasu C_1, C_2 wyznaczono analizując pomierzone obniżenia w czasie punktów pomiarowych nr 24 i 27 (tablica 6.2, rys. 6.4 - 6.5). Wyznaczając parametry regresji równania (6.9), odrzucono wielkości $c(t_j)$, dW_k/dt dla dwóch pierwszych cykli pomiarowych, gdyż błąd $\delta(W)$ jest tu porównywalny z mierzoną wielkością $W_p(t)$ oraz odrzucono wyniki trzech ostatnich cykli pomiarowych gdyż przyrosty obniżeń były bardzo małe i nieregularne, a wielkość $W_k(t) - W_p(t)$ jest mniejsza od błędu średniego $\delta(W)$.

Na podstawie danych z tablicy 6.2 otrzymano następujące wyniki:

$C_1 = 28,25$ [1/rok] $\pm$ 7,5%,

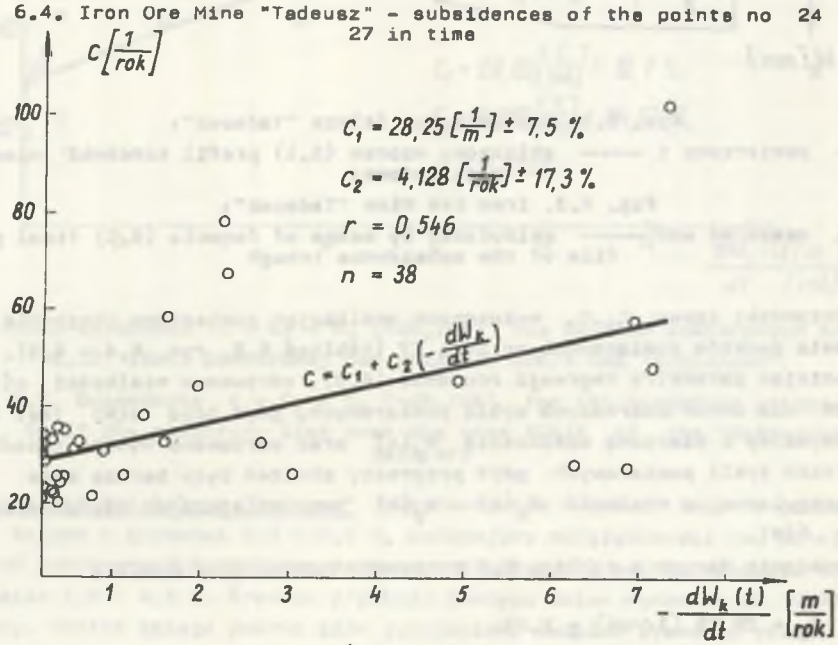
$C_2 = 4,128$ [1/m] $\pm$ 17,3%,

$r = 0,546$; $s = 14,5$ [1/rok]; $n = 38$.



Rys. 6.4. Kopalnia Rud Żelsza "Tadeusz" - obniżenia punktów nr 24 i 27 w czasie

Fig. 6.4. Iron Ore Mine "Tadeusz" - subsidences of the points no 24 and 27 in time



Rys. 6.5. Zależność $c = C_1+C_2\ (-dW_k/dt)$ dla punktów pomiarowych nr 24 i 27 - Kopalnia Rud Żelaza "Tadeusz"

Fig. 6.5. Dependence $c = C_1+C_2\ (-dW_k/dt)$ for the measuring points no 24 and 27 - Iron Ore Mine "Tadeusz"

Tablica 6.2

Kopalnia Rud Żelaza "Tadeusz"
zestawienie wyników obliczeń funkcji $c(t_1)$ wzorem (6.8)

Data pomiaru	Punkt nr 24					Punkt nr 27				
	$W_k(t)$ mm	$\frac{dW_k}{dt}$ mm/rok	$W_p(t)$ mm	$\frac{dW_p}{dt}$ mm/rok	$c(t)$ 1/rok	$W_k(t)$ mm	$\frac{dW_k}{dt}$ mm/rok	$W_p(t)$ mm	$\frac{dW_p}{dt}$ mm/rok	$c(t)$ 1/rok
66 12 08	-26	-657	-3			-13	-111	-3		
66 12 12	-35	-948	-4	-715	25.9	-14	-159	-3	-213	22.2
66 12 14	-41	-1182	-15	-1065	38.2	-15	-199	-7	-182	20.2
66 12 16	-48	-1431	-20	-1703	58.3	-16	-238	-8	-243	24.5
66 12 20	-67	-2097	-22	-1547	67.4	-20	-375	-4	-269	31.0
67 01 03	-224	-6755	-91	-8634	57.6	-55	-1790	-21	-1760	44.2
67 01 05	-262	-7126	-110	-9973	102.3	-66	-2051	-21	-2481	78.1
67 01 14	-425	-6069	-293	-4944	28.2	-140	-4750	-60	-3059	45.3
67 01 20	-493	-2506	-347	-4499	32.7	-238	-6971	-136	-4372	48.1
67 01 28	-522	-594	-427	-2371	21.6	-387	-6692	-246	-4081	27.6
67 02 04	-530	-278	-462	-1968	25.8	-484	-2876	-335	-4423	26.1
67 02 08	-533	-186	-472	-1551	26.0	-507	-1413	-365	-4502	32.4
67 02 11	-534	-127	-485	-1125	22.6	-516	-728	-406	-3483	30.8
67 02 15	-535	-85	-495	-963	23.5	-522	-436	-437	-2874	32.6
67 02 18	-536	-57	-502	-948	28.5	-525	-289	-458	-2388	35.5
67 02 22	-536	-33	-510	-826	34.3	-528	-185	-478	-1779	35.9
67 02 25	-536	-23	-524	-537	29.9	-529	-139	-498	-1232	33.3
67 03 01	-536	-6	-521	-314	21.2	-530	-85	-500	-684	29.9
67 03 04	-537	-5	-520	-284	23.1	-531	-63	-503	-593	23.2
67 03 08	-537	-3	-532	-304	31.7	-531	-38	-513	-634	32.2
67 03 11	-537	-2	-529	-304	46.1	-532	-25	-519	-542	37.8
67 03 15	-537	-1	-529	-264	67.0	-532	-15	-520	-461	45.2
67 03 18	-537	-1	-540	-168	98.8	-532	-6	-526	-420	70.4
67 03 25	-537	-0	-536			-532	-6	-532		

Uwaga: W tablicy 6.2 zestawiono rzeczywiste wielkości obniżeń W_p punktów nr 22 i 27, natomiast obliczając wielkości dW_p/dt i $c(t)$, posłużono się wielkościami W_p jednokrotnie wygładzonymi metodą "średniej ruchomej".

W obydwu analizowanych przypadkach wartości współczynników korelacji r są stosunkowo duże ($r = 0{,}6954$, $\nu = n-2 = 16$; $r = 0{,}546$, $\nu = n-2 = 36$). Test istotności hipotezy $H_0: \varrho = 0$ (brak korelacji liniowej między zmiennymi $c(t)$ i $dW_k(t)/dt$) wskazuje [72 tabl.B.10], że jej poziom istotności $\alpha < 0{,}005$, tzn. jest bardzo mały.

Z przeprowadzonej wyżej analizy wyników pomiarów dwóch linii obserwacyjnych wynika wniosek: hipoteza określona równaniem różniczkowym (3.3) jest możliwa do zaakceptowania i należy ją poddać procesowi dalszej weryfikacji.
Weryfikacja ta będzie polegała na porównaniu pomierzonych profili nieustalonych niecek obniżeniowych z profilami obliczonymi wzorami (5.1, 6.1).

6.2.2. Wyznaczanie parametrów C_1, C_2 z pomiarów profili nieustalonych niecek obniżeniowych

Większość pomiarów obniżeń prowadzona jest z małą częstotliwością, nie pozwalającą na dostatecznie dokładne określenie prędkości obniżeń punktów pomiarowych. Wyklucza to możliwość wyznaczenia wartości C_1, C_2 sposobem opisanym w rozdziale 6.2.1.

Jeśli liczba punktów pomiarowych jest dostatecznie duża i wyniki pomiarów przedstawiają w miarę pełne profile nieustalonych niecek obniżeniowych to zagadnienie wyznaczania parametrów C_1, C_2 można sprowadzić do szukania minimum wariancji resztkowej funkcji:

$$B_2(C_1, C_2) = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{j_t} \left[W_{ij}(C_1, C_2, tg\beta, a, A_1) - W_{pij} \right]^2 \qquad (6.16)$$

gdzie:

- j_t - ilość cykli pomiarowych,
- k - ilość punktów pomiarowych,
- $W_{ij}(,...)$ - teoretyczna wielkość obniżenia i-tego punktu pomiarowego w j-tym cyklu pomiarowym obliczona wg wzorów (5.1, 6.1),
- W_{pij} - pomierzona wielkość obniżenia i-tego punktu w j-tym cyklu pomiarowym,
- $a, tg\beta, A_1$ - parametry wyznaczone na podstawie profilu ustalonej niecki obniżeniowej.

Wpływ wielkości średniego błędu obniżeń (W) na wielkość błędów średnich $\delta(C_1)$, $\delta(C_2)$ wyznaczanych parametrów C_1, C_2 oszacowano stosując metodologię opisaną przez B.Drzęźlę w pracy [17].

$$cov(\Delta C) = (A^T A)^{-1} \delta^2(W) \qquad (6.17)$$

gdzie $cov(\Delta C)$ - macierz wariancyjno-kowariancyjna.

Elementy znajdujące się na głównej przekątnej stanowią poszukiwane wielkości wariancji δ^2 parametrów C_1, C_2.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_1}{\partial C_1}, & \frac{\partial W_1}{\partial C_2} \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots \\ \frac{\partial W_n}{\partial C_1}, & \frac{\partial W_n}{\partial C_2} \end{bmatrix} \qquad n = k \times j_t \text{ - ilość spostrzeżeń}$$

Stosowanie wzorów (5.1), (6.1) wymaga użycia metod numerycznych, dlatego dla wyznaczenia parametrów C_1, C_2 skonstruowano program C112.EXE działający na komputerach serii IBM-PC. Program ten pozwala na analizę praktycznie dowolnie złożonych sytuacji górniczych.

Danymi wejściowymi do programu C112 są:

- wyniki pomiarów obniżeń, tj. współrzędne punktów pomiarowych i wartości pomierzonych obniżeń w dowolnie wybranych cyklach pomiarowych,
- daty wykonania pomiarów,
- współrzędne wierzchołków wieloboku opisującego kształt eksploatowanej ściany (kształt wieloboku- dowolny, ilość ścian - dowolna),
- daty rozpoczęcia eksploatacji poszczególnych ścian, wybiegi ścian i daty osiągnięcia tych wybiegów,
- wysokości furt eksploatacyjnych,
- parametry $tg\beta, a, A_1$ wyznaczone programem TG12.

W wyniku obliczeń programem C112 otrzymujemy:

- wielkości parametrów C_1, C_2 odpowiadające warunkowi minimum wariancji resztkowej (6.16),
- tablicę wartości błędu średniego $\delta(W(C_1,C_2)) = (B_2(C_1,C_2)/n)^{0.5}$ dla $C_1 \in (C_{1p}, C_{1k})$, $C_2 \in (0, C_{2k})$,
- wartości obniżeń W_{pij}, W_{ij} i prędkości obniżeń dW_{kij}/dt_{ij},
- wielkości potrzebne do skonstruowania macierzy pochodnych A, stanowiące dane wejściowe do programu BŁĄDC.

Dodatkowo skonstruowano szereg programów pomocniczych ułatwiających manipulowanie numeryczną bazą danych o eksploatacji dokonanej, bazą danych w wynikach pomiarów obniżeń oraz programów przedstawiających wprowadzone dane i wyniki obliczeń w formie graficznej.

Ocenę przydatności równania (3.3) do opisu obniżeń powierzchni w czasie dokoneno na podstawie obserwacji geodezyjnych obniżeń pochodzących z siedmiu górnośląskich kopalń węgla kamiennego i jednej kopalni rudy żelaza.

Opis materiału obserwacyjnego i wyników obliczeń składa się z następujących punktów:

- krótkiej charakterystyki warunków górniczo-geologicznych,
- szkicu sytuacji górniczej,
- wyników dopasowania obniżeń pomierzonych i obliczonych przedstawionych w formie wykresów,
- ogólnych tabelarycznych zestawień wyników obliczeń.

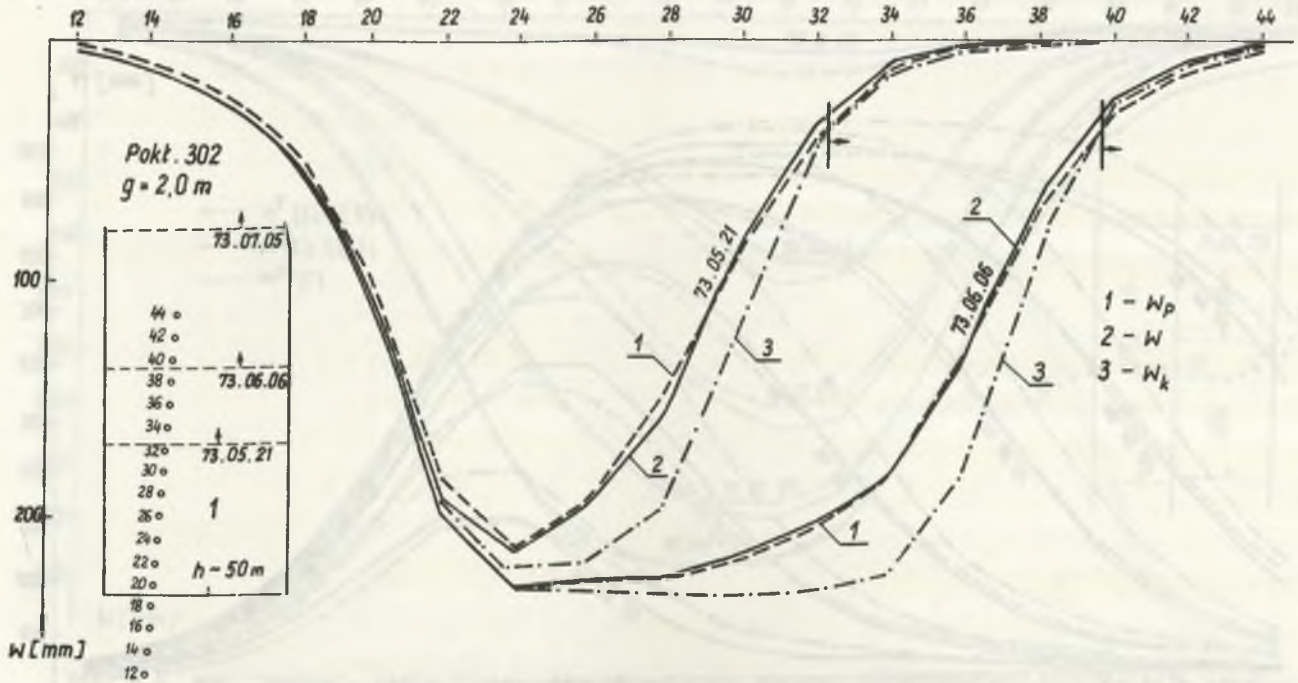
1. KWK "Komuna Paryska" prowadziła w 1973 roku eksploatację pokładu 302. Pokład wybierano poprzecznymi ścianami o wysokości 2,5 m, stosując do likwidacji zrobów podsadzkę hydrauliczną. Miesięczny postęp ścian wynosił średnio 75 m. Pokład 302 w omawianym rejonie zalega bardzo płytko h = 50 - -24 m. Górotwór tworzą warstwy orzeskie i kilkumetrowa warstwa nadkładu czwartorzędowego. W rejonie ścian założono między innymi linię obserwacyjną równoległą do wybiegu ściany nr 25, utworzoną przez punkty pomiarowe zastabilizowane w odstępach 5 m.

2. KWK "Dąbieńsko" - warunki górniczo-geologiczne opisano w rozdziale 6.2.2.

3. KWK "Janina" w rejonie Gromiec-Szyjki na głębokości 160-180 m prowadziła w latach 1974-76 eksploatację pokładu 118, który wybierany był jednocześnie dwiema podłużnymi ścianami zawałowymi o łącznej długości 280 m. Wysokość ścian wynosiła 2,8 m. Pomiędzy ścianami zachowywana była ustępliwość 10-20 m. Wzdłuż drogi nad rejonem eksploatacji zastabilizowano w odległościach co ok. 25 m ciąg punktów obserwacyjnych. Miesięczny postęp frontu ścianowego wynosił 77 m. Górotwór w omawianym rejonie tworzą warstwy libiąskie i łaziskie, zbudowane z warstw piaskowców i łupków ilastych oraz 39 m warstw nadkładu trzecio- i czwartorzędowego. Wśród warstw trzeciorzędu występują piaskowce o łącznej miąższości 17 m. W obliczeniach uwzględniono nachylenie pokładu $\alpha = 10^{o}$, przyjmując wartość współczynnika dewiacji wpływów $k = 0,8$.

4. KWK "Chwałowice" prowadziła w latach 1968-71 eksploatację pokładów 354, 356 i 360 systemem ścianowym z zawałem stropu. Pokłady w analizowanym rejonie zalegają na głębokości 270-350 m. Górotwór tworzą warstwy piasków, żwirów, glin czwartorzędowych, iłów i piasków mioceńskich o łącznej miąższości 220 m oraz warstwy orzeskie wykształcone w postaci facji łupkowo-piaskowcowej ze zdecydowaną przewagą łupków. Nad rejonem eksploatacji założono dwie, wzajemnie prostopadłe linie obserwacyjne 1a i 2b. Wyniki pomiarów linii 1a dobrze obrazują rozwój niecki obniżeniowej po wybraniu kolejnych pól ścianowych w pokładzie 354, a następnie w pokładach 358 i 360 (rys. 5.1). Zbyt mała częstotliwość pomiarów uniemożliwia jednak wyznaczenie parametrów C_1, C_2. Parametry te wyznaczano na podstawie wyników obserwacji linii 2b usytuowanej równolegle do biegu ściany nr 3 w pokładzie 354. Miesięczny postęp ściany nr 3 był zmienny, mieścił się w granicach 56-70 m. Górotwór w rejonie ściany nr 3 był wstępnie naruszony eksploatacją ściany nr 2 w pokładzie 354.

5. Kopalnia Rud Żelaza "Tadeusz" - warunki górniczo-geologiczne opisano w rozdziale 6.2.2.

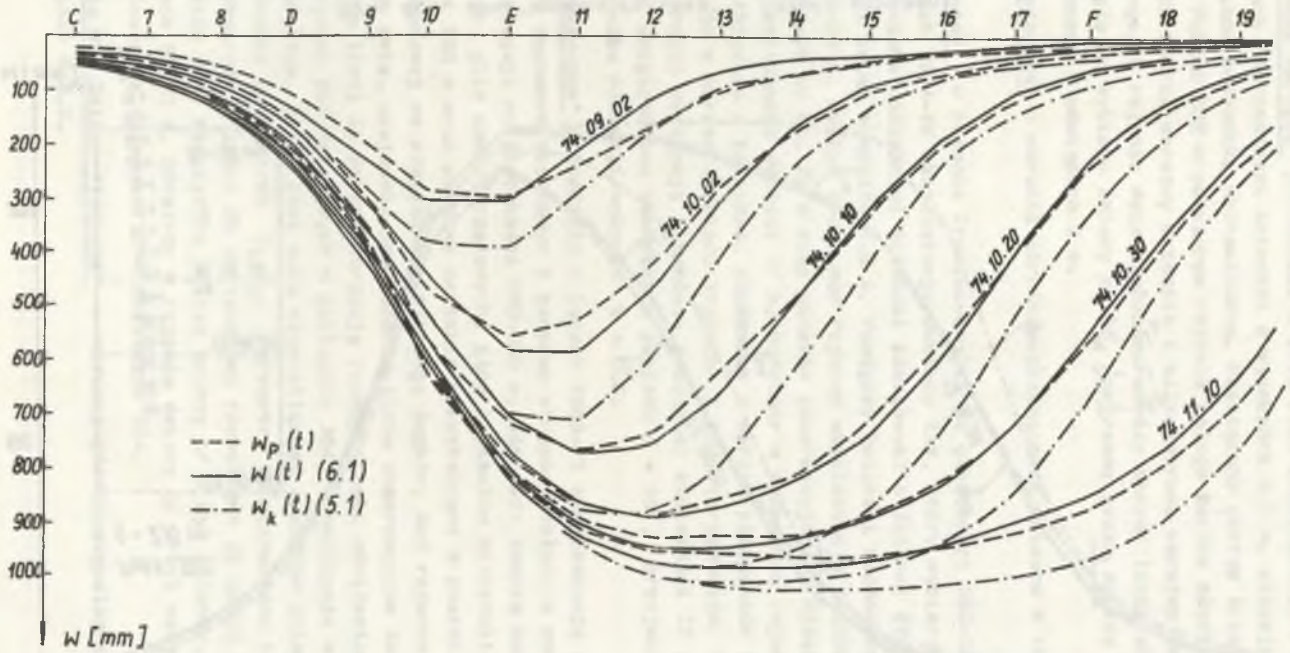


Rys. 6.6. KWK "Komuna Paryska" - rozwój obniżeń:

1 --- W_p - obniżenia pomierzone, 2 ——— W - obniżenia obliczone wzorami (6.1), (5.1), 3 -·-·- W_k - obniżenia końcowe obliczone wzorem (5.1)

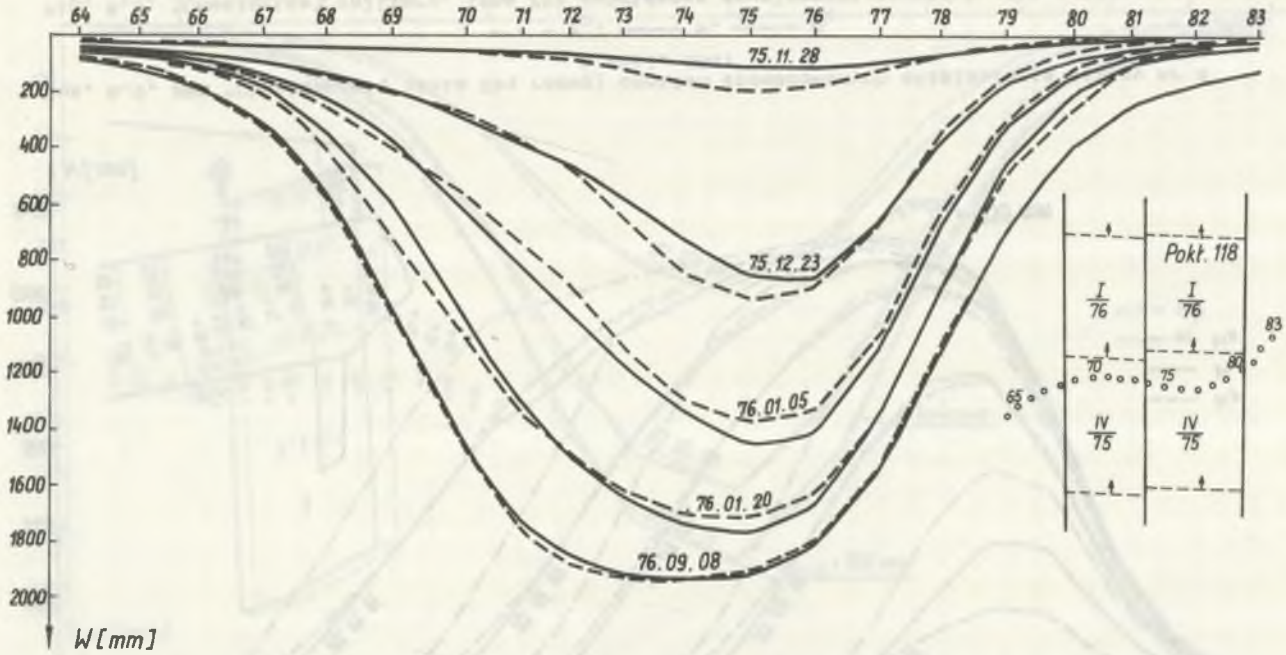
Fig. 6.6. "Komuna Paryska" colliery - of subsidence development:

1 --- W_p - subsidence measured, 2 ——— W - subsidence calculated by formulas (6.1), (5.1), 3 -·-·- W_k - final subsidence calculated by formula (5.1)



Rys. 6.7. KWK "Dębieńsko" - rozwój obniżeń spowodowanych eskploatacją ściany 4a w pokładzie 326/5:
- - - W_p, ——— W, -·-·- W_k

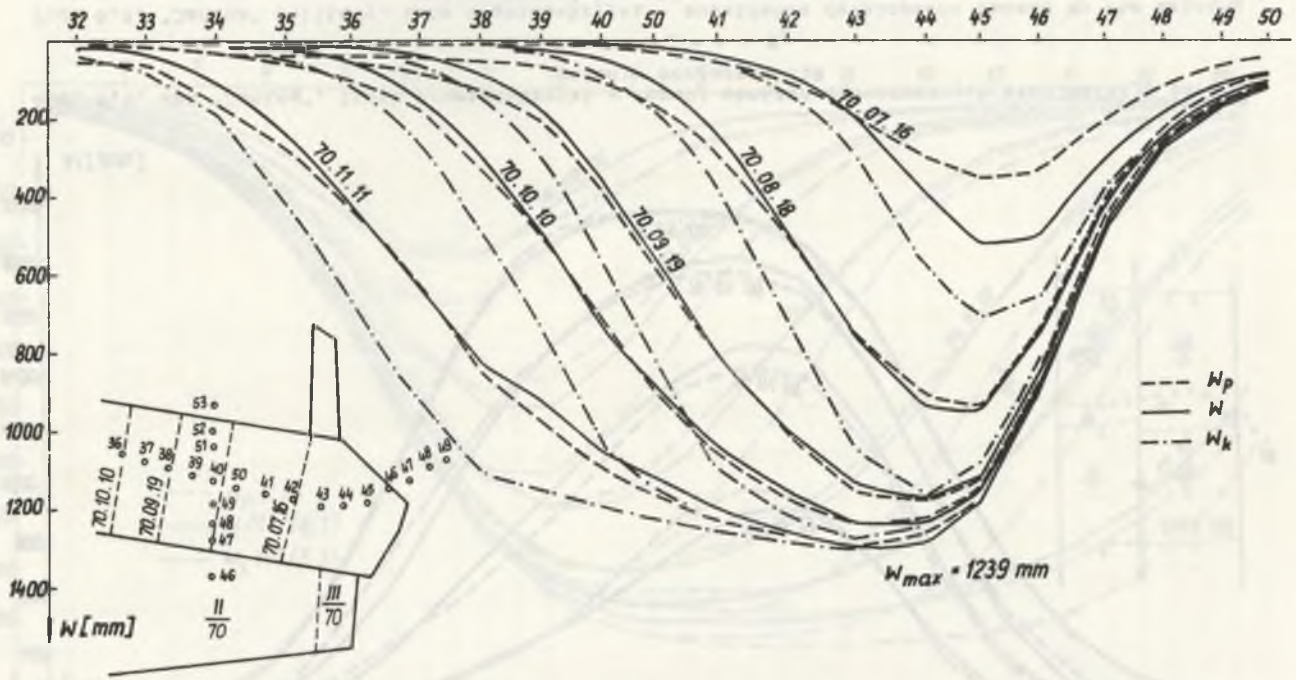
Fig. 6.7. "Dębieńsko" colliery - subsidence development caused by the mining of longwall 4a in seam 326/5



Rys. 6.8. KWK "Janina", linia Gromiec-Szyjki - rozwój obniżeń spowodowanych eksploatacją pary ścian w pokładzie 118

——— W, - - - W_p

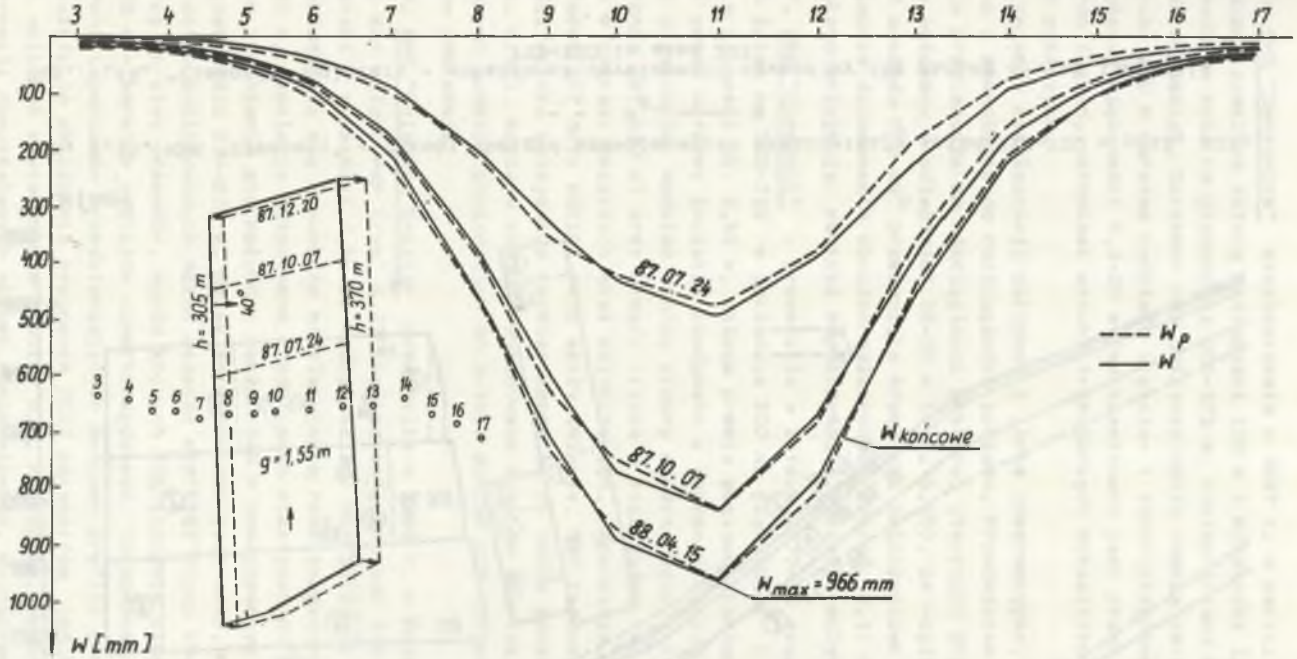
Fig. 6.8. "Janina" colliery, line Gromiec-Szyjki - subsidence development caused by the mining of a pair of longwalls in seam 118



Rys. 6.9. KWK "Chwałowice", linia 2b: rozwój obniżeń spowodowanych eksploatacją ściany nr 4 w pokł. 354:

- - - W_p, ——— W, —·—·— W_k

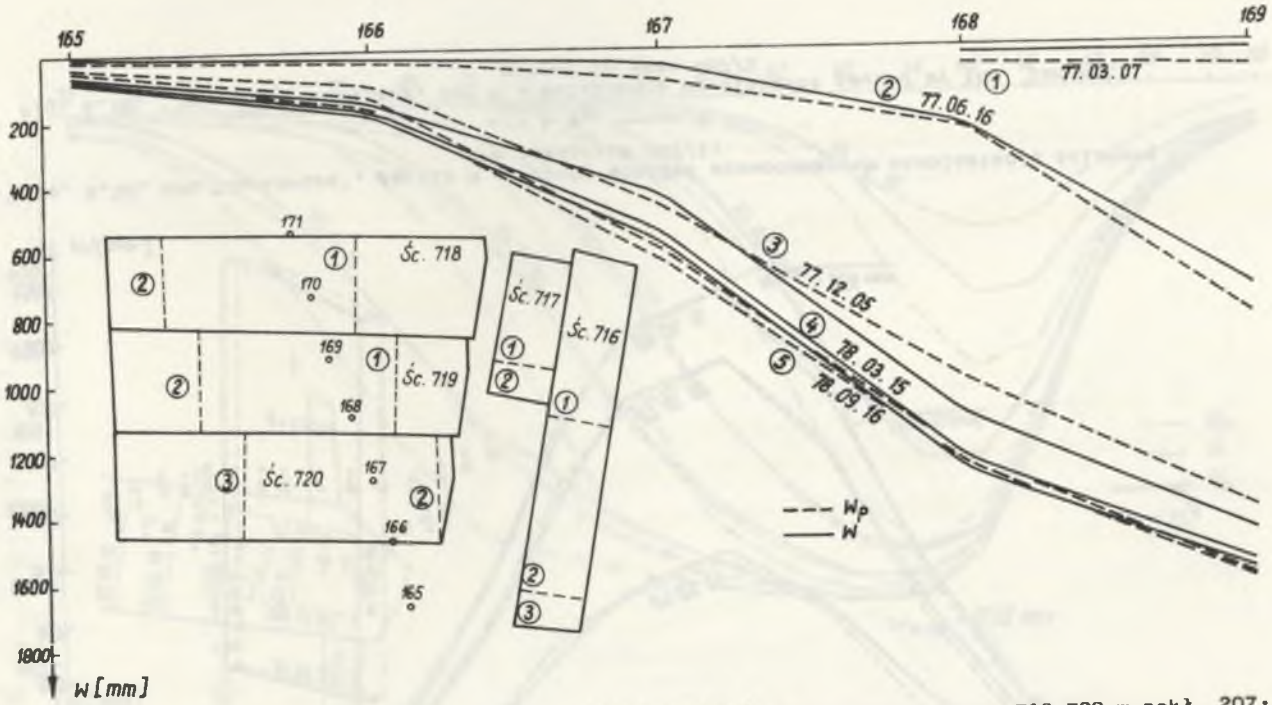
Fig. 6.9. "Chwałowice" colliery, line 2b: subsidence development caused by the mining of longwall no 4 in seam 354



Rys. 6.10. KWK "Jankowice", partia N - rozwój obniżeń spowodowanych eksploatacją ścianową w pokładzie 407/1:

- - - W_p, ——— W

Fig. 6.10. "Jankowice" colliery, lot N - subsidence development caused by the longwall mining in seam 407/1



Rys. 6.11. KWK "Ziemowit" - rozwój obniżeń spowodowanych eksploatacją ścian 718-720 w pokł. 207: - - - w_p, ——— w

Fig. 6.11. "Ziemowit" colliery - subsidence development caused by the mining of the longwalls 718-720 in seam 207

6. KWK "Jankowice" eksploatowała w 1987 r. w partii N pokład 407/1 podłużną zawałową ścianą o długości 150 m i wysokości 1,5 m. Eksplatacja prowadzona była na głębokości 303-375 m. Postęp ściany był mały, od 30 do 40 m/miesiąc. Górotwór nad pokładem 407/1 tworzą warstwy rudzkie i gruba 230 m warstwa nadkładu trzecio- i czwartorzędowego. Czwartorzęd o łącznej miąższości 0,3-25 m reprezentowany jest przez warstwy piasków, żwirów i glin, natomiast utwory trzeciorzędu wykształcone są w postaci iłów pylastych.
Nad rejonem eksploatacji założono 2 linie obserwacyjne, usytuowane prostopadle i równolegle do rozciągłości pokładu. Przedmiotem analizy była linia prostopadła do rozciągłości pokładu, utworzona przez punkty pomiarowe położone w odległości 22-30 m (rys. 6.10). Ze względu na znaczny upad pokładu $\alpha = 25^{o}$ przesunięto krawędzie obliczeniowe w stronę upadu. Najlepsze dopasowanie obniżeń obliczonych wzorem (5.1) do wyników pomiaru uzyskano przyjmując wartość współczynnika dewiacji wpływów k = 0,5.

7. KWK "Ziemowit" - prowadziła w latach 1977-78 eksploatację zawałowych ścian nr 718-719 w pokładzie 207 na głębokości h = 466 m. Pokład 207 o grubości ok. 2,85 m, zalega prawie poziomo. Karbon reprezentowany jest przez warstwy łaziskie zbudowane z łupków ilastych i piaszczystych oraz piaskowców. Nadkład tworzą utwory czwartorzędu i trzeciorzędu (łącznie ok. 130 m) oraz utwory triasu o miąższości ok. 110 m, wykształcone w postaci zwięzłych skał dolomitowych. Generalnie, w górotworze nad pokładem 207 duży udział mają skały zwięzłe. Nad rejonem ścian nr 718-720 wzdłuż szlaku kolejowego rozmieszczone są co 100 m punkty pomiarowe (rys. 6.11). Pomiary obniżeń wykonywane były co kwartał. W rejonie analizowanych punktów pomiarowych 16.5-16.9 pokład 207 był pierwszym eksploatowanym pokładem.

8. KWK "Bolesław Śmiały" prowadziła w 1969 r. w rejonie filara ochronnego dla szlaku PKP (rys. 5.2) eksploatację pokładu 318 dwiema zawałowymi ścianami o wysokości 1,55 m. Wzdłuż szlaku PKP założono linię obserwacyjną składającą się z punktów niwelacyjnych rozmieszczonych w odległości 25-30 m. Niwelacje wykonywane w odstępach miesięcznych obejmują cały okres ujawniania się wpływów. Pokład 318 w analizowanym rejonie zalega na głębokości 214-235 m. Nachylenie pokładu jest małe, $\alpha < 5^{o}$. Miesięczny postęp analizowanych ścian osiągał wielkość rzędu 60-70 m. Górotwór tworzą warstwy orzeskie, wśród których 40% stanowią piaskowce i ok. 30-50 m - warstwa nadkładu czwartorzędowego, zbudowanego głównie z glin.

Wyniki pomiarów przedstawiających końcowe profile niecek obniżeniowych posłużyły do obliczenia programem TG12 parametrów $tg\beta, A_1, a$. Rezultaty tych obliczeń zestawiono w tablicy 6.3. Następnie, wykorzystując wyniki obserwacji nieustalonych niecek obniżeniowych, wyznaczono programem C112 wartości parametrów C_1, C_2 i wartość błędu obniżeń $\delta(W)$ odpowiadającą tym parametrom. Dodatkowo, dla każdej z analizowanych linii obliczono wartość błędu obniżeń $\delta(W(c))$ tego równania. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 6.4.

Tablica 6.3

Lp.	Kopalnia	pokład	głębokość [m]	W_{max} [mm]	A_1	tgβ	a	σ(W_k) [mm] σ/W_{max} [%]	Numer rysunku
1	Komuna Paryska	302	24-50 śr.47	229	0.200	1.733	0.114	4.7 2.1%	6.6
2	Dębień-sko	326/5	137-173	1032	0.247	2.233	0.737	12.2	6.1
3	Janina	118	150-190 śr.175	1930	0.266	1.733	0.717	16.3 0.8%	6.7
4	Chwałowice linia 2b	354	278-308 śr.285	1293	0.100	3.067	0.849	32.8 2.7%	6.9
4a	linia 1a	354+ 356+ 360	278-308 282-324 306-350	3021	0.142	2.265	0.972	53.6 1.6%	5.1
5	Tadeusz (ruda żelaza)		56	519	0.125	2.264	0.511	8.1 1.5%	6.5
6	Jankowice	407/1	303-375 śr.339	966	0.070	2.970	0.711	13.3 1.3%	6.10
7	Ziemowit	207	466	1627	0.317	2.235	0.636	28.4 1.8%	6.11
8	Bolesław Śmiały	318	214+235 śr.220	1123	0.300	1.950	0.741	13.8 1.2%	5.2

Tablica 6.4

Lp.	Kopalnia	C_1 [1/rok]	C_2 [1/m]	σ(W) [mm]	c=const [1/rok]	σ(W(c)) [mm]	max($\frac{dW_k}{dt}$) [m/rok]	A_1/tgβ
1	Komuna Paryska	70±7.68%	2.80±52%	6.05	83.0	6.3	8.98	0.115
2	Dębień-sko	28.3± 3%	3.0±4%	17.50	57.0	24.3	20.20	0.106
3	Janina	6.67±13%	33.3±11%	38.0	155.0	44.2	17.81	0.153
4	Chwałowice linia 2b	12.7±7.5%	0.5±34%	35.0	15.0	36.0	9.67	0.032
5	Tadeusz	21.8±7%	2.65±7%	8.2	37.5	14.5	7.38	0.055
6	Jankowice	6.8±18%	1.5±11%	15.1	10.0	22.0	3.54	0.023
7	Ziemowit	2.33±60%	12.7±38%	34.0	54.0	42.0	3.67	0.134
8	Bolesław Śmiały	19±112%	40.0±18%	26.1	415.0	28.4	9.15	0.154

6.3. Analiza wyników aproksymacji pomierzonych profili nieustalonych niecek obniżeniowych - wpływ wielkości parametrów $tg\beta$, A_1 i głębokości eksploatacji na wartość parametrów C_1, C_2

Dziewięć przeanalizowanych przypadków stanowi nieliczną reprezentację możliwych sytuacji górniczo-geologicznych, dlatego każde uogólnienie uzyskanych rezultatów jest obarczone trudnym do oszacowania błędem. W szczególności porównanie wyników nr 4 i 4a wskazuje na zmienność własności mechanicznych górotworu w ramach tego samego rejonu i pokładu. Argumentem przemawiającym za możliwością wyciągnięcia ogólniejszych wniosków na podstawie wyników zestawionych w tablicach 6.3 i 6.4 jest duża dokładność opisu pomierzonych obniżeń wzorami (5.1), (6.1).

Dla analizowanych linii pomiarowych średni błąd obniżeń obliczonych wzorem (5.1) mieści się w przedziale 1,2-2,7% maksymalnego pomierzonego obniżenia, a w przypadku wzoru (6.1) błąd ten osiąga wielkość 6-45 mm, tj. 1,6 - 3,1% wielkości obniżeń maksymalnych końcowych.

Wyniki zestawione w tablicy 6.3 i analiza własności mechanicznych skał zalegających nad eksploatowanymi pokładami dosyć wyraźnie wskazują, że bardziej zwięzłym skałom odpowiada wyższa wartość parametru A_1. Ze względu na zaobserwowaną wartość parametru A_1 analizowane linie można podzielić na 3 grupy:

I - $A_1 < 0,15$ - kopalnie "Jankowice", "Chwałowice" - duży udział bardzo słabych skał nadkładu trzeciorzędowego i czwartorzędowego,

II - $0,15 < A_1 < 0,25$ - kopalnie "Komuna Paryska" i "Dębieńsko" - udział skał nadkładu trzeciorzędowego i czwartorzędowego mały lub średni, skały karbonu średnio zwięzłe,

III - $0,25 < A_1 < 0,317$ - kopalnie "Janina", "Bolesław Śmiały" i "Ziemowit" - górotwór nad eksploatowanym pokładem zbudowany z dużym udziałem piaskowców, a nawet dolomitów.

Wyniki te jakościowo potwierdzają rezultaty pracy P.Strzałkowskiego [73]. Porównanie przypadków eksploatacji prowadzonych na podobnych głębokościach pozwala zauważyć, że większym wartościom parametru $tg\beta$ odpowiadają mniejsze wielkości parametru A_1.

Wartości parametrów C_1, C_2, $C_1|_{C_2=0}$ zestawione w tablicy 6.4 są duże, co świadczy o stosunkowo szybkim ujawnianiu się obniżeń za postępującym frontem ścianowym. Należy pamiętać, że parametry te zostały wyznaczone w ten sposób, by opisywały cały pomierzony profil nieustalonej niecki obniżeniowej, dlatego ich wartości będą na ogół inne (większe) niż wartości wyznaczone na podstawie pomiaru końcowej fazy obniżeń [31].

Szczególnie wysokie wartości parametrów C_1, C_2 uzyskano analizując wyniki obniżeń z kopalń "Janina", "Bolesław Śmiały" i "Ziemowit", gdzie obserwuje się również duże wartości parametru A_1. Oznacza to, że w obecności zwięzłych skał występuje duże przesunięcie wpływów w stronę zrobów, a obniżenia obserwowane w danej chwili t bardzo nieznacznie różnią się od potencjalnie możliwych obniżeń $W_k(t)$. Istotne różnice pomiędzy wielkościami $W_k(t)$ i $W(t)$ występują w punktach położonych na zewnątrz wybranego pola eksplatacyjnego. Przykładowo, (rys. 6.8), eksploatując pokład 118 w dniu 20.10.1976 w punkcie nr 75, położonym nad zrobami, $W(t) \approx 0,95\ W_k(t)$, natomiast obniżenie punktów położonych nad calizną, osiągnęło w tym dniu wielkość $W(t) \approx 0,5 \div 0,7\ W_k(t)$.

Ogólnie wysokie wartości wyznaczonych parametrów C_1, C_2 oraz fakt, że ich wartość znacznie wzrasta ze wzrostem zwięzłości górotworu, znajduje jakościowe potwierdzenie w wynikach badań laboratoryjnych reologicznych własności skał.

Z.Kłeczek [36] stwierdza, że dla opisu reologicznych własności skał karbońskich można stosować model Poyntinga - Thomsona. W odniesieniu do zagadnienia ruchów górotworu oznacza to, że pewna część wpływów może się ujawniać w sposób natychmiastowy. Wyznaczone laboratoryjnie z próby pełzania czasy opóźnienia sprężystego badanych skał są bardzo małe, od ok. 200 minut dla piaskowca, do ok. 7200 minut dla łupku ilastego. Widać stąd, że piaskowiec jako bardziej zwięzła skała może wielokrotnie szybciej osiągnąć asymptotyczną wartość odkształcenia.

W literaturze [62] przeważa pogląd odwrotny, tzn. wartość parametru "c" równania (2.5) jest mała, mieszcząc się w przedziale 0,5-5,0[1/rok], a ponadto zaleca się przyjmować mniejsze wartości "c" dla skał zwięzłych. Pogląd ten został ugruntowany na podstawie badań końcowej fazy obniżeń dla $t > t_z$.

Najmniejszą wartość parametru $C_2 = 0,5\ m^{-1}$ wyznaczono dla linii obserwacyjnej 2b KWK "Chwałowice". Parametr C_2 jest tu czterokrotnie mniejszy niż w przypadku linii obserwacyjnej na KWK "Jankowice", gdzie były podobne warunki górniczo-geologiczne. Bardzo małą wartość parametru C_2 można uzasadniać wcześniejszymi wpływami bocznymi ściany nr 3. Należy wnioskować, że w górotworze naruszonym wcześniejszą eksploatacją następuje wzrost parametru C_1, któremu towarzyszy spadek wartości parametru C_2.

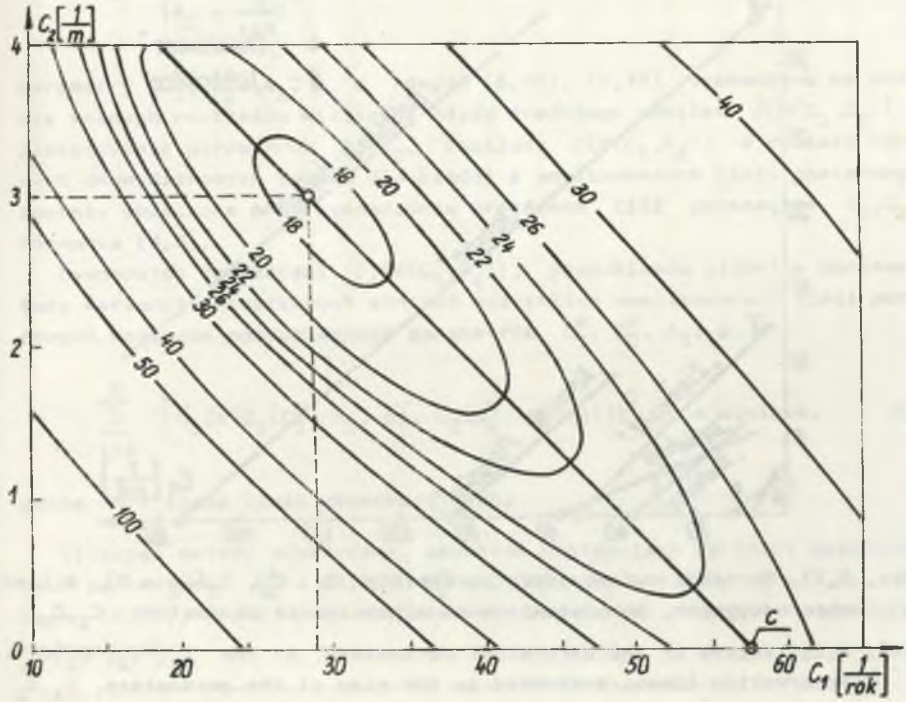
<u>We wszystkich analizowanych przypadkach wartość parametru C_2 jest znacznie większa od zera, gdyż średni błąd obniżeń obliczanych na podstawie równania (3.3) autora jest mniejszy od błędu średniego obniżeń obliczonych na podstawie równania (2.5) S.Knothego.</u>

Potwierdza to słuszność tezy pracy określonej równaniem (3.3).

Wartości C_1, C_2 zestawione w tablicy 6.4 cechuje bardzo duży zakres zmienności, wielokrotnie przekraczający wielkość błędu średniego, z jakim te parametry zostały wyznaczone. Wynika stąd wniosek, że wyznaczone z pomiarów wielkości C_1, C_2 są zależne od szeregu systematycznych czynników, a w szczególności od własności mechanicznych deformowanego górotworu.

W praktyce, wykonując prognozę obniżeń, na ogół nie dysponujemy wynikami obserwacji pozwalającymi na wyznaczenie wartości C_1, C_2 dla konkretnych warunków górniczo-geologicznych. Istnieje więc potrzeba opracowania wzorów umożliwiających wstępne oszacowanie wartości C_1, C_2 na podstawie znajomości innych, łatwiejszych do wyznaczenia parametrów, charakteryzujących się znacznie mniejszym obserwowanym zakresem zmienności.

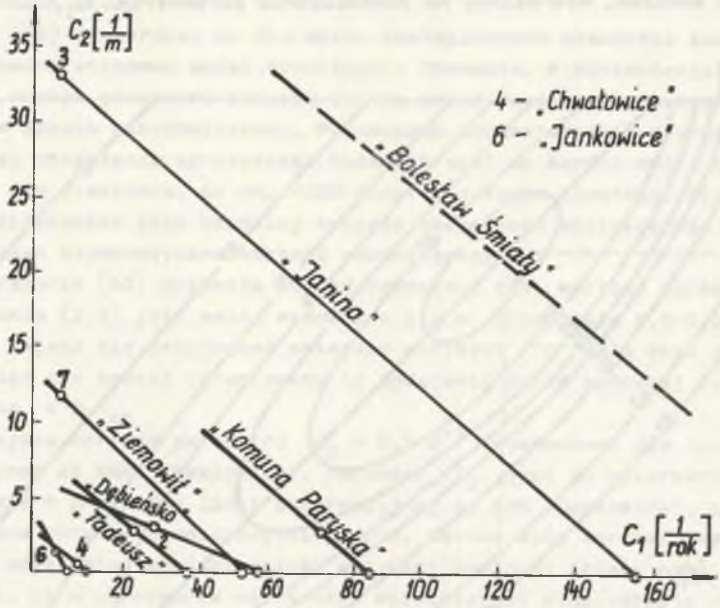
Pomiędzy wyznaczanymi wielkościami parametrów C_1, C_2 występuje zależność o charakterze liniowym. Świadczy o tym pokazany na rys. 6.12 typowy dla analizowanych przypadków plan warstwicowy wielkości błędu średniego obniżeń, wykreślony na płaszczyźnie parametrów C_1, C_2.



Rys. 6.12. KWK "Dębieńsko" - plan warstwicowy wartości średniego błędu $\delta[W(C_1, C_2)]$ [mm]

Fig. 6.12. "Dębieńsko" colliery - contour plan of value of the mean error $\delta[W(C_1, C_2)]$ [mm]

Funkcja błędu $\delta(W(C_1,C_2))$ ma postać prostoliniowego wąwozu. Dno tego wąwozu można opisać prostą l przechodzącą przez punkt o współrzędnych (C_1,C_2) wyznaczonych parametrów równania (3.3) oraz przez punkt $(C_1=c,0)$, pokazujący położenie minimum funkcji błędu równania (2.5) S.Knothego. Wzdłuż prostej l wielkość błędu $\delta(W(C_1,C_2))$ jest bliska minimum, natomiast gwałtownie rośnie w kierunku prostopadłym do prostej l. Na rys. 6.13 przedstawiono wyniki z tablicy 6.4 w postaci prostych l_i, które obrazują na płaszczyźnie C_1,C_2 położenie dna wąwozu funkcji błędu $\delta(W(C_1,C_2))$. Odległość D prostej l od początku układu współrzędnych C_1,C_2 charakteryzuje szybkość ujawniania się potencjalnie możliwych obniżeń $W_k(t)$. Największą odległością D prostej l od początku układu współrzędnych charakteryzuje się przypadek nr 8 (KWK "Bolesław Śmiały"), gdzie obserwowane różnice pomiędzy obniżeniami W(t) i $W_k(t)$ są bardzo małe, praktycznie pomijalne.



Rys. 6.13. Wartości wyznaczonych parametrów C_1, C_2, $C_1(C_2 = 0)$ 8 linii obserwacyjnych, przedstawione na płaszczyźnie parametrów C_1,C_2

Fig. 6.13. Values of the determined parameters of the C_1, C_2, $C_1(C_2 = 0)$ 8 obserwation lines, presented in the plan of the parameters C_1,C_2

Granicznym przypadkom nr 8 (największa odległość D) oraz nr 4 i 6 (najmniejsza odległość D) odpowiadają największe i najmniejsze wartości wyrażenia $A_1/tg\beta$ Oznacza to, że wyrażenie $A_1/tg\beta$ charakteryzuje własności mechaniczne górotworu (ze względu na szybkości ujawniania

wpływów) i może być jedną ze zmiennych niezależnych poszukiwanych funkcji. Za drugą zmienną niezależną, mającą istotny wpływ na szybkość ujawniania wpływów, należy uznać [5,40,57,70,82] głębokość eksploatacji h. Wstępna analiza wielkości zestawionych w tablicach 6.3, 6.4 wskazuje, że głębokość eksploatacji ma wpływ na wielkość parametru C_1, natomiast jej wpływ na wielkość parametru C_2 jest nieistotny lub trudny do zauważenia.

Ostatecznie, analizując również możliwość zastosowania szeregu innych modeli regresji, przyjęto, że główne cechy obserwowanej zmienności parametrów C_1, C_2 można opisać stosując wzory o następującej postaci:

$$C_1 = \frac{C_1^o}{h^p \left(A_2 - \frac{A_1}{tg\beta}\right)} \quad [1/rok] \tag{6.18}$$

$$C_2 = \frac{C_2^o}{\left(A_2 - \frac{A_1}{tg\beta}\right)^q} \quad [1/m] \tag{6.19}$$

Parametry C_1^o, C_2^o, A_2, p, q równań (6.18), (6.19) wyznaczono na podstawie znanych rozkładów wielkości błędu średniego obniżeń $\delta(W(C_1,C_2))$ na płaszczyźnie parametrów C_1,C_2. Rozkłady $\delta(W(C_1,C_2))$ w postaci odrębnych dwuwymiarowych tablic dla każdej z analizowanych linii pomiarowych zostały obliczone przy wyznaczaniu programem C112 parametrów C_1,C_2 równania (3.3).

Dysponując rozkładami $\delta_i(W(C_1,C_2))$, poszukiwano globalne minimum sumy wariancji resztkowych obniżeń wszystkich analizowanych linii pomiarowych względem poszukiwanych parametrów C_1^o, C_2^o, A_1, p, q:

$$\sum_{i=1}^{n} \left[\delta_i(W(C_1(C_1^o, A_2, p), C_2(C_2^o, A_2, q)))\right]^2 = \text{minimum}, \tag{6.20}$$

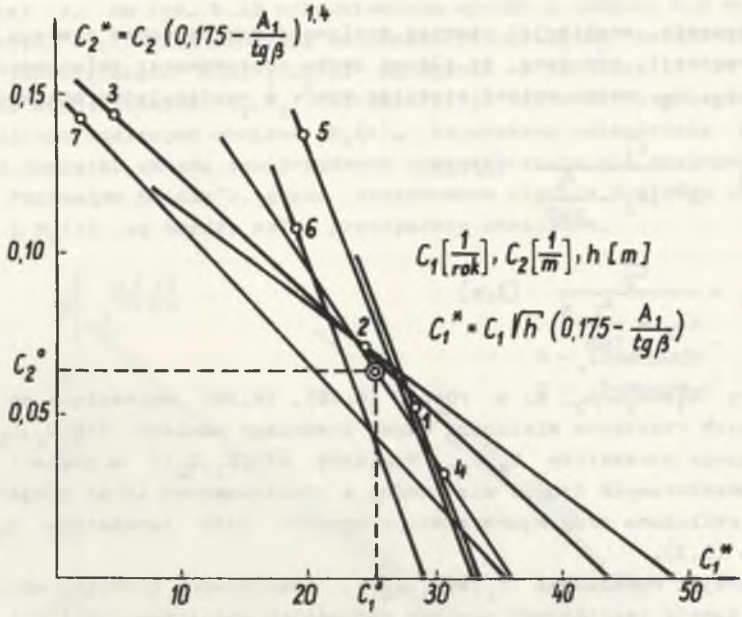
gdzie n - ilość linii obserwacyjnych.

Stosując metody numeryczne, uzyskano następujące wartości poszukiwanych parametrów: $C_1^o = 25,26$; $C_2^o = 0,067$; $A_2 = 0,175$; $q = 1,4$. Wzory (6.18), (6.19) przy zastosowaniu powyższych parametrów wyrażają się następująco:

$$\boxed{C_1 = \frac{25,26}{h^{0,5}(0,175 - A_1/tg\beta)} \pm 21\% \quad [1/rok]} \tag{6.21}$$

$$\boxed{C_2 = \frac{0,067}{(0,175 - A_1/tg\beta)^{1,4}} \pm 39\% \quad [1/m]} \tag{6.22}$$

Dla zobrazowania uzyskanych rezultatów (rys. 6.14) przekształcono płaszczyznę parametrów C_1, C_2 w płaszczyznę parametrów $C_1^* = C_1 h^{0,5}(0,175 - A_1/tg\beta)$, $C_2^* = C_2(0,175 - A_1/tg\beta)^{1,4}$ i wykreślono na niej proste l_i^* obrazujące przebieg dna wąwozu minimum funkcji błędu $\delta_i(W(C_1,C_2))$ analizowanych linii pomiarowych.



Rys. 6.14. Zestawienie prostych l_i^* obrazujących położenie minimum funkcji (6.20) na płaszczyźnie parametrów C_1^*, C_2^*

Fig. 6.14. Compilation of the straight lines l_i^*, illustrating the position of the minimum of function (6.20) in the plane of parameters C_1^*, C_2^*

Proste l_i^* tworzą w przybliżeniu pęk z punktem przecięcia o współrzędnych C_1^o, C_2^o. Nachylenie kolejnych prostych l_i^* jest zależne od maksymalnej prędkości obniżeń dW_k/dt analizowanych punktów pomiarowych i-tej linii obserwacyjnej. Najmniejszym nachyleniem charakteryzują się proste l_2^*, l_3^* (KWK "Dębieńsko", KWK "Janina" - największe prędkości obniżeń), a największym nachyleniem prostej l_1^* (najmniejszą zależnością wielkości C_1 od C_2) charakteryzują się przypadki nr 1,5,6, gdzie prędkości obniżeń były stosunkowo małe. Spadek nachylenia prostych l_i^* ze wzrostem maksymalnych, potencjalnie możliwych prędkości obniżeń $Vw_{kmax} = \max(-dW_k(t)/dt)$, charakteryzujących poszczególne linie pomiarowe, jest zgodny z przyjętą w równaniu (3.3) hipotezą o istnieniu liniowej zależności współczynnika czasu $c(t)$ od potencjalnie możliwych prędkości obniżeń $Vw_k = -dW_k(t)/dt$.

Nachylenie prostych l_i^* jest zależne zarówno od wyznaczonych wartości C_1, C_2, jak i od wartości parametru $C_1(C_2=0)$, którego wartość odpowiada wartości współczynnika prędkości osiadania c = constans w równaniu (2.5) S.Knothego.

Każda z wyznaczonych (tab. 6.4) wartości "c" jest pewną wielkością średnią, charakterystyczną dla całości wyników obserwacji, które posłużyły do jej wyznaczenia. Były to na ogół obserwacje obejmujące możliwie całokształt procesu obniżeń w czasie.

Jeśli wzór (3.2) jest słuszny, to dla wyznaczonych wartości parametru c równania (2.5) powinna być słuszna liniowa zależność (6.23), gdyż przy stałej prędkości postępu frontu, prędkość obniżeń V_{wk} jest proporcjonalna do maksymalnej prędkości obniżeń V_{wkmax}, charakteryzującej daną nieckę obniżeniową.

$$c = \bar{C}_1 + \bar{C}_2 V_{wkmax} \tag{6.23}$$

Weryfikacja zależności (6.23) wymagałaby wyników obserwacji obrazujących przebieg obniżeń w czasie wskutek eksploatacji prowadzonej z różnymi prędkościami i o różnej wysokości furty eksploatacyjnej g, przy niezmienionych warunkach górniczo-geologicznych. Z uwagi na obserwowaną zmienność parametrów mechanicznych górotworu uzyskanie takich wyników jest praktycznie niemożliwe.

Jeśli przyjąć, że wzory (6.21), (6.22) opisują wpływ warunków górniczo-geologicznych na wartość parametrów c, C_1, C_2, to dla wyznaczenia współczynników wzoru (6.23) można posłużyć się wielkościami parametrów c zestawionymi w tablicy 6.4. W tym celu należy zbadać zależność:

$$c h^{0,5}(0,175-A_1/tg\beta) = \bar{C}_1^* + \bar{C}_2^* V_{wkmax}\, h^{0,5}/(0,175-A_1/tg\beta)^{0,4} \tag{6.24}$$

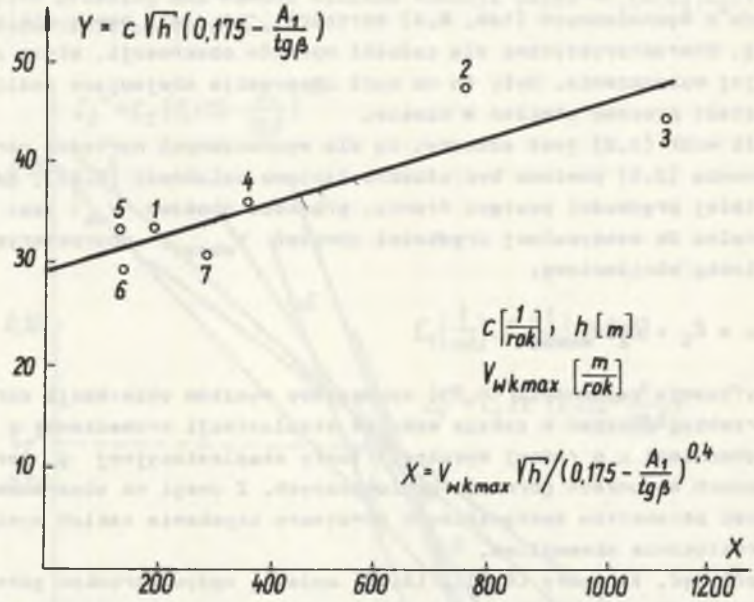
Traktując wyrażenie $c\, h^{0,5}(0,175-A_1/tg\beta)$ jako zmienną zależną Y, natomiast wyrażenie $V_{wkmax} h^{0,5}/(0,175-A_1/tg\beta)^{0,4}$ jako zmienną niezależną X problem sprowadza się do analizy liniowej zależności typu $Y=\bar{C}_1^* + \bar{C}_2^* X$. Metodą najmniejszych kwadratów uzyskano następujące oceny parametrów regresji liniowej (rys. 6.15):

$$\bar{C}_1^* = 29,357\ [1/rok]; \quad \bar{C}_2^* = 0,0167\ [1/m]; \quad r = 0,8264.$$

Ostatecznie proponowany wzór określający wielkość współczynnika czasu "c", występującego w równaniu (2.5) S.Knothego ma postać:

$$\boxed{c = \frac{29,257}{h^{0,5}(0,175-A_1/tg\beta)} + \frac{0,0167\, V_{wkmax}}{(0,175-A_1/tg\beta)^{1,4}}} \tag{6.25}$$

Parametry empirycznego wzoru (6.2) mają następujące wymiary: V_{wkmax} [m/rok]; h [m]; parametry A_1, tgβ są bezwymiarowe.



Rys. 6.15. Ilustracja zależności $Y = C_1 + C_2 X$ uzyskanej na podstawie analizy 7 linii obserwacyjnych

Fig. 6.15. Dependence $Y = C_1 + C_2 X$ obtained on the basis of an analysis of 7 observation lines

Wysoka wartość współczynnika korelacji liniowej r oraz fakt, że wyznaczone różnymi sposobami wartości parametrów $\bar{C}_1^*$ i C_1^o nie różnią się istotnie, stanowi potwierdzenie słuszności wzorów (6.21), (6.22), (6.25), a więc i potwierdzenie również równania (3.3). Potwierdzenie to jest bardzo istotne, gdyż przy dużej ilości jednocześnie wyznaczanych parametrów występujących we wzorach (6.21), (6.22) i stosunkowo nielicznej populacji danych wejściowych nie można metodami statystyki jednoznacznie stwierdzić, czy postać tych wzorów jest właściwa.

Jeśli przyjmiemy na podstawie wzoru (5.8), że pomiędzy parametrami A_1 a wielkością obrzeża d zachodzi uproszczony liniowy związek:

$$d = 1{,}2\, A_1\, r\,, \tag{6.26}$$

to wielkość $A_1/tg\beta$ można zastąpić wyrażeniem:

$$\frac{d}{h} = 1{,}2\,\frac{A_1}{tg\beta} \tag{6.27}$$

Stosując (6.27) do wzorów (6.21), (6.22), (6.25) otrzymamy:

$$C_1 = \frac{29,59}{h^{0,5}(0,21 - d/h)} \pm 21\% \quad [1/rok] \tag{6.28}$$

$$C_2 = \frac{0,0107}{(0,21 - d/h)^{1,4}} \pm 39\% \quad [1/m] \tag{6.29}$$

$$c = \frac{35}{h^{0,5}(0,21 - d/h)} + \frac{0,0167\ V_{wkmax}}{(0,21 - d/h)^{1,4}} \tag{6.30}$$

Wzory (6.28), (6.29) można stosować w równaniu (3.3) w przypadku, gdy obniżenia $W_k(t)$ będą obliczane wzorem (4.1). Stosując liniowy wzór (4.1) lub jego liniową kombinację (4.8) należy pamiętać o przesunięciu krawędzi czynnego frontu ścianowego o wielkość "d" w kierunku zrobów.

Zgodnie ze wzorami (6.21), (6.22) wzrostowi wyrażenia $A_1/tg\beta$ do wartości 0,175 ($d/h \Rightarrow 0,21$) odpowiada wzrost wielkości parametrów C_1, C_2 do nieskończoności, co oznacza, że obniżenia $W(t)$ stają się identyczne z obniżeniami $W_k(t)$.

Generalnie z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika, że proponowane równanie (3.3) wraz ze wzorami (5.1), (6.21) i (6.22) stanowią dosyć dokładne narzędzie czasoprzestrzennego opisu procesu obniżeń powierzchni. Dotyczy to szczególnie zasadniczej (a więc najistotniejszej ze względu na ocenę szkodliwości wpływów na obiekty powierzchni) fazy obniżeń w czasie.

7. WPŁYW PRĘDKOŚCI WYBIERANIA NA KSZTAŁT PROFILU NIECKI OBNIŻENIOWEJ NAD CZYNNYM FRONTEM ŚCIANOWYM

Przeprowadzona w rozdziale 6 weryfikacja równania różniczkowego (3.3) wskazuje na możliwość zastosowania go do opisu nieustalonych niecek obniżeniowych. Równanie (3.3) stosunkowo dobrze opisuje wszystkie etapy procesu obniżeń w czasie.

Jeśli do równania (3.3) zastosować parametry C_1, C_2 określone empirycznymi wzorami (6.21), (6.22), to można na podstawie tego równania podjąć próbę oceny wpływu prędkości wybierania na kształt niecki obniżeniowej nad czynnym frontem ścianowym.

Dla teoretycznego przypadku eksploatacji w kształcie półpłaszczyzny obniżenie $W(t)$ obliczone przy użyciu wzorów (6.1), (5.1), (6.21), (6.22) jest funkcją parametrów $tg\beta$, A_1, h, W_{max}, prędkości postępu frontu V_f i położenia punktu obliczeniowego względem ruchomej krawędzi eksploatacji. Własności profilu niecki obniżeniowej nad czynnym frontem ścianowym w sposób syntetyczny charakteryzowane są za pomocą następujących wskaźników deformacji:

$T_{max} = \max\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)$ - maksymalne nachylenie,

$K_{1max} = \max\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right)$ - maksymalna krzywizna wklęsła,

$K_{2max} = \max\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right)$ - maksymalna krzywizna wypukła,

$W(x=0)$ - obniżenie nad przesuwającą się krawędzią eksploatacji.

Analogiczne wielkości T_{kmax}, K_{1max}, K_{2max}, $W_k(x=0)$ charakteryzują końcowy (ustalony) profil niecki obniżeniowej.

Dla potrzeb praktyki interesujące jest porówanie kształtu dynamicznej niecki obniżeniowej z kształtem statycznej niecki obniżeniowej. W tym celu można badać następujące funkcje:

$$f_w = \frac{W(x=0)}{W_{max}}; \quad f_T = \frac{T_{max}}{T_{kmax}}; \quad f_{k1} = \frac{K_{1max}}{K_{1kmax}}; \quad f_{k2} = \frac{K_{2max}}{K_{2kmax}}$$

Analizę wpływu prędkości postępu ścianowego na wielkość teoretycznych maksymalnych wskaźników deformacji wykonano opierając się na obliczonych przy użyciu wzorów (5.1), (6.1) wielkości f_w, f_T, f_{K1} i f_{K2}. Przyjęto, że średnie warunki górniczo-geologiczne dla aktualnej eksploatacji prowadzonej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym charakteryzowane są następującymi wartościami parametrów: $h = 500$ m; $tg\beta = 2,5$; $A_1 = 0,15$; $(d/h \cong 0,1)$. Powyższym parametrom, zgodnie ze wzorami (6.21), (6.22), odpowiadają następujące wartości współczynników czasu: $C_1 = 9,82$ rok^{-1}; $C_2 = 1,38$ m^{-1}. Wyniki obliczeń dla zakresu prędkości V_f od 500 m/rok do 3000 m/rok oraz zakresu W_{max} od 0,5 m do 3,0 m zestawiono w tablicy 7.1.

Tablica 7.1

V_f m/rok	W(x=0) mm	$\frac{W(x=0)}{W_{max}}$ %	T_{max} mm/m	$\frac{T_{max}}{T_{kmax}}$	K_{1max} 10^{-6}/m	$\frac{K_{1max}}{K_{1kmax}}$	K_{2max} 10^{-6}/m	$\frac{K_{2max}}{K_{2kmax}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			W_{max} = 0.5m					
0	175	35.0	2.50	1.000	-16.5	1.000	25.5	1.000
500	113	22.6	2.22	0.888	-14	0.848	16	0.627
1000	86	17.2	1.93	0.787	-13	0.787	11	0.431
1500	71	14.2	1.74	0.696	-12	0.727	9	0.353
2000	62	12.4	1.60	0.640	-11	0.666	8	0.313
3000	51	10.2	1.43	0.572	-10	0.606	8	0.313
			W_{max} = 1.0m					
0	350	35.0	5.00	1.000	-33	1.000	51	1.000
500	235	23.5	4.54	0.908	-31	0.939	34	0.666
1000	186	18.6	4.14	0.828	-29	0.878	27	0.529
1500	161	16.1	3.90	0.780	-29	0.878	26	0.510
2000	145	14.5	3.73	0.746	-28	0.848	26	0.510
3000	126	12.6	3.53	0.706	-28	0.848	27	0.529
			W_{max} = 1.5m					
0	525	35.0	7.50	1.000	-50	1.000	77	1.000
500	363	24.2	6.94	0.925	-48	0.980	54	0.701
1000	312	20.8	6.56	0.875	-47	0.940	50	0.649
1500	266	17.7	6.30	0.840	-48	0.980	49	0.636
2000	244	16.2	6.14	0.819	-48	0.980	50	0.636
3000	221	14.7	5.97	0.796	-48	0.980	52	0.675
			W_{max} = 2.0m					
0	700	35.0	10.00	1.000	-66	1.000	102	1.000
500	497	24.8	9.93	0.993	-66	1.000	75	0.735
1000	420	21.0	9.01	0.901	-67	1.020	72	0.706
1500	382	19.1	8.82	0.882	-68	1.030	74	0.725
2000	358	17.9	8.69	0.869	-69	1.045	76	0.745
3000	332	16.6	8.56	0.856	-69	1.045	79	0.775
			W_{max} =3.0m					
0	1050	35.0	15.00	1.000	-100	1.000	153	1.000
500	779	25.9	14.38	0.957	-103	1.030	122	0.797
1000	686	22.8	14.11	0.941	-107	1.070	122	0.797
1500	643	21.4	14.00	0.933	-109	1.090	127	0.830
2000	617	20.6	13.94	0.929	-111	1.110	129	0.843
3000	589	19.6	13.88	0.925	-112	1.120	134	0.876

Na podstawie wyników obliczeń zestawionych w tablicy 7.1 można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Obniżenia nad krawędzią czynnej ściany dla analizowanego przedziału prędkości V_f i obniżeń W_{max} mieszczą się w zakresie od 0,102 W_{max} do 0,26 W_{max} (średnio 0,18 W_{max}). Ze wzrostem prędkości eksploatacji obniżenia $W(x=0)$ nieznacznie maleją. Istotnemu (sześciokrotnemu) wzrostowi W_{max} odpowiada stosunkowo mały przyrost wielkości f_w. Z powyższego wynika, że zarówno prędkość postępu frontu wybierania, jak i grubość eksploatacji mają stosunkowo mały wpływ na wielkość f_w. Dodać trzeba, że również zmiana parametru A_1 nie wpływa istotnie na wielkość f_w, gdyż wzrostowi A_2 towarzyszy wzrost współczynników C_1, C_2. Obliczona średnia wielkość $f_w = 0,18$ znajduje potwierdzenie w wynikach obserwacji.

2. Maksymalne nachylenia T_{max} w rejonie czynnego frontu ścianowego są dla analizowanego zakresu V_f, W_{max} mniejsze od nachyleń T_{kmax}. Minimalna wielkość $f_T = 0,572$ odpowiada eksploatacji prowadzonej z prędkością $V_f = 3000$ m/rok przy $W_{max} = 0,5$ m, natomiast maksymalna wielkość $f_T = 0,957$ odpowiada eksploatacji prowadzonej z prędkością $V_f = 500$ m/rok dla $W_{max} = 3,0$ m. Wartość średnia $f_T = 0,7645$ jest większa od wielkości $f_T = 0,64$ wynikającej z prac B.Skinderowicza [67, 68]. Istniejącą rozbieżność wyników można uzasadniać tym, że maksymalne nachylenia T_{max} obliczone na podstawie równania (3.3) przy zastosowaniu wzorów (5.1), (6.21), (6.22) są nieco wyższe od obserwowanych, natomiast wielkość $f_T = 0,64$ proponowana przez B.Skinderowicza jest zaniżona w stosunku do wyników obserwacji. Ze wzrostem W_{max} wzrasta wielkośc f_T, zaś większym prędkościom eksploatacji odpowiada mniejsza wielkość f_T.

3. Maksymalne krzywizny wklęsłe K_{1max} występują nad calizną pokładu bardzo blisko krawędzi eksploatacji. Maksymalne zmniejszenie krzywizny K_{1max} towarzyszy szybkiej eksploatacji $V_f = 3000$ m przy małym obniżeniu $W_{max} = 0,5$ m ($f_{k1} = 0,606$). <u>Dla</u> $W_{max} > 2,0$ m <u>maksymalne wartości krzywizny wklęsłej profilu dynamicznej niecki obniżeniowej</u> K_{1max} <u>mogą być nieznacznie większe od krzywizn wklęsłych</u> K_{1kmax} <u>występujących nad calizną statycznej niecki obniżeniowej</u>.

4. Maksymalne krzywizny wypukłe K_{2max} dynamicznej niecki obniżeniowej występują nad zrobami w odległości od 0,7 r do 0,8 r. Wielkość f_{k2} mieści się w zakresie od 0,313 dla $W_{max} = 0,5$ m do 0,876 dla $W_{max}=3,0$ m (średnio $f_{k2} = 0,594$). Widać stąd bardzo istotną zależność K_{2max} od wielkości W_{max}. Z uwagi na kształtowanie się wielkości f_{k2} można mówić o istnieniu pewnej optymalnej prędkości eksploatacji, której przekroczenie powoduje wzrost krzywizn K_{2max}.

Optymalna prędkość eksploatacji V_{fopt} jest zależna od W_{max}.

Przykładowo:

$W_{max} = 0,5$ m; $V_{fopt} \cong 2300$ m/rok; $f_{k2} \cong 0,313$;

W_{max} = 1,0 m; V_{fopt} ≅ 1800 m/rok; f_{k2} ≅ 0,510;

W_{max} = 1,5 m; V_{fopt} ≅ 1500 m/rok; f_{k2} ≅ 0,636;

W_{max} = 2,0 m; V_{fopt} ≅ 1000 m/rok; f_{k2} ≅ 0,706;

W_{max} = 3,0 m; V_{fopt} ≅ 750 m/rok; f_{k2} ≅ 0,876.

W przypadku eksploatacji prowadzonej na mniejszej głębokości prędkości V_{opt} będą odpowiednio niższe.
Z przeprowadzonej analizy wynika, że wzrost wielkości W_{max} bardzo niekorzystnie wpływa na wielkość maksymalnych wskaźników deformacji charakteryzujących dynamiczną nieckę obniżeniową. Dla dużych W_{max} wskaźniki te mogą być prawie takie same jak dla niecki statycznej, a w przypadku krzywizn wklęsłych mogą być nawet nieco większe. Należy przypuszczać, że podobnie będą się kształtowały odkształcenia poziome.

Dokonana ocena wpływu V_f i W_{max} na wielkość maksymalnych wskaźników deformacji jest na pewno obarczona pewnym, trudnym do oszacowania błędem. Jednakże przyjmując, że wzory (6.21), (6.22) określają parametry C_1, C_2 z dokładnością ± 30%, błąd wielkości f_T, f_{k1} i f_{k2} mieści się w przedziale ± 0,1, jest to więc błąd możliwy do zaakceptowania w praktycznych obliczeniach.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że w innych niż analizowane warunkach górniczo-geologicznych wielkości f_T, f_{K1} i f_{K2} będą się różniły od pokazanych w tablicy 7.1, jednak charakter ich zależności od V_f i W_{max} będzie podobny.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedmiotem niniejszej pracy jest zagadnienie opisu obniżeń powierzchni, zaistniałych wskutek wybierania złoża metodą eksploatacji podziemnej, przy uwzględnieniu czynnika czasu.

Względy praktyczne, a w szczególności analizowana możliwość wykonania na dostępnych komputerach skomplikowanych obliczeń prognostycznych, gdy eksploatację górniczą charakteryzuje złożona geometria pól wybierania i praktycznie dowolny rozkład w czasie, zawężają zakres wyboru teorii opisujących proces deformacji do możliwie najprostszych, jakimi są najczęściej stosowane w praktyce teorie geometryczno-całkowe.

W ujęciu teorii geometryczno-całkowych obserwowane obniżenie w czasie można opisać jako splot dwóch niezależnych funkcji:

- funkcji opisującej przyrost obniżeń końcowych dW_k, jakie po czasie długim spowoduje wykonanie w górotworze pewnej pustki dV,
- funkcji czasu t, opisującej proces ujawniania się przyrostu obniżeń dW_k od chwili wykonania pustki, aż do osiągnięcia stanu asymptotycznego.

Stosowane w teoriach geometryczno-całkowych funkcje opisujące obniżenia końcowe W_k i funkcja czasu wykazują w konfrontacji z wynikami pomiarów pewne stałe rozbieżności.
Do stałych błędów opisu obniżeń końcowych należy zaliczyć:

- zaniżanie wartości obliczonych obniżeń punktów położonych dostatecznie daleko od eksploatowanej parceli (zły opis wpływów dalekich),
- znaczne zawyżanie wartości obliczonych obniżeń niepełnych niecek obniżeniowych,
- profile teoretyczne pełnej niecki obniżeniowej są symetryczne względem punktu położonego nad krawędzią eksploatacji, natomiast profile obserwowane cechuje asymetria względem punktu przegięcia, który występuje nad zrobami w pewnej odległości od krawędzi eksploatacji.

Część wymienionych błędów opisu obniżeń można dosyć łatwo wyeliminować, jednak stosowane do tego celu wzory nie są dostatecznie ogólne, np. nie pozwalają na rozpatrywanie wpływów eksploatacji wielopokładowej.

Główny błąd stosowanego jako funkcja czasu równania (2.5) S.Knothego polega na nadmiernym uzależnieniu kształtu dynamicznej niecki obniżeniowej od prędkości eksploatacji. W efekcie wyznaczane z pomiarów wartości parametru "c" są zależne od położenia punktu obserwacyjnego i od prędkości eksploatacji.

Zgodnie z tezą pracy, poprawiając opis obniżeń końcowych tak, by eliminował wymienione błędy oraz uogólniając obserwowaną zmienność parametru "c" przez zastępienie go funkcją $c(t,x,y)$, można uzyskać znacznie dokładniejszy i dostatecznie ogólny opis wszystkich faz procesu obniżeń w czasie.

Dla realizacji pracy wyodrębniono trzy grupy zagadnień:

- zagadnienie opisu wpływów dalekich (rozdział 4.1),
- zagadnienie opisu obniżeń z uwzględnieniem obserwowanej asymetrii profilu niecki obniżeniowej (rozdziały 4.2 - 5.4),
- zagadnienie weryfikacji pomiarowej równania (3.3) opisującego przebieg obniżeń w czasie (rozdział 6).

Na podstawie rozważań teoretycznych i wykonanych analiz wyników obserwacji można sformułować następujące wnioski:

1. Dla rozszerzenia możliwości kształtowania teoretycznego profilu niecki obniżeniowej, przy zastosowaniu dowolnej teorii geometryczno-całkowej, proponuje się obliczać obniżenia jako kompozycję dwóch obniżeń, obliczonych z przyjęciem dwóch różnych stałych promieni rozproszenia wpływów. W przypadku teorii W.Budryka-S.Knothego można uzyskać dobry opis obniżeń dalekich, z zachowaniem poprawności opisu obniżeń w rejonie krawędzi eksploatacji, stosując wzory (4.8), (4.10),(4.11).

2. Analiza wyników badań laboratoryjnych prób skał poddanych trójosiowemu ściskaniu wskazuje, że argumentem funkcji φ opisującej zmiany objętości skały w warunkach dużych odkształceń może być jeden z niezmienników dewiatora stanu odkształcenia, zwany odkształceniem oktaedrycznym γ_{oct}. Stosując teorię W.Budryka-S.Knothego wartość γ_{oct} dla punktów w górotworze można obliczyć z następującego uproszczonego wzoru:

$$\gamma(z)_{oct} \cong \gamma(z) = \left(A_2 r(z)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right)^{0,5} \qquad (4.22)$$

3. Wzory K.Grenia (2.2) i J.Zycha (2.4) można traktować jako szczególne przypadki wzoru (4.25). Wzory te, z uwagi na ich empiryczne pochodzenie, potwierdzają tezę o możliwości stosowania odkształceń γ do opisu obserwowanej asymetrii profilu niecki obniżeniowej.

4. Przyjmując, że obserwowana asymetria profilu ustalonej niecki obniżeniowej spowodowana jest zmianami objętości deformowanych skał, profil ten można opisać jako sumę obniżeń liniowych (symetrycznych względem krawędzi eksploatacji) i nieliniowej poprawki $\Delta w(\varphi(\gamma))$ określonej ogólnie całkowymi wzorami (4.27) lub (4.28).

5. Dla obliczania obniżeń powierzchni spowodowanych eksploatacją prowadzoną w różnych pokładach na zbliżonych głębokościach funkcja określająca poprawkę Δw może posiadać ogólną postać:

$$\Delta W = A_1 r \, \phi(\tau^2, A_3 \frac{w}{r}). \tag{4.31}$$

Analizując szereg możliwych postaci funkcji ϕ pod kątem ich własności analitycznych i dokładności opisu obserwowanych obniżeń końcowych, najlepszy opis obniżeń ustalonej niecki obniżeniowej z uwzględnieniem obserwowanej asymetrii wpływów uzyskano stosując wzór (5.1).

6. Opierając się na pomiarach obniżeń 8 linii obserwacyjnych i danych z literatury wyspecyfikowano parametry wzoru (5.1). Za podstawowe uznano parametry $tg\beta, A_1, a$, które można wyznaczyć na podstawie pojedynczego profilu pełnej ustalonej niecki obniżeniowej, traktując pozostałe parametry jako wielkości stałe lub funkcyjnie zależne od parametrów podstawowych.

7. Funkcja W_k określona wzorem (5.1) posiada szereg korzystnych cech:

- jest niesymetryczna względem punktu przegięcia, przy czym obliczone na podstawie wzoru (5.1) maksymalne krzywizny profilu obniżeniowego nad zrobami są o około 50% większe od maksymalnych krzywizn w rejonie krawędzi eksploatacji,
- charakteryzuje się, niezależnie od wartości A_1, znacznie większym zasięgiem wpływów, zgodnym z obserwowanym w praktyce,
- znacznie lepiej niż wzory dotychczasowe opisuje niepełne niecki obniżeniowe,
- pozwala na superpozycję obniżeń spowodowanych eksploatacją prowadzoną w różnych pokładach zalegających na zbliżonej głębokości.

8. Znaczną poprawę opisu obniżeń w czasie można uzyskać zastępując w równaniu (2.5) S.Knothego parametr c=constans liniową zależność:

$$c = C_1 - C_2 \, dW_k/dt, \tag{3.2}$$

gdzie:

C_1, C_2 - parametry wyznaczane z pomiarów obniżeń w czasie,
dW_k/dt - obliczona, potencjalnie możliwa prędkość obniżeń punktu.

Proponowana zależność ujmuje w sposób ogólny wszystkie dotychczasowe wyniki badań dotyczące zmienności parametru c, gdyż prędkość dW_k/dt jest proporcjonalna do prędkości postępu frontu ścianowego, maleje z głębokością, jest większa w pobliżu frontu ścianowego i odpowiednio mniejsza daleko od frontu ścianowego. Stosując (3.2) w równaniu (2.5) proces obniżeń w czasie opisuje następujące równanie różniczkowe pierwszego rzędu:

$$\frac{dW(t)}{dt} = [C_1 - C_2 \frac{dW_k(t)}{dt}] \, [W_k(t) - W(t)] \tag{3.3}$$

9. Weryfikacja równania (3.3) przeprowadzona na podstawie pomiarów obniżeń 8 linii obserwacyjnych wykazała, że:

- hipotezę o braku korelacji liniowej między wyznaczonymi z pomiarów wartościami $c(t)$ a prędkością dW_k/dt cechuje poziom istotności $\alpha < 0{,}005$, co oznacza że zależność (3.3) ujmuje główne cechy obserwowanego zjawiska,
- aproksymację wyników pomiarów 8 linii obserwacyjnych charakteryzuje błąd średni $\delta = 1{,}6\%$ do $3{,}1\%$ obniżeń maksymalnych,
- wyznaczone wartości parametrów C_1, C_2 są generalnie duże, wykazując bardzo istotne uzależnienie od wielkości $A_1/tg\beta$ i głębokości h,
- w obecności szerokich obrzeży d towarzyszących zwięzłym skałom gdy $A_1/tg\beta \Rightarrow 0{,}175$ lub $d/h \Rightarrow 0{,}21$, ujawnianie się wpływów w rejonie frontu eksploatacyjnego jest bardzo szybkie, a różnica $W_k(t) - W(t)$ staje się mniejsza od błędu średniego opisu obniżeń,
- wartości parametrów C_1, C_2 można wstępnie oszacować z następujących wzorów:

$$C_1 = \frac{25{,}26}{h^{0,5}(0{,}175-A_1/tg\beta)} \quad [1/rok] \tag{6.21}$$

$$C_2 = \frac{0{,}067}{(0{,}175-A_1/tg\beta)^{1,4}} \quad [1/m] \tag{6.22}$$

- stosując wzory (2.5), (4.1) S.Knothego, dla opisu zasadniczej fazy obniżeń, w rejonie czynnego frontu ścianowego, wielkość parametru c=constans można oszacować wzorem:

$$c\left[\frac{1}{rok}\right] = \frac{35}{h^{0,5}(0{,}21-d/h)} + \frac{0{,}0167\ V_{wkmax}}{(0{,}21-d/h)^{1,4}}, \tag{6.30}$$

gdzie:

h [m] - głębokość eksploatacji,

d [m] - wielkość obrzeża,

V_{wkmax} [m/rok] $\cong V_f W_{max}/r$ - maksymalna prędkość obniżeń $W_k(t)$ dla przypadku eksploatacji o kształcie zbliżonym do półpłaszczyzny,

V_f [m/rok] - prędkość postępu frontu wybierania.

10. Dokonana na podstawie wzorów (3.3), (5.1), (6.21), (6.22) analiza wpływu prędkości postępu frontu wybierania i wielkości W_{max} na kształt nieustalonej niecki obniżeniowej, dla średnich parametrów charakteryzujących warunki górniczo-geologiczne aktualnej eksploatacji W GOP, wykazała:

- maksymalne nachylenie dynamicznej niecki obniżeniowej stanowi 57% (dla V_f = 3000 m/rok, W_{max}= 0,5 m) do 96% (dla V_f = 500 m/rok, W_{max} = 3,0m) maksymalnego nachylenia niecki statycznej,

- maksymalna wklęsła krzywizna profilu dynamicznej niecki obniżeniowej stanowi 61% (dla V_f = 3000 m/rok, W_{max} = 0,5 m) do 112% (dla V_f = = 3000 m/rok, W_{max} = 3,0 m) analogicznej wartości charakteryzującej niecką statyczną,
- maksymalna wypukła krzywizna profilu dynamicznej niecki obniżeniowej osiąga wartość od 31% (dla V_f = 2300 m/rok, W_{max} = 0,5 m) do 87% (dla V_f = 3000 m/rok, W_{max} = 3,0 m) analogicznej wartości charakteryzującej niecką statyczną.

11. Maksymalne nachylenia i maksymalne krzywizny wklęsłe obliczone przy zastosowaniu wzorów (3.3), (5.1), (6.21), (6.22) są o 5% do 10% większe od wielkości obserwowanych.

12. Zdaniem autora w zakresie opisu obniżeń powierzchni konieczne są dalsze badania dotyczące:

- wpływu wielkości W_{max} na kształt profilu niecki obniżeniowej nad czynnym frontem ścianowym,
- wzajemnej redukcji obrzeży przy eksploatacji prowadzonej w kilku pokładach,
- opisu wpływów dalekich, a w szczególności dokładniejsze ustalenie wartości a_w, a_r występujących we wzorach (4.8), (4.10), (4.11).

LITERATURA

[1] Awierszyn S.G.: Sdwiżenije gornych porod pri podziemnych rozrabotkach. Ugletiechizdat, Moskwa 1947.

[2] Bals H.: Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen. Mitteilungen und Markscheidewessen 1931/32.

[3] Batkiewicz W.: Odchylenia standardowe poeksploatacyjnych deformacji górotworu. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN. Geodezja z.10.

[4] Białek J.: Algorytm wyznaczania wskaźników deformacji przestrzennej dynamicznej niecki osiadania. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z. 31, Gliwice 1978.

[5] Białek J.: Algorytm obliczania chwilowych i czasowo ekstremalnych wskaźników deformacji przestrzennej dynamicznej niecki osiadania wraz z oprogramowaniem (praca doktorska niepublikowana), Politechnika Śląska, Gliwice 1980.

[6] Białek J.: Programy na EMC do prognozowania wskaźników dynamicznych deformacji niecek osiadania. Ochrona Terenów Górniczych nr 71, Katowice 1985.

[7] Białek J.: Nieliniowy matematyczny model osiadania powierzchni w czasie wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.138, Gliwice 1985.

[8] Białek J.: Opis systemu programów LDANE, EDN1, EDN2 do prognozowania deformacji powierzchni. Politechnika Śląska, Gliwice 1988 (niepublikowane).

[9] Biliński A.: Przejawy ciśnienia górotworu w polach eksploatacji ścianowej w pokładach węgla. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Górnictwo z. 31, Gliwice 1968.

[10] Berry D., Sales T.: An elastic treatment of ground movement due to mining - III three dimensional problem, transversely isotropic ground. J.Mech. Phys. Solids. Vol. 10, nr 1, 1962.

[11] Budryk W.: Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t.I, z.1, 1953.

[12] Chudek M., Kwaśniewski M.: Mechaniczne, strukturalno-fizyczne i petrograficzne własności skał z warstw dolnojaklowieckich z kopalni Anna. Prace IPBKiOP Pol. Śl. - Problem Resortowy MGiM nr 119, Gliwice 1983.

[13] Chudek M., Szczepaniak Z., Podgórski K.: Przemieszczenia górotworu i przebieg ciśnień na obudowę szybu przy eksploatacji pokładów w filarach ochronnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Górnictwo z.37, Gliwice 1969.

[14] Chudek M., Ślężański Z.: Deformacje górotworu i powierzchni przy prowadzeniu eksploatacji rud żelaza w kopalniach rejonu częstochowsko-kłobucko-łęczyckiego. Prace GIG, Komunikat nr 582, Katowice 1973.

[15] Drzęźla B.: Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.91, Gliwice 1978.

[16] Drzęźla B.: Podstawy teoretyczne wyznaczania parametrów teorii ruchów górotworu nad eksploatacją górniczą. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.87, Gliwice 1978.

[17] Drzęźla B.: Opis programów do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej - aktualny stan oprogramowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.165, Gliwice 1989.

[18] Drzęźla B., Białek J., Gołaszewski A.: Maksymalne wartości deformacji oraz prędkości i przyśpieszenia ich przyrostu w przypadku płaskim, dynamicznyj niecki osiadania. Ochrona Terenów Górniczych, nr 53,1980.

[19] Dymek F.: Pewne rozwiązania dla ośrodka sypkiego (stochastycznego) rozporowego i bezrozporowego. Zeszyty Problemowe Górnictwa, t. 17, z. 1, 1979.

[20] Dymek F.: Pewne płaskie i przestrzenne rozwiązanie ośrodka reologicznego i ich zastosowanie w mechanice górotworu. Archiwum Górnictwa, t. XVIII z.2, 1973.

[21] Dziura T., Kot A., Trzcionka P.: Przesunięcie krawędzi eksploatacji jako dodatkowy parametr teorii ruchów górotworu S.Knothego i T.Kochmańskiego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.59, Gliwice 1974.

[22] Dżegniuk B.: Niektóre efekty nielinowe w procesie osiadania nad eksploatacją górniczą. Zeszyty Naukowe AGH, s. Geodezja z. 34, Kraków 1975.

[23] Dżegniuk B., Sroka A.: Prędkość postępu frontu eksploatacji górniczej a proces deformacji górotworu i powierzchni. Mat. na konf. nt. "Wpływ prędkości eksploatacji na ochronę obiektów na powierzchni". Komisja Ochrony Terenów Górniczych PAN, Katowice 1978.

[24] Dżegniuk B., Piwowarski W.: Liniowy model matematyczny jako forma opisu obniżeń w stanie nieustalonym. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN, Geodezja z.28, Kraków 1980.

[25] Filcek H.: Wpływ czasu na stan naprężeń i odkształceń górotworu w sąsiedztwie wyrobiska chodnikowego. Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN, t.3, z.1, 1965.

[26] Filcek H., Walaszczyk J.,Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Wydawnictwo "Śląsk" (w druku).

[27] Gil H., Kraj W.: The distribution of displacements and stresses around a longwall working. Archiwum Górnictwa, t.XVIII, z.3, 1972.

[28] Greń K.: Analog fotoelektryczny jako czasoprzestrzenny model rozchodzenia się wpływów nad eksploatacją górniczą. Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja z.24, Kraków 1973.

[29] Greń K.: Próba ujęcia asymetrii wpływów eksploatacji górniczej przy poziomym zaleganiu pokładów. PAN Oddz. w Krakowie. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej. Geodezja 29, 1981.

[30] Greń K., Popiołek E.: Opracowanie przykładów praktycznych i ustalenie ostatecznej postaci wzorów. Problem Resortowy WWK nr 103, 1989 (maszynopis).

[31] Janusz W.: Wyznaczanie współczynnika czasu c z równania typu (Y=k(1 - exp(-cx)). Prace Komisji Górn. Geod. PAN. Geodezja z.14, Kraków 1972.

[32] Jędrzejec E.: Zastosowanie ETO przy projektowaniu eksploatacji w filarach ochronnych. Ref.konf.nauk.-techn. nt. "Wybrane problemy eksploatacji filarów ochronnych". SITG, Katowice 1974.

[33] Kidybiński A.: Podstawy geomechaniki kopalnianej. Wydawnictwo "Śląsk" Katowice 1982.

[34] Kiyoo Mogi: Dilatancy of rocks under general triaxal stress states with special reference to earthquake precursors. J.Phys.Earth, 25, Supl., s. 203-217, 1977. (Earthquake Research Institute, Tokyo University, (Japan).

[35] Klein G.: Długość bazy pomiarowej a wielkość fluktuacji odkształceń w ośrodku sypkim. Praca doktorska.PAN IMG, Kraków 1973.

[36] Kłeczek Z.: Wytrzymałość skał karbońskich w świetle badań reologicznych. Zeszyty problemowe górnictwa PAN, tom 5, z.2, 1967.

[37] Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Skrypt AGH, Kraków 1985.

[38] Knothe S.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t.I, z.1, 1953.

[39] Knothe S.: Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t.I, z.1, 1953.

[40] Knothe S., Klein G., Rogowska J., Leśniak J., Pielok W.: Próba określenia wpływu prędkości postępu frontu eksploatacyjnego na stopień zmniejszenia odkształceń oraz zwiększenia ich prędkości z uwzględnieniem eksploatacji na dużych głębokościach. Problem Resortowy MGiE nr 119.

[41] Knothe S.: Badania modelowe przemieszczeń w ośrodku sypkim i możliwości zastosowania otrzymanych wyników do zagadnień przemieszczeń górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej. Archiwum Górnictwa tom XV, z.1, 1970.

[42] Kochmański T.: Obliczanie ruchów punktów górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej. PAN, Warszawa 1956.

[43] Kochmański T., Magdziorz J., Jędrzejec E.: Wstępne określenie funkcji czasu. Politechnika Śląska, Gliwice 1971 (praca niepublikowana).

[44] Kowalski A.: Określenie zmienności parametru zasięgu wpływów głównych w górotworze r(z) teorii W.Budryka-S.Knothego na podstawie badań geodezyjnych przemieszczeń pionowych punktów górotworu. Praca doktorska. GIG, Katowice 1984.

[45] Kratzsch H.: Mining Subsidence Engineering. Springer Verlag, New York 1983.

[46] Krzysztoń D.: Parametr zasięgu niecek osiadania w ośrodku sypkim. Archiwum Górnictwa, t.10, z.1, 1963.

[47] Kwiatek J.: Sumowanie wskaźników deformacji podłoża budowli przy wielokrotnych eksploatacjach górniczych. Ochrona Terenów Górniczych nr 70, Katowice 1985.

[48] Litwiniszyn J.: Równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t.I, z.1, 1953.

[49] Litwiniszyn J.: Przemieszczenia górotworu w świetle teorii prawdopodobieństwa. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t.II, z.1, 1954.

[50] Litwiniszyn J.: Zastosowanie równań procesów stochastycznych do mechaniki górotworu. Archiwum Górnictwa, t.I, z.3, 1956.

[51] Litwiniszyn J.: Time space process in stochastic media. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Ser. Sci. Techniques, Vol. VI, no 1, 1958.

[52] Litwiniszyn J.: The model of random walk of particles adopted to researches on problem of maechanics of loose media. Ibidem, vol. XII, no 5, 1964.

[53] Litwiniszyn J., Smolarski A.: A Contribution to Mechanics of Quasi - stochastic Bodies. Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Techn. Volume X, No 6 1962.

[54] Lubina T.: Wybrane zagadnienia wpływu czynnika czasu na deformacje górotworu. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1973.

[55] Niemiec T., Radoła W.: Kwantowy model opóźniający i jego zastosowanie do opisywania osiadania w czasie punktu powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji górniczej. Ochrona Terenów Górniczych Nr 56, Katowice 1981.

[56] Opałka K.: Wpływ aktywacji eksploatacji dokonanych na kształtowanie wskaźników deformacji powierzchni terenu. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1983.

[57] Pielok J.: Określenie zmienności współczynnika czasu dla opisu kształtowania się niecek obniżeniowych w górotworze nad eksploatowanym pokładem. Praca doktoraska, AGH Kraków, 1974.

[58] Piwowarski W.: Opis przemieszczeń pionowych aktywnego procesu deformacji górotworu w warunkach eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH, s. Geodezja z. 106, Kraków 1989.

[59] Podgórski K.: Zachowanie się skał stropowych i spągowych pod wpływem eksploatacji pokładów stromych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Górnictwo z. 32, Gliwice 1968 (praca habilitacyjna).

[60] Podgórski K.: Zachowanie się powierzchni w czasie wybierania pokładu w kierunku do zrobów. Rudy i Metale Nieżelazne nr 4, 1967.

[61] Praca zbiorowa: Wyniki badań wpływów eksploatacji w filarze ochronnym dla szybu "Szymon" kopalni "Halemba". Prace GIG, Komunikat nr 428, Katowice 1967.

[62] Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1980.

[63] Popiołek E.: Rozproszenie statystyczne odkształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnych obserwacji skutków eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH, s. Geodezja z.44, Kraków 1976.

[64] Popiołek E., Ostrowski J.: Próba ustalenia głównych przyczyn rozbieżności prognozowanych i obserwowanych poeksploatacyjnych wskaźników deformacji. Ochrona Terenów Górniczych nr 58, Katowice 1981.

[65] Rogowska J.: Badania eksperymentalne tworzenia się niecek osiadania w ośrodku sypkim z uwzględnieniem zmiany gęstości ośrodka. Część II: Niecki progowe. Archiwum Górnictwa, Tom 23, z.1, 1978.

[66] Rogusz Z.: Wpływ czynników geologiczno-górniczych na wartość parametru tgβ teorii W.Budryka-S.Knothego w świetle badań terenowych. Praca doktorska, GIG, Katowice 1977.

[67] Skinderowicz B.: Wpływ czasu na kształtowanie się dynamicznych niecek osiadania. Prace GIG, Komunikat nr 666, Katowice 1974.

[68] Skinderowicz B.: Stan rozpoznania wpływu prędkości frontu eksploatacyjnego na charakter i wielkość deformacji powierzchni i obiektów. Ochrona Terenów górniczych Nr 58, Katowice 1980.

[69] Smolarski A.Z.: Wpływ struktury ośrodka na postać równania stochastycznego. Archiwum Górnictwa. T.I, z.3, 1956.

[70] Sroka A.: Wpływ postępu frontu eksploatacji górniczej na kształtowanie się wskaźników deformacji górotworu. Praca doktorska, AGH, Kraków 1974.

[71] Sroka A.: Wpływ eksploatacji górniczej na wyrobisko szybowe w fazie dynamicznej i asymptotycznej. Prace Komisji Górniczo-geodezyjnej PAN, Geodezja z.22, Kraków 1976.

[72] Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów. PWN, Warszawa 1978.

[73] Strzałkowski P.: Wpływ warunków geologiczno-górniczych na parametry asymetrycznego rozkładu deformacji powierzchni terenu. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1989.

[74] Subsidence engineer's Handbook. London,National Coal Board 1966, 1975.

[75] Szpetkowski S.: Kształtowanie się deformacji na powierzchni pod wpływem wybierania poziomych złóż pokładowych w świetle badań profilu ostatecznej niecki osiadania. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN, Górnictwo 7, Kraków 1969.

[76] Szpetkowski S.: Rozkład obniżeń punktów powierzchni pod wpływem eksploatacji złóż pokładowych w świetle teorii i obserwacji. Ochrona Terenów Górniczych Nr 19, Katowice 1972.

[77] Szpetkowski S., Kot A., Lubina T., Zych J.: Opracowanie ostatecznej wersji wytycznych prognozowania wpływów na górotwór i powierzchnię terenu eksploatacji górniczej na dużych głębokościach. Problem Resortowy nr 119, Prace IPBKiOP Politechnika Śląska, Gliwice 1981.

[78] Trojanowski K.: Określenie wartości czasowych osiadań powierzchni i górotworu. Praca habilit., GIG, Katowice 1966.

[79] Trojanowski K.: Krytyka teorii R.Balsa, O.Schleiera i A.Fläschertragera. Zeszyty Naukowe AGH, s. Geodezja z. 4, Kraków 1963.

[80] Walczak J.: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. PWN, Warszawa-Kraków 1971.

[81] Wędzony J.: Metoda opracowania wyników pomiarów deformacji na terenach górniczych. II Krajowe Sympozjum: "Ochrona Powierzchni przed Szkodami Górniczymi", Katowice 1985.

[82] Wycisło K.: Wpływ czasu na przebieg obniżeń górotworu nad eksploatacją górniczą. Praca doktorska, AGH, Kraków 1964.

[83] Zych J.: Analiza wpływu prędkości postępu frontu na wielkość deformacji na podstawie wyników pomiarów z kopalni Dębieńsko. Mat. na konf. nt.: "Wpływ prędkości eksploatacji na ochronę obiektów na powierzchni". Komisja Ochrony Terenów Górniczych PAN, Katowice 1978.

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

OPIS NIEUSTALONEJ FAZY OBNIŻEŃ TERENU GÓRNICZEGO
Z UWZGLĘDNIENIEM ASYMETRII WPŁYWÓW KOŃCOWYCH

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem niniejszej pracy jest zagadnienie opisu obniżeń powierzchni zaistniałych wskutek wybierania złoża metodą eksploatacji podziemnej, przy uwzględnieniu czynnika czasu.

Za wyjściowe do dalszych rozważań uznano równanie (2.5) S.Knothego:

$$\frac{dw(t)}{dt} = c\,[w_k(t) - w(t)] \qquad (2.5)$$

gdzie:

c [1/czas] - parametr wyznaczony z pomiarów obniżeń w czasie, zwany współczynnikiem czasu,

w(t) - obniżenia w chwili t,

w(t) - potencjalnie możliwe obniżenia, jakie wystąpiłyby w chwili t, gdyby każdy przyrost objętości wybranego złoża dV(t) powodował natychmiastowy przyrost obniżeń $dw_k(t)$.

Przyjmując w równaniu (2.5) c=constans oraz obliczając wielkość obniżeń $w_k(t)$ w oparciu o powszechnie stosowane wzory geometryczno-całkowych (liniowych) teorii wpływów uzyskujemy ciągły i dostatecznie ogólny opis zjawiska, który jednak w konfrontacji z pomiarami wykazuje szereg systematycznych rozbieżności.

Na podstawie wyników badań własnych i przedstawionych w literaturze ustalono, że dla poprawy opisu obniżeń w czasie należy:

- opracować wzory, które lepiej i dostatecznie ogólnie będą opisywały obniżenia końcowe $w_k(t)$,
- zastąpić stały w założeniu współczynnik czasu c pewną funkcją c(t,x,y,h), a następnie korzystając z pomiarów obniżeń w czasie wyspecyfikować jej parametry.

W zakresie opisu obniżeń $w_k(t)$ rozpatrywano problem opisu wpływów dalekich oraz problem opisu obserwowanej asymetrii kształtu pełnej ustalonej niecki obniżeniowej względne krawędzi eksploatacji.

W celu rozszerzenia możliwości kształtowania teoretycznego profilu niecki obniżeniowej, przy zastosowaniu dowolnej teorii geometryczno-całkowej, proponuje się obliczać obniżenia jako sumę obniżeń, obliczonych

z przyjęciem dwóch różnych, stałych promieni rozproszenia wpływów. W przypadku teorii W.Budryka-S.Knothego uzyskano dobry opis obniżeń dalekich, z zachowaniem poprawności opisu obniżeń w rejonie krawędzi eksploatacji, stosując wzór (4.8, 4.10, 4.11).

Dla opisu obserwowanej asymetrii profilu niecki obniżeniowej względem krawędzi eksploatacji przyjęto upraszczające założenie, że jest ona wynikiem zmian objętościowych zdeformowanego górotworu. Na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych prób skał ściskanych trójosiowo ustalono, że argumentem funkcji φ opisującej zmiany objętości skały w warunkach dużych odkształceń może być jeden z niezmienników dewiatora odkształceń zwany odkształceniem oktaedrycznym γ_{oct}. Pomijając składowe poziome ruchów górotworu wielkość γ_{oct} dla punktów w górotworze można obliczyć z następującego uproszczonego wzoru:

$$\gamma(x,y,z,t)_{oct} \cong \gamma = \left(A_2 r(z)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right)^{0.5} \qquad (4.22)$$

gdzie $w(x,y,x,t)$ - obniżenie punktu w górotworze obliczone wzorem (4.1) S. Knothego. Czas t określa w tym wzorze zakres eksploatacji.

Przyjmując, że obserwowany, asymetryczny profil ustalonej niecki obniżeniowej można opisać jako sumę obniżeń liniowych (symetrycznych względem krawędzi eksploatacji) i nieliniowej poprawki $A_1\Delta W(\varphi(\gamma))$, będącej wynikiem zmian objętości górotworu, przedstawiono ogólny sposób konstruowania funkcji ΔW w postaci całkowych wzorów (4.27), (4.28). Ograniczając zakres rozważań do przypadku obniżeń powierzchni dla eksploatacji prowadzonej w różnych pokładach na zbliżonych głębokościach, poprawka ΔW może posiadać następującą ogólną postać:

$$\Delta W = A_1 r\ \Phi\left(\gamma^2, A_3 \frac{w}{r}\right) \qquad (4.31)$$

Badając szereg możliwych postaci funkcji Φ pod kątem ich własności analitycznych stwierdzono, że można uzyskać dobry opis obniżeń końcowych, stosując wzór (5.1).

Analizując obniżenia 8 linii obserwacyjnych i dane z literatury wyspecyfikowano parametry wzoru (5.1). Za podstawowe uznano parametry $tg\beta, A_1, a$, które można wyznaczyć na podstawie pomierzonego profilu pojedynczej, pełnej, ustalonej niecki obniżeniowej. Pozostałe parametry traktowane są jako wielkości stałe lub funkcyjnie zależne od parametru A_1. Funkcja W_k określona wzorem (5.1) posiada szereg korzystnych cech:

- jest niesymetryczna względem punktu przegięcia, przy czym obliczone na podstawie wzoru (5.1) maksymalne krzywizny profilu obniżeniowego nad zrobami są o około 50% większe od maksymalnych krzywizn w rejonie krawędzi eksploatacji,

- charakteryzuje się, niezależnie od wartości A_1, znacznie większym zasięgiem wpływów, zgodnym z obserwowanym w praktyce,
- znacznie lepiej niż wzory dotychczasowe opisuje niepełne niecki obniżeniowe,
- pozwala na superpozycję obniżeń spowodowanych eksploatacją prowadzoną w różnych pokładach zalegających na zbliżonej głębokości.

Znaczną poprawę opisu obniżeń w czasie otrzymano zastępując w równaniu (2.5) parametr c=constans liniową zależnością:

$$c(t,x,y,h) = C_1 - C_2\, dW_k/dt \qquad (3.2)$$

gdzie:

C_1, C_2 - parametry wyznaczane z pomiarów obniżeń w czasie,
dW_k/dt - obliczona, potencjalnie możliwa prędkość obniżeń punktu.

Proponowana zależność ujmuje wszystkie dotychczasowe wyniki badań dotyczące zmienności parametru c, gdyż prędkość dW_k/dt jest proporcjonalna do prędkości postępu frontu ścianowego V_f, maleje z głębokością h, jest większa w pobliżu frontu ścianowego i odpowiednio mniejsza daleko od frontu ścianowego. Stosując w równaniu (2.5) zależność (3.2) otrzymano liniowe równanie różniczkowe (3.3).

Weryfikacja równania (3.3) przeprowadzona na podstawie pomiarów obniżeń 8 linii obserwacyjnych wykazał, że równanie to dobrze ujmuje główne cechy obserwowanego procesu obniżeń w czasie. We wszystkich analizowanych przypadkach wyznaczona wartość parametru C_2 była znacznie większa od zera, a błąd średni aproksymacji obniżeń obliczonych równaniem (3.3) mieścił się w przedziale od 1,6% do 3,1% wartości obniżeń maksymalnych i był znacznie mniejszy od analogicznego błędu charakteryzującego równanie (2.5) S.Knothego. Wyznaczone wartości parametrów C_1,C_2 są generalnie duże, wykazując bardzo istotne uzależnienie od wielkości $A_1/tg\beta$ (czyli od wielkości obrzeża d) i głębokości h. Zależność $C_1(h,A_1/tg\beta)$, $C_2(A_1/tg\beta)$ lub $C_1(h,d/h)$, $C_2(d/h)$ określono w postaci empirycznych wzorów (6.21), (6.22), (6.28), (6.29).

Korzystając z proponowanych wzorów przeanalizowano wpływ prędkości postępu frontu wybierania i wielkości maksymalnego obniżenia na kształt profilu niecki obniżeniowej w rejonie czynnej ściany.

Opracowane przez autora, bardzo obszerne oprogramowanie ww. wzorów pozwala na sporządzanie praktycznie dowolnych prognoz deformacji powierzchni oraz na wyznaczanie na podstawie pomiarów obniżeń wartości parametrów $tg\beta$,A_1,a, C_1,C_2, charakteryzujących własności górotworu.

ОПИСАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ФАЗЫ ПОНИЖЕНИЯ ЗОНЫ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ КОНЕЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Р е з ю м е

Предметом настоящей работы является проблема описания понижений поверхности, возникающих в результате выемки залежа методом подземной эксплуатации, с учетом фактора времени.

Основным для дальнейших рассуждений принято уравнение С.Кнота (2.5):

$$\frac{dW(t)}{dt} = c\,[W_k(t) - W(t)] \qquad (2.5)$$

где:

c (1/время) – параметр, определенный в результате рассчетов понижений в зависимости от времени, называемый коэффициентом времени;

$W(t)$ – понижение в момент t;

$W_k(t)$ – потенциально возможные понижения, которые возникли бы в момент t, если бы каждый прирост объема выбранного залежа вызывал немедленный прирост понижения $dW_k(t)$.

Принимая в уравнении (2.5) c=constans и расчитывая величину понижения $W_k(t)$ на основе общепринятых формул интегрально-геометрических линейных теорий влияний получаем непрерывное и достаточно общее описание явления, которое, однако, в сравнении с измерениями, проявляет ряд систематических различий.

На основе результатов исследований как собственных, так и представленных в литературе, определено, что для поправления описания понижения в зависимости от времени следует:

- разработать формулы, которые лучше и достаточно обще будут описывать конечные понижения $W_k(t)$,
- заменить в принципе постоянный коэффициент времени на некорую функцию c (t,x,y,h), описывающую наблюдаемое изменение параметра, а затем на основе размеров понижений в зависимости от времени составить спецификацию ее параметров.

В области описания понижений $W_k(t)$ рассматривалась проблема описания дальнего влияния и проблема описания наблюдаемой асимметрии формы полной определенной мульды оседания относительно края эксплуатации.

С целью расширения возможностей формирования теоретического профиля мульды оседания, применяя произвольную интегрально-геометрическую теорию, предлагается расчитывать понижения как композицию понижений, расчитанных с принятием двух разных, постоянных лучей рассеивания влияния. В случае теории В.Будрыка - С.Кнота, сохраняя правильность описания понижений в зоне края эксплуатации, получено удовлетворительное описание дальних понижений с применением формулы (4.8, 4.10, 4.11).

Для описания наблюдаемой асиметрии профиля мульды оседания относительно края эксплуатации, принят упрощающий принцип, что она является результатом объемных изменений в деформированном горном массиве. На основе анализа результатов лабораторных исследований породы сжимаемой трехосно определено, что аргументом функции φ, описывающей объемные изменения породы в условиях больших деформаций, может быть одна из постоянных девиатора, называемая октаэдрической деформацией γ_{oct}. Применяя теорию В.Будрыка - С.Кнота, величину γ_{oct} для точек в горном массиве можно расчитать из упрощенной формулы:

$$\gamma(x,y,z,t)_{oct} \cong \gamma = \left[A_2 r(z)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]^{0,5} \qquad (4.22)$$

где:

$w(x,y,z,t)$ - понижение точки в горном массиве, расчитанное по формуле С.Кнота. Время определяет в этой формуле продолжительность эксплуатации.

Принимая, что наблюдаемый асимметрический профиль определенной мульды оседания можно описать как сумму линейных понижений (симметричных относительно края эксплуатации) и нелинейной поправки $A_1 \Delta w(\varphi(\gamma))$ являющейся результатом объемных изменений горного массива, представлен общий способ конструирования функции Δw в виде интегральных формул (4.27, 4.28). Ограничивая диапазон рассуждений до случая понижения поверхности, для эксплуатации, проводимой в различных пластах на подобных глубинах, поправка Δw может иметь следующий общий вид:

$$\Delta w = A_1 r \, \phi \left(\gamma^2, A_3 \frac{w}{r}\right) \qquad (4.31)$$

Исследуя ряд возможных видов функции ϕ с точки зрения их аналитических свойств определено, что можно получить довлетворительное описание понижений, применяя формулу (5.1).

Анализируя понижение 8 наблюдаемых линий и литературные данные, составлена спецификация параметров формулы (5.1). Основными признаны параметры $tg\beta$, A_1, a, которые можно определить на основе измеренного профиля одиночной, полной, определенной мульды оседания. Остальные параметры трактуются как постоянные величины или как функции, зависимые от параметра A_1. Функция w_k определена формулой (5.1) имеет ряд положительных черт:

- является несимметричной относительно пункта изгиба, причем, расчитанные на основе формулы (5.1) максимальные искривления профиля оседания над выработанным пространством являются о ок. 50% выше от максимальных искривлений в зоне края эксплуатации;
- характеризуется, независимо от величины A_1, более широким диапазоном влияния в соответствии с наблюдаемым на практике;
- значительно лучше, чем существующие до сих пор формулы, описывает неполные мульды оседания;
- позволяет на линейную суперпозицию понижений, вызванных эксплуатацией, проводимой в различных пластах, залегающих на подобной глубине.

Значительная поправка описания понижений в зависимости от времени получается путем замены в уравнении (2.5) параметра c=constans на линейняю зависимость:

$$c(t,x,y,h) = C_1 - C_2\, dW_k/dt \qquad (3.2)$$

где:

C_1, C_2 - параметры, определенные в результате расчетов понижений в зависимости от времени,

dW_k/dt - расчетная потенциально возможная скорость понижения точки.

Предлагаема зависимость охватывает все прежние результаты исследований, относящиеся к изменениям параметра c, т.к. скорость dW_k/dt пропорциональна скорости подвигания фронта лавы V_f, уменьшается с увеличением глубины h, вблизи фронта лавы ее величина больше, а вдали от фронта лавы меньше. Подставляя в уравнении (2.5) зависимость (3.2) получим линейные дифференциальные уравнения (3.3).

Проверка уравнения (3.3), проведенная с учетом размеров понижений 8 наблюдаемых линий, показала, что в этом уравнении хорошо показаны главные качества наблюдаемого процесса понижений в зависимости от времени. Во всех проанализированных случаях определенная величина параметра C_2 была значительно больше 0, а средняя ошибка аппроксимации понижений, расчитанных по формуле (3.3), уменьшалась в диапазоне 1.6% - 3.1% величины максимальных понижений и была значительно меньше, чем аналогичная ошибка, характеризующая уравнение (2.5))С.Кнота. Определенные значения параметров C_1,C_2 в общем большие и значительно зависят от величины $A_1(tg\beta)$ т.е. от величины грани d и глубины. Зависимость $C_1(h, A_1/tg\beta)$, $C_2(A_1/tg\beta)$ или $C_1(h, d/h)$, $C_2(d/h)$ определена в виде эмпирических формул (6.21, 6.22) и (6.28, 6.29).

На основе предложенных формул проанализировано влияние скорости подвигания фронта выборки и величины максимального понижения мульды оседания в зоне действующей лавы.

Разработанное автором, очень широкое программное обеспечение в/у формул, позволяет на составление практически произвольных прогнозов деформации поверхности, а также на определение на основе измерений понижений величин параметров $tg\beta, A_1, a, C_1, C_2$ характеризующих свойства горного массива.

A DESCRIPTION OF AN UNSTABILIZED PHASE OF MINING AREA SUBSIDENCE WITH DUE CONSIDERATION TO THE ASYMMETRY OF THE FINAL INFLUENCES

A b s t r a c t

The subject of the present paper is the problem of description of the surface subsidence resulting from the underground mining of a deposit while taking into account the time factor. S.Knothe's equation (2.5) has been assumed initial for futher considerations:

$$\frac{dw(t)}{dt} = c\,[w_k(t) - w(t)] \qquad (2.5)$$

where:

- c [1/time] - parameter determined from the measurements of subsidence in time, also called subsidence speed ratio, or time ratio,
- $w(t)$ - subsidence at moment t,
- $w_k(t)$ - potentially possible subsidence which would take place at the moment t, if each increase in volume of the extracted deposit $dV(t)$ caused an immediate increase of subsidence $dw_k(t)$.

Assuming in equation (2.5) c=constans, calculating the magnitude of subsidence $w_k(t)$ on the basis of the commonly-used formulas for geometrical-integral (linear) theories of influence, we obtain a continuous and sufficiently general description of the phenomenon which, in confrontation with the measurements, shows however a number of systematic discrepancies.

On the basis of own test results, as well as those presented in literature, it has been found that to improve the description of the subsidence in the time we should:

- develop formulas which will describe better and in a sufficiently general manner the final subsidence $w_k(t)$,
- substitute the constant, in principle, subsidences speed ratio "c" by a certain function $c(t,x,y,h)$ describing the observed variability of the parameter c, and next, on the basis of the subsidence measurements in time, specify its parameters.

In the sphere of description of subsidence $w_k(t)$, the problem of description of distant influence, and the problem of description of observed asymmetry of the shape of a complete stabilized subsidence trough to the mining edge has been analyzed.

To widen the possibilities of the shaping of the theoretical profile of the subsidence trough, while using an optional geometrical-integral theory, a calculation of the subsidence as a compound of subsidences, calculated with an assumption of two different constant radii of the dissipation of influences, is suggested. In the case of W.Budryk-S.Knothe theory, a good description of distant subsidences was achieved while maintaining a correctness of the discription of subsidence in the region of the mining edge using the formolas (4.8; 4.10; 4.11).

To describe the observed asymmetry of the subsidence trough profile to the mining edge, a simplifying assumption has been made that it is the result of the volumetric changes in the deformed rock mass. On the basis of an analysis of the laboratory test results of the rock specimens triaxially compressed, it has been found that an argument of the function φ describing the volume changes of the rock in the conditions of high strains may be one of the invariants of the strain γ_{oct}. Using W.Budryk-S.Knothe theory, the magnitude of γ_{oct} for the points in the rock mass may be calculated from the following simplified equation:

$$\gamma(x,y,z,t)_{oct} \cong \gamma = \left[A_2 r(z) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]^{0,5} \tag{4.22}$$

where:

$w(x,y,z,t)$ - subsidence of point in the rock mass calculated by means of S.Knothe formula. The time t determines in the formula the range of the mining.

Assuming that observed asymmetrical profile of a stabilized subsidence trough may be described as a sum of linear subsidences (symmetrical to the mining edge), and nonlinear correction $A_1 \Delta w(\varphi(\gamma))$ which is the result of the changes in the rock mass volume, a general method of constructing the function ΔW in the form of integral formulas (4.27), (4.28) has been presented. Limiting the range of the considerations to the case of surface subsidences, for the mining conducted in the various seams at similar depths, the corretion ΔW may have the following general form:

$$\Delta W = A_1 r \phi \left(\gamma^2, A_3 \frac{w}{r}\right) \tag{4.3}$$

Investigating a number of the possible forms of the function as to their analytical preperties, it has been found that a good description of final subsidence may be obtained when using formula (5.1).

Analyzing the subsidence of 8 observation lines and the data from the literature, the parameters of formula (5.1) have been specified. The parameters $tg\beta, a, A_1$, which may be dtermined on the basis of measured profile of a single, complete, stabilized subsidence trough have been considered fundamental. The remaining parameters have been treated as constant quantities or functional ones depending on the parameter A_1. The function W_k determined by formula (5.1) has a number of favourable characteristics:

- it is asymmetrical to the point of inflexion with the maximum curvatures on the basis of formula (5.1), being about 50% higher than the maximum curvatures in the region of the mining edge,
- it is characterized, independently of the value A_1 by a much greater range of influences, consistent with the one observed in practice,
- it describes much better than the formulas used so far, the incomplete subsidence troughs,
- it permits a nonlinear superposition of the subsidences caused by the mining conducted in different seams deposited at similar depths.

A significant improvement in equation (2.5), the parameter c=constans by a linear dependence:

$$c(t,x,y,h) = C_1 - C_2\, dW_k/dt \qquad (3.2)$$

where:

C_1, C_2 - parameters determined from the measurements of subsidences in time,

dW_k/dt - calculated, potentially possible rate of point subsidence.

The dependence proposed incorporates all the test results to date, referring to the variability of the parameter c, since the rate dW_k/dt is proportional to the rate of the advance of the longwall front V_f, decreases with the depth h, is higher close to the longwall front and is correspondingly lower far from the front. Applying, in equation (2.5), the dependence (3.2) we have obtained a linear differential equation (3.3).

A verification of equation (3.3), made on the basis of the measurements of the subsidences of 8 observation lines, has shown that this equation gives a good description of the principal characteristics of the observed subsidence process in time. In all the cases analyzed, the deterimined value of parameter C_2 was much greater than zero, whereas the mean approximation error for the subsidences calculated by means of equation (3.3) was included in the interval from 1,6% to 3,1% of the value of the maximum subsidence, and was much lower than the analogical error characterizing Knothe'e equation (2.5).

The determined values of the parameters C_1, C_2 are generally high, exhibiting very essential dependence on the quantity $A_1/tg\beta$ (that is on the quantity of the periphery d) and depth. The dependence

$C_1(h, A_1/tg\beta)$, $C_2(A_1/tg\beta)$ or $C_1(h, d/h)$, $C_2(d/h)$ has been determined in the form of empirical formulas (6.21, 6.22), (6.28, 6.29).

On the basis of the formulas proposed, the effect of rate of the advance of the extraction front and the magnitude of the maximum subsidence on the shape of the profile of the subsidence trough in the region of an active longwall has been analyzed.

An extensive software of the above mentioned formulas, devised by the author, makes possible an elaboration of practically optional prognostications of surface deformations and a determination, on the basis of the measurements of the subsidence, of the values of the parameteres $tg\beta$, A_1, a, C_1, C_2 characterizing the properties of the rock mass.