

Mirosław CHUDEK

Lucjan STEFAŃSKI

WPLYW POSTĘPU FRONTU GÓRNICZEGO NA SZYBKOŚĆ
DEFORMACJI TERENU NA POWIERZCHNI

Streszczenie. W pracy wyprowadzono równanie profilu niecki obniżeniowej występującej podczas trwania eksploatacji pokładu, na głębokości H ponad którym zalega masyw skalny o znacznej średniej wytrzymałości na rozciąganie R_{rs} , uzależniając wielkość obniżenia i pozostałych wskaźników deformacji od szybkości przesuwu prostoliniowego frontu górniczego. I tak równanie profilu niecki dynamicznej ma postać:

$$W(v) = v_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \int_0^{\infty} \exp \left[\frac{-\pi \cdot v_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}} \right] dt \quad (43)$$

Nachylenie profilu niecki dynamicznej

$$T(v)_{\max} = \frac{1}{v_{xs}} \frac{W_{\max}}{\frac{2}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{\acute{s}r}}}} = 0,5 W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (46)$$

Krzywiżna terenu

$$K(v) = 1,5 \cdot v_x \cdot W_{\max} \frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}} \quad (50)$$

Przemieszczenie poziome

$$U(v) = 0,8 W_{\max} \quad (52)$$

Odkształcenie poziome

$$\epsilon_{(v)_{\max}} = 1,2 \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (55)$$

Wprowadzono również wzór na szybkość osiadania punktu pod wpływem eksploatacji (rys. 9)

$$v_{zk} = v_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}} \right] \quad (19)$$

a także na maksymalną szybkość osiadania punktu

$$v_{zk \max} = 0,043 v_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (20)$$

dla wybiegu frontu eksploatacji $x_1 = -\infty$

Podano zasięg wpływów eksploatacji w niecce dynamicznej

$$r_d = \frac{v_{xs}}{v_{zk}} \cdot W_{\max} \quad (22)$$

Gdy wybieg frontu eksploatacji będzie $x_1 \geq 2r$, wówczas szybkość osiadania punktu na powierzchni określa wzór

$$v_{zs} = 0,00035 \cdot v_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}} \quad (23)$$

Wyprowadzono także wzory na:

- czas opóźnienia wpływu eksploatacji

$$t_o = \frac{2W(x)}{v_{zk}} = 2tr$$

$$W(x) = W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}} \int_x^{\infty} \exp\left[-\frac{\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda \quad (10)$$

$$t_o = \frac{2}{v_{xs}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] \int_x^{\infty} \exp\left[-\frac{\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda \quad (25)$$

dla $x = 0$

$$t_{o \max} = \frac{2}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma \dot{\epsilon} r}} \quad (26)$$

- czas tworzenia się pełnej niecki obniżeniowej wynosi

$$t_{ob} = \frac{4}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma \dot{\epsilon} r}} \quad (28)$$

- parametr spowolnienia wpływów eksploatacji (rys. 11)

$$Op = \frac{v_x}{v_z} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma \dot{\epsilon} r}}}{w_{\max}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] \quad (38)$$

- czas ruchu punktu A (rys. 11)

$$t_z = \frac{v_x}{g} w_{\max} \sqrt{\frac{\gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] \quad (33)$$

gdzie: g - przyspieszenie ziemskie

- minimalny opór masywu skalnego występuje w miejscu największej deformacji, tj. na krawędzi pokładu (dla $x = 0$)

$$Op_{\min} = \frac{r}{w_{\max}} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma \dot{\epsilon} r}}}{w_{\max}}$$

- średnią wartość postępu frontu górniczego

$$V_{xs} = \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot R_{rs}}{W_{max} \cdot \gamma_{sr}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right]} \quad (57)$$

gdzie: t_E - czas eksploatacji niezbędny dla utworzenia niecki dynamicznej

- maksymalna wartość postępu frontu górniczego będzie, gdy front przesunie się o wielkość

$$x = V_x \cdot t = 2r$$

$$V_{xs \max} = 0,0275 \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr} \cdot W_{max}}} \quad \text{m/d} \quad (58)$$

gdzie:

V_x - szybkość posuwu frontu górniczego,

t - czas wybierania pokładu na wybiegu ściany o długości x .

We wzorach: R_{rs} , γ_{sr} - średnie wartości wytrzymałości skał w warunkach masywu skalnego na rozciąganie i ciężar objętościowy od stropu eksploatawanego pokładu do powierzchni.

1. WPROWADZENIE

Prognozowanie deformacji górotworu i terenu na powierzchni w czasie trwania eksploatacji pokładu, posiada istotne znaczenie praktyczne. W szczególności bardzo ważnym zagadnieniem jest określenie szybkości osiadania terenu i związanym z nią narastanie odkształceń.

Zagadnieniem tym zajmuje, wiele ośrodków naukowych w kraju i zagranicą [19, 20].

St. Knothe w swoich badaniach nad nieckami dynamicznymi przyjął założenie, że prędkość osiadania punktu jest proporcjonalna do różnicy między końcowym obniżeniem w_k jakiemu obniżeniu punkt może ulec na skutek wybranej partii pokładu, a wielkością obniżenia punktu w chwili czasu t .

Wg powyższego założenia można napisać wzór [19, 20] w postaci:

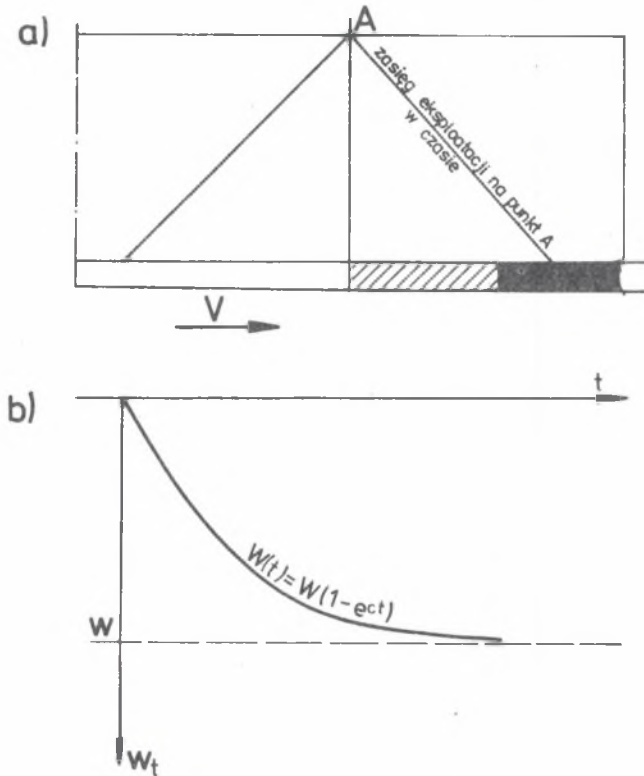
$$\frac{dw}{dt} = c[w_k - w(t)] \quad (1)$$

gdzie:

c - współczynnik czasu zależny od własności górotworu i wynosi dla GZW $C = 0,5$ do $0,7/\text{rok}$.

Przyjmując dalej założenie, że pewna powierzchnia złoża została wybrana w czasie $t = 0$, wtedy obniżenie punktu w czasie (rys. 1) można wyrazić wzorem:

$$w(t) = w_k(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$



Rys. 1. Przebieg obniżenia punktu w czasie w przypadku eksploatacji o znacznym wybiegu $x_1 = \infty$

Fig. 1. Subsidence in time in the case of mining activities with considerable coasting $x_1 = \infty$

Obniżenie punktu A dla wybiegu frontu górniczego $s > r$ (gdzie: r - promień zasięgu wpływów głównych $r = \frac{H}{\text{tg}\beta}$) określa równanie:

$$w(t) = \left[\frac{v^2}{c^2 \cdot r^2} \cdot \left(2e^{\frac{c \cdot r}{v}} - e^{\frac{2c \cdot r}{v}} - 1 \right) \cdot e^{-c \left(t + \frac{r-s}{v} \right)} + 1 \right] \quad (3)$$

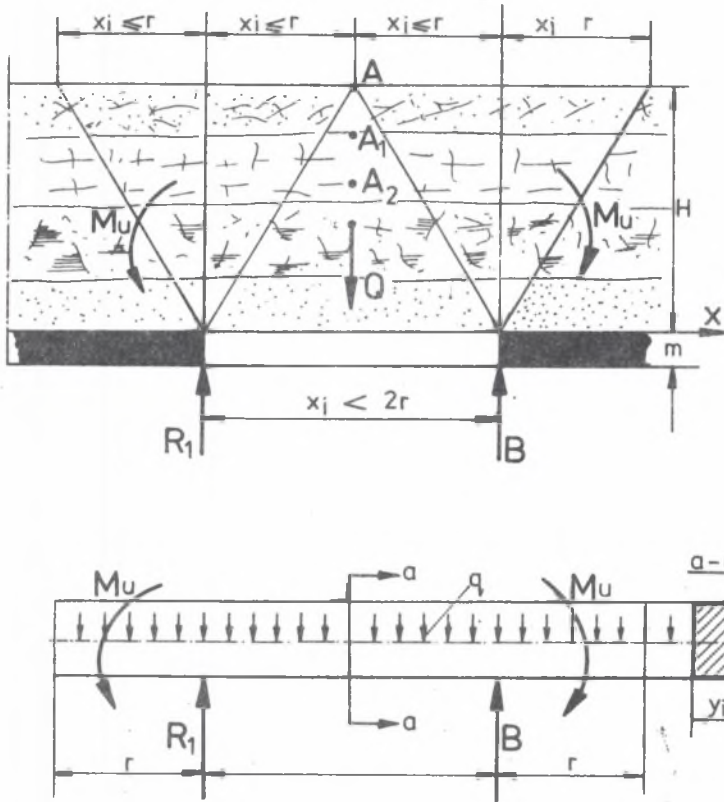
gdzie:

v - postęp frontu górniczego, m/rok.

Czas po którym występuje największa prędkość przemieszczeń określona została przez Skinderowicza wzorem:

$$t_{\max} = \frac{2r}{v} = \frac{2 \cdot H}{v \cdot \text{tg}\beta} \quad (4)$$

Czas retardacji wpływów eksploatacji, czyli opóźnienia deformacji w górotworze i w terenie na powierzchni, wynika z oporu Op masywu skalnego o grubości H , który można traktować jako belkę utwierdzoną o przekroju prostokątnym, statycznie niewyznaczalną i obciążoną własnym ciężarem $q = p_z \cdot \gamma_1$ (γ_1 - szerokość belki) (rys. 2). Długość belki, przy



Rys. 2. Schemat do obliczeń A , A_1 , A_2 - miejsc kolejnych obniżeń punktu A na powierzchni

Fig. 2. Scheme of calculating the values of A_1 , A_2 - the successive subsidence of the point A on the surface

której następuje nad przestrzenią wybraną pełne jej załamanie i osiadanie, pod wpływem własnego ciężaru q wg [6, 17], wynosi:

$$r = \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{dr}}}; \quad (5)$$

gdzie:

H - głębokość eksploatacji w [m],

R_{rs} - średnia wartość wytrzymałości skał na rozciąganie do głębokości H określona wzorem (6)

$$R_{rs} = \sum_{i=1}^n \frac{Rr_i \cdot m_i}{H}; \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

Rr_i - wytrzymałość skał tworzących warstwę masywu skalnego [MPa] (wg tabl. 1) w jednoosiowym stanie naprężeń,

m_i - grubość warstwy masywu,

$\gamma_{\text{śr}}$ - średni ciężar objętościowy skał do głębokości H określony wzorem (7)

$$\gamma_{\text{śr}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot m_i}{H}; \quad (\text{MPa/m}) \quad (7)$$

γ_i - ciężar objętościowy skał warstwy masywu tabl. 1.

Zasięg wpływu eksploatacji w górotworze na horyzoncie sponad eksploatowanym pokładem określa wzór (rys. 3) [17]:

$$r_z = z \cdot \sqrt{\frac{R_{rs}}{p_z}}; \quad (\text{m}) \quad (8)$$

gdzie:

R_{rs} - średnia wytrzymałość skał na rozciąganie od stropu eksploatowanego pokładu do powierzchni.

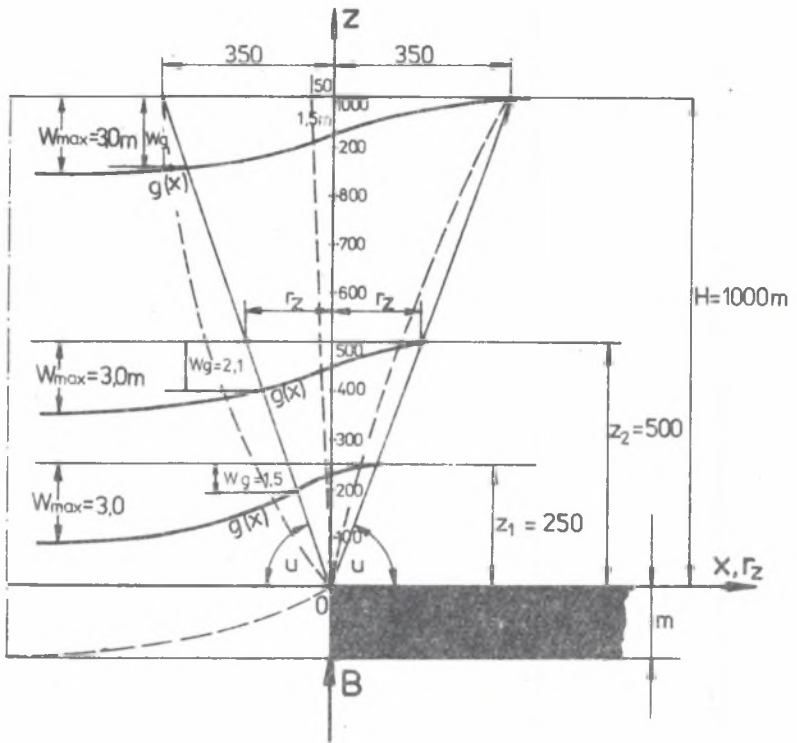
Gdyby masyw skalny nie był utwierdzony momentami M_u (rys. 2), a w przypadku znacznego wybiegu frontu prostoliniowego $x_1 > -\infty$ momentem M_u i podporą B, wówczas obniżenie punktu A na powierzchni byłoby natychmiastowe.

W rzeczywistości o deformacji warstw górotworu (rys. 3) decyduje wielkość r_z (8) mieszcząca się w równaniu profilu niecki obniżeniowej warstw zalegających na horyzoncie sponad eksploatowanym pokładem:

$$g(x) = \frac{w_0}{z} \sqrt{\frac{p_z}{R_{rs}}} \int_x^\infty \exp \left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot p_z}{z^2 \cdot R_{rs}} \right] \cdot d\lambda \quad (9)$$

Srednie wartości wytrzymałości na rozciąganie R_{r1} (MPa)
ciężaru objętościowego skał (MPa/m) w warstwach karbońskich γ_1

Lp.	Rodzaj skały	Symbol	Warstwy stratygraficzne									
			żyziekie	orzskie	rudzkie	siodłowe	brzeżne	włabrzyskie	zaczerskie	lubelekie		
1	Konglomerat	γ_1	0,022	0,023	0,026	0,026	0,025	-	-	-	-	
		R_{r1}	1,73	5,49	3,53	7,74	5,24	-	-	-	-	
2	Pisakowiec gruboziarnisty	γ_1	0,022	0,024	0,025	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	
		R_{r1}	2,70	5,58	3,50	8,14	6,37	2,45	2,94	3,30	3,30	
3	Pisakowiec średnio i drobnoziarnisty	γ_1	0,023	0,025	0,025	0,024	0,026	0,027	0,026	0,026	0,025	
		R_{r1}	2,86	8,09	5,39	7,94	7,99	5,98	3,28	7,10	7,10	
4	Muzowiec (żupek piaszczy- ety)	γ_1	0,024	0,025	0,024	0,026	0,025	0,027	0,028	0,025	0,025	
		R_{r1}	2,91	3,43	5,59	5,10	5,29	5,98	7,14	7,10	7,10	
5	Iłowiec (żupek ilasty)	γ_1	0,024	0,025	0,024	0,024	0,027	0,026	0,027	0,026	0,026	
		R_{r1}	3,43	4,08	4,18	4,59	6,39	2,81	3,02	3,57	3,57	
6	Węgiel	γ_1	0,012	0,012	0,013	0,015	0,012	0,014	0,015	0,015	0,017	
		R_{r1}	0,51	0,43	0,63	0,70	0,57	0,91	0,70	0,70	0,62	



Rys. 3. Tworzenia się obrzeża niecki osiadania w górotworze i na powierzchni dla: $H = 1000$ m, $W_{\max} = 3$ m, $R_{\rho} = 3$ MPa, $\gamma'_{\rho r} = 0,025$ MPa/m

Fig. 3. Formation of the periphery of the trough of subsidence in the orogen and on the surface for: $H = 1000$ m, $W_{\max} = 3$ m, $R_{\rho} = 3$ MPa, $\gamma'_{\rho r} = 0,025$ MPa/m

gdzie:

w_g - obniżenie warstwy na horyzoncie z ponad eksploatowanym pokładem

w odległości $r_z = z \sqrt{\frac{R_{\rho}}{p_z}}$ od początku układu współrzędnych

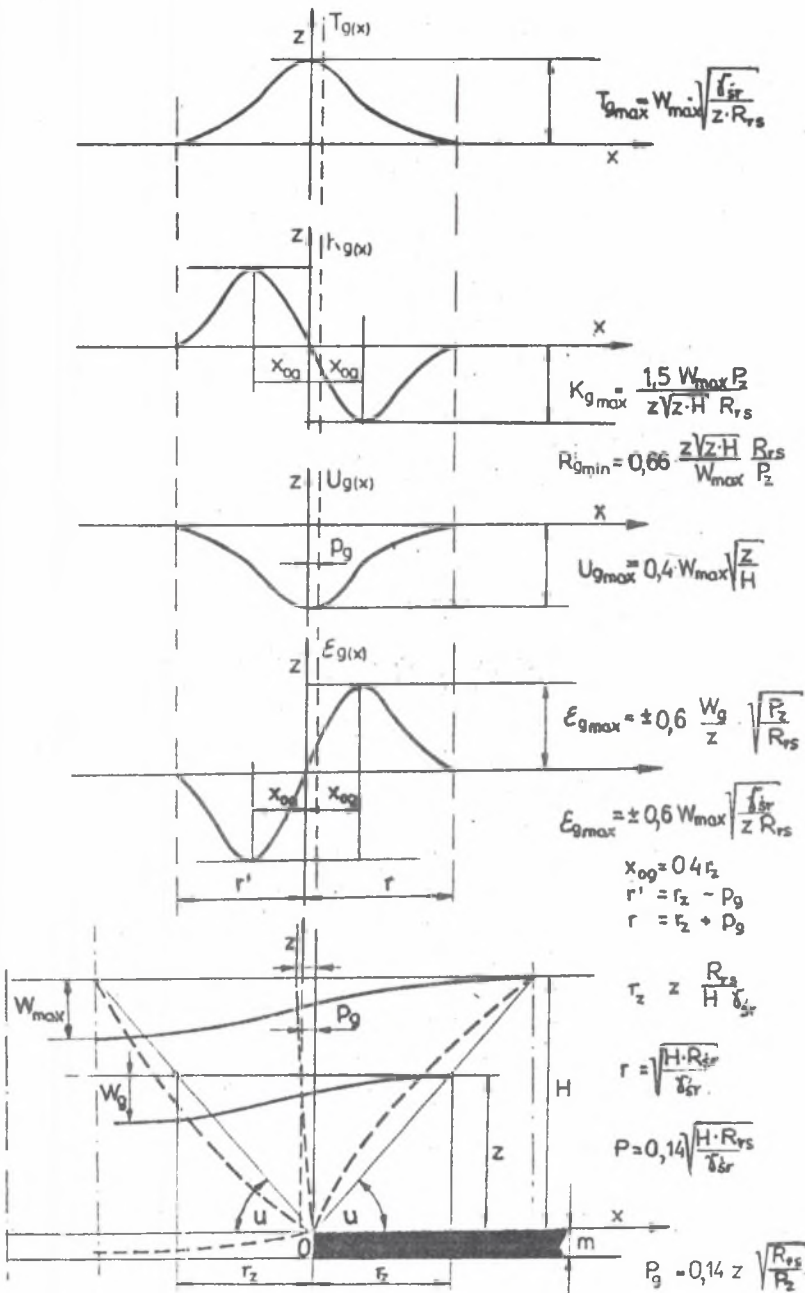
$$w_g = W_{\max} \sqrt{\frac{z}{H}}; \quad [m] \quad (10)$$

$W_{\max} = a \cdot m$; m - grubość pokładu,
 a - parametr kierowania stropem,

$p_z = H \cdot \gamma'_{\rho r}$ - ciśnienia pierwotne na głębokości H

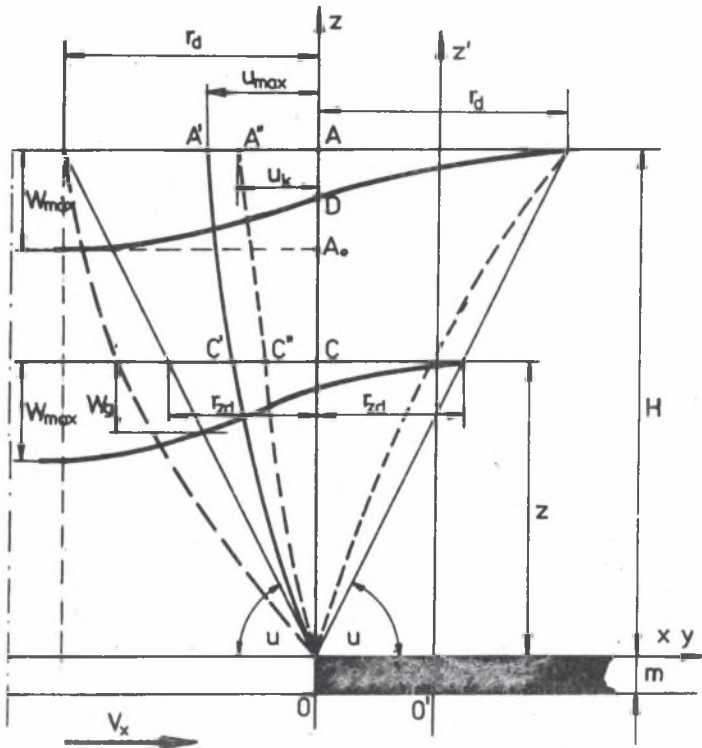
λ - zmienna pozorną

$Z = Z_p$ - wysokość zawału pełnego ($Z \neq 0$).



Rys. 4. Wskaźniki deformacji górotworu, ujęcie graficzne i wzory na obliczenie ich wielkości maksymalnych na poziomie Z

Fig. 4. Indices of orogen deformations, presented graphically, and formulae to calculate their maximum values |Z



Rys. 7. Przesunięcia punktu A w czasie eksploatacji
Fig. 7. Shift of the Point A in the course of mining

runku osi x punkcie przegięcia D następuje zmiana naprężeń w poszczególnych warstwach górotworu z naprężeń rozciągających na ściskające i na przemian.

Eksploatacja pokładu o długim wybiegu frontu wywołuje tworzenie się niecki dynamicznej, która chociaż nie w pełni ukształtowana, to jednak posiada kształt przybliżony niecki ustalonej z ewną zasięgiem r_{zd} w górotworze na horyzoncie sponad pokładem i zasięgiem r_d na powierzchni wyprzedzającymi linię frontu górniczego (rys. 7).

Eksploatacja przechodząca pod punktem A na powierzchni i punktem C w górotworze (rys. 7) powoduje jego obniżenie. Punkt A obniżając się ulega przemieszczeniu poziomemu do położenia A' , i C' , w kierunku ujemnym osi x , a po dalszym przesunięciu się frontu górniczego w położenie $O'Z'$, punkt A' zaczyna przemieszczać się w położenie A'' i C'' , tj. w kierunku dodatnim osi x .

Końcowe położenie punktu A, gdy front eksploatacyjny oddali się na dostatecznie dużą odległość, ($x_1 > -\infty$) teoretycznie powinno być w punkcie A_0 . W rzeczywistości punkt A po wychyleniu się do położenia A'

wraca do położenia A'' , a w górotworze do C'' wykazując trwałe przemieszczenia poziome U_k którego wartość maksymalną określić można z wzoru:

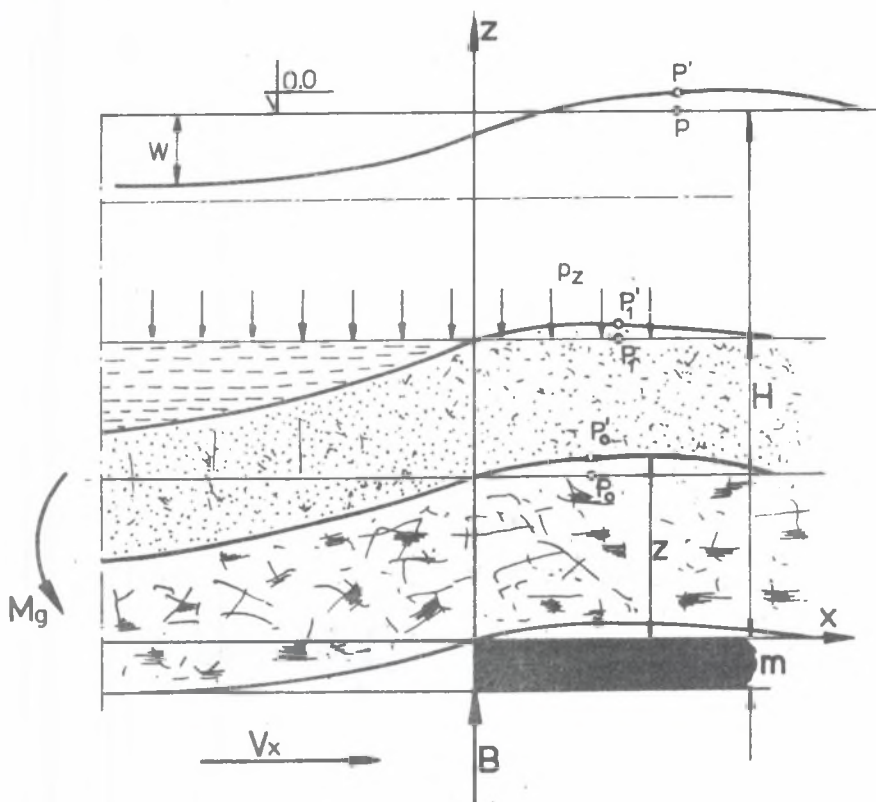
- w górotworze:

$$U_{g \max} = 0,4 W_{\max} \sqrt{\frac{z}{H}}; \quad [m] \quad (11)$$

- na powierzchni (dla $z = H$)

$$U_{\max} = 0,4 W_{\max}; \quad [m] \quad (12)$$

Zjawisku tworzenia się dynamicznej niecki pod wpływem przesuującego się frontu górniczego towarzyszy (przy warstwach karbonu o wysokiej wytrzymałości R_r i R_c) stwierdzone pomiarami "in situ" oraz obserwacjami prowadzonymi na modelu [9] wypiętrzenie przed czołem frontu górniczego ponad calizną (rys. B).



Rys. 8. Wypiętrzenie warstw przed czołem frontu eksploatacyjnego B - reakcja podłoża dla masywu skalnego, M_g - moment zginający

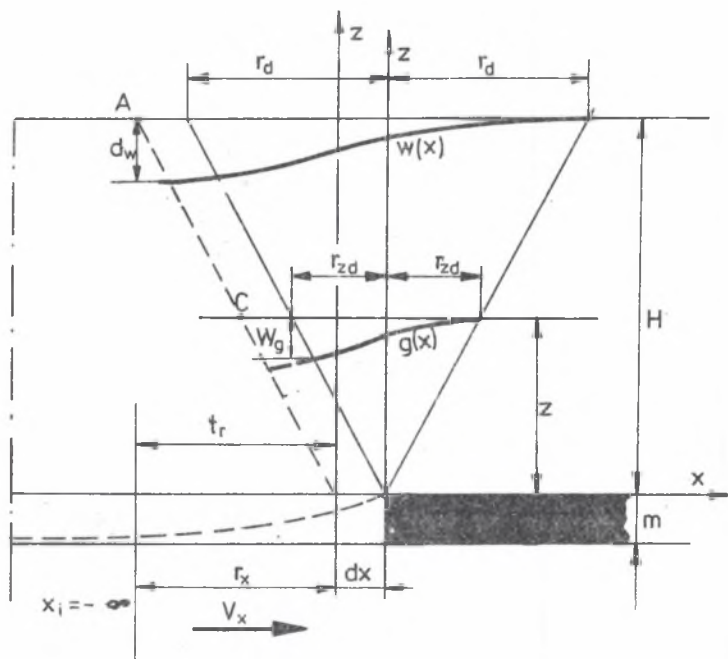
Fig. 8. Upheaval of strata at the working front B - reaction of the bed-rock, M_g - bending moment

Wypiętrzenia te są nieznaczne na powierzchni, natomiast rejestrowane na dole w kopalni (np. KWK Pokój) w przekrobie głównym, poz. 790, wynoszą kilkadziesiąt centymetrów.

3. RUCH PUNKTU NA POWIERZCHNI POD WPLYWEM EKSPLOATACJI POKŁADU

Ruch punktu A na powierzchni i punktu C w górotworze na horyzoncie z (rys. 7) związany jest z przemieszczeniem się całego masywu skalnego w kierunku pustki po wybranej części pokładu o wybiegu $x_1 > -\infty$ pod wpływem sił ciężenia.

Z rys. 9 wynika, że każdemu przesunięciu się frontu górniczego o wielkości dx , odpowiada obniżenie terenu na powierzchni o wartość d_w . Obniżenie punktu A o d_w znajdującego się w odległości ustalonej zasięgiem wpływów dynamicznych $r_d = V_x \cdot t_r$ (gdzie: V_x - średnia wartość szybkości posuwu frontu górniczego, t_r - czas opóźnienia wpływów po zatrzymaniu frontu eksploatacji, ustalający się w danych warunkach geomechanicznych i górnictwo-geologicznych), następuje w tym samym czasie dt , co przesuwanie się frontu górniczego o wartości dx .



Rys. 9. Przemieszczenie pionowe punktu A wynikiem postępu frontu górniczego

Fig. 9. Vertical displacement of point A in result of the progressing working front

Przyrost szybkości obniżenia punktu A o wartości dv_z wynosi:

$$dv_z = \frac{dw}{dt} \quad (13)$$

Przyrost szybkości posuwu frontu górniczego jako prędkość chwilowa:

$$dv_x = \frac{dx}{dt} \quad (14)$$

Porównując jednakowy czas trwania zjawiska z równań (13) i (14) otrzymamy:

$$dt = \frac{dw}{dv_z} = \frac{dx}{dv_x} \quad (15)$$

Z równania (15) przyrost szybkości obniżenia punktu A wynosi:

$$dv_z = \frac{dw}{dx} \cdot dv_x \quad (16)$$

Całkując równanie (16) otrzymamy wzór

$$\int_0^{V_{zk}} dv_z = \frac{dw}{dx} \int_0^{V_{xe}} dv_x \quad (17)$$

gdzie:

V_{zk} - końcowa szybkość osiadania punktu A,

V_{xe} - średnia wartość postępu frontu górniczego,

$$V_{xe} = \frac{2r_d}{t_E} \quad (\text{rys. 10})$$

t_E - czas eksploatacji pokładu niezbędny na utworzenie się niecki dynamicznej,

r_d - zasięg wpływu eksploatacji na powierzchni w niecce dynamicznej,

$\frac{dw}{dx} = T(x)$ - nachylenie profilu niecki obniżeniowej na powierzchni w każdym punkcie x .

$$T(x) = W_{\max} \sqrt{\frac{f_{gr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot f_{gr}}{H \cdot R_{rs}} \right]; \quad (18)$$

Z równania (17) szybkość osiadania punktu będzie:

$$V_{zk} = V_{xe} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{f_{gr}}{H \cdot R_{rs}}} \cdot \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot f_{gr}}{H \cdot R_{rs}} \right]; \quad (19)$$

Punkt A (rys. 7) osiąga maksymalną wartość osiadania już w odległości $x = r$, która jest początkiem utworzenia się profilu niecki statycznej zbliżonej swym kształtem do niecki ustalonej (przy założeniu, że wybieg frontu $x_1 \rightarrow -\infty$).

W związku z powyższym po przyjęciu w równaniu (19) promienia zasięgu r (5) otrzymamy:

$$V_{zk \max} = V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{gr}}{H \cdot R_{rs}}} \cdot e^{-\gamma_{gr} r};$$

$$V_{zk \max} = 0,043 \cdot V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{gr}}{H \cdot R_{rs}}}; \quad (20)$$

Wyniki obliczeń dokonanych za pomocą wzoru (20) podano w tabelicy 2 i w tabelicy 3, dla systemu zawałowego i na podstawkę hydrauliczną.

Tabelica 2

Szybkość osiadania punktu na powierzchni przy stałej szybkości posuwu frontu $V_{xs} = \text{const}$ i stałej grubości pokładu $m = 3 \text{ m}$ dla $a = 0,7$

H m	R_{rs} MPa	γ_{gr} MPa/m	W_{\max} m a.m	V_{xs} m/d	V_{zkmax} m/d	P_z MPa
200	2,0	0,022	2,1	2,5	0,039	4,4
400	2,2	0,023	2,1	2,5	0,026	8,8
600	2,5	0,024	2,1	2,5	0,021	15,0
800	3,0	0,025	2,1	2,5	0,016	24,0
1000	3,5	0,026	2,1	2,5	0,014	35,0

Tabelle 3

Szybkość osiadania przy stosowaniu podstawki hydraulicznej (dla $W_{\max} = 3 \cdot 0,15 = 0,45$)

H m	R_{rs} MPa	γ_{gr} MPa/m	W_{\max} m	V_{xs} m/d	W_{zkmax} m/d	P_z MPa
200	2,0	0,022	0,45	2,5	0,0083	4,4
400	2,2	0,023	0,45	2,5	0,0056	8,8
600	2,5	0,024	0,45	2,5	0,0045	15,0
800	3,0	0,025	0,45	2,5	0,0033	24,0
1000	3,5	0,026	0,45	2,5	0,003	35,0

Równanie (19) dla ekstremalnych warunków brzegowych osiąga następujące wartości:

- 1) dla wybiegu frontu $x_1 = 0$ i szybkości $V_{xs} = 0$, wówczas $V_{zk} = 0$,
- 2) dla wybiegu frontu $x_1 \rightarrow +\infty$ oraz $V_{sx} \neq 0$, wówczas szybkość osiadania $V_{zk} \rightarrow 0$,
- 3) dla wybiegu frontu $0 < x < 2r$ i szybkości $V_{xs} \neq 0$ prędkość osiadania punktu określona jest wzorami (19), (20) i (21),
- 4) funkcja (19) osiąga maksimum, gdy $\exp\left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}\right] = 1$, co jest spełnione przy $x = 0$. Wówczas maksymalna wartość szybkości osiadania wynosi:

$$V_{z \max} = V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}} \quad (21)$$

Z równania (19) można określić promień zasięgu wpływów w czasie trwania niecki dynamicznej a mianowicie:

$$V_{zk} = V_{xs} \frac{W_{\max}}{r_d} \exp\left[\frac{-\pi \cdot x^2}{r_d^2}\right];$$

Zasięg maksymalny w niecce dynamicznej będzie dla $x = 0$

$$r_d = \frac{V_{xs}}{V_{zk}} \cdot W_{\max};$$

Np.

$$V_{xs} = 2 \text{ m/d}; \quad W_{\max} = 2,1 \text{ m}$$

$$V_{zk} = 0,0005 \text{ m/d} \quad \text{lub}$$

$$V_{zk} = 0,001 \text{ m/d}$$

$$r_{d1} = \frac{2 \cdot 2,1}{0,0005} = \frac{4,200}{5} = 830 \text{ m}$$

$$r_{d2} = \frac{2 \cdot 2,1}{0,001} = \frac{420}{1} = 420 \text{ m}$$

Wartość szybkości osiadania punktu po oddaleniu się frontu górniczego na odległość $x_1 \geq 2r$ wynosi V_{zs} .

Z równania (19) po uwzględnieniu $x_1 = 2r$ otrzymamy:

$$V_{zs} = V_{xs} \cdot W_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \dot{\epsilon} r}{H \cdot R_{rs}}} \cdot e^{-\pi \cdot 4}$$

$$V_{zs} = 0,00035 \cdot V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}}; \quad (23)$$

Np.

$$\begin{aligned} \text{dla } V_{xs} &= 2 \text{ m/d}; & W_{\max} &= 2,1 \text{ m}; \\ \gamma_{sr} &= 0,025 \text{ MPa/m}; & H &= 1000 \text{ m}; \\ R_{rs} &= 3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$V_{zs} = 0,00035 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot \sqrt{\frac{0,025}{1000 \cdot 3}} = 0,000043 \text{ m/d}$$

Szybkość osiadania V_{zs} , w tym przypadku jest nieznaczna i praktycznie niecka dynamiczna przekeztalca się w nieckę ustaloną.

Dalsze zwiększenie wybiegu frontu górnicego $x \rightarrow \infty$ powoduje zanik ruchu punktu za frontem eksploatacji (czyli $V_{zs} \rightarrow 0$).

4. CZAS OPÓŹNIENIA UJAWNIANIA SIĘ WPŁYWU EKSPLOATACJI t_0

Czas retardacji t_0 wpływów podczas trwania eksploatacji określa zależność:

$$t_0 = 2 t_r = \frac{2W(x)}{V_{zk}} \quad (24)$$

Wykorzystując równanie profilu niecki (10) oraz równanie (19) czas retardacji (24) będzie:

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{2W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \int_x^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda}{V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right]}; \\ t_0 &= \frac{2}{V_{xs}} \exp\left[\frac{+\pi x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] \int_x^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda; \end{aligned} \quad (25)$$

Z równania (25) wynika, że czas opóźnienia wpływów nie zależy od grubości pokładu a jedynie od głębokości eksploatacji, szybkości frontu górnicego V_{xs} i własności geomechanicznych skał masywu skalnego.

Funkcja dla $x = 0$ przyjmie postać:

$$\int_0^{\infty} \exp \left[\frac{-\pi \lambda^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}} \right] d\lambda \rightarrow \sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{\gamma_{\text{śr}}}}$$

Stąd równanie (25) osiąga wartość maksymalną:

$$t_{0 \text{ max}} = \frac{2}{V_{\text{xs}}} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{\gamma_{\text{śr}}}}; \quad (26)$$

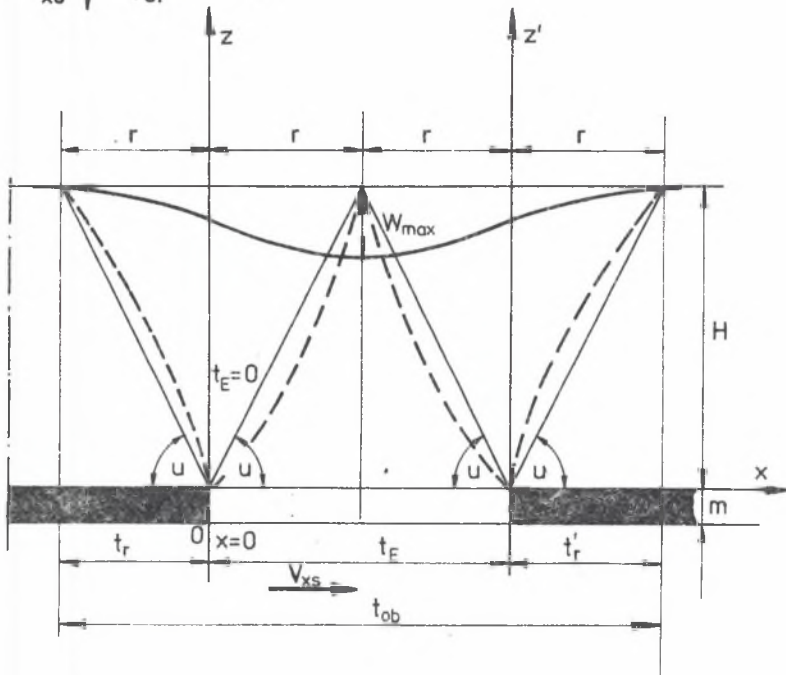
Czas tworzenia się pełnej niecki obniżeniowej (rys. 10) wynosi:

$$t_{\text{ob}} = 2 t_r + t_E \quad (27)$$

Ponieważ:

t_r - czas opóźnienia wpływów eksploatacji po jej zakończeniu, gdy $r_d = r$

$$t_r = \frac{1}{V_{\text{xs}}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{\gamma_{\text{śr}}}} \quad [6]$$



Rys. 10. Czas tworzenia się pełnej niecki obniżeniowej na powierzchni
 Fig. 10. Time of the formation of a full trough of subsidence at the surface

t_E - minimalny czas eksploatacji pokładu potrzebny na wytworzenie się W_{\max}

$$t_E = \frac{2}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rg}}{g_{sr}}} \quad [6]$$

stąd wzór (27) ma postać:

$$t_{ob} = \frac{2}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rg}}{g_{sr}}} + \frac{2r}{v_{xs}} = \frac{4}{v_{xs}} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot R_{rg}}{g_{sr}}} \quad (28)$$

5. PARAMETR SPOWOLNIENIA WPŁYWÓW EKSPLOATACJI

Ruch masywu skalnego w kierunku pionowym w przypadku założenia płaskiego stanu przemieszczeń w górotworze i na powierzchni (pokład poziomy nieskończenie długi front eksploatacyjny $y_1 = \infty$, duży wybieg frontu górniczego $x_1 = -\infty$ symetryczny zasięg w górotworze i na powierzchni w stosunku do punktu przegięcia krzywej osiadania, eksploatacji jednego pokładu na głębokości H) jest ruchem prostoliniowym ze stałym przyspieszeniem ziemskim. Ruch punktu A (rys. 11) w kierunku pionowym, określony jest równaniem:

$$\frac{d^2 w}{dt^2} = g \quad (29)$$

gdzie:

g - przyspieszenie ziemskie,

dw - przyrost obniżenia w czasie dt .

W chwili początkowej, gdy $t_z = 0$ prędkość obniżenia punktu A wynosi $v_z = 0$. Stąd całkując równanie (29) otrzymamy:

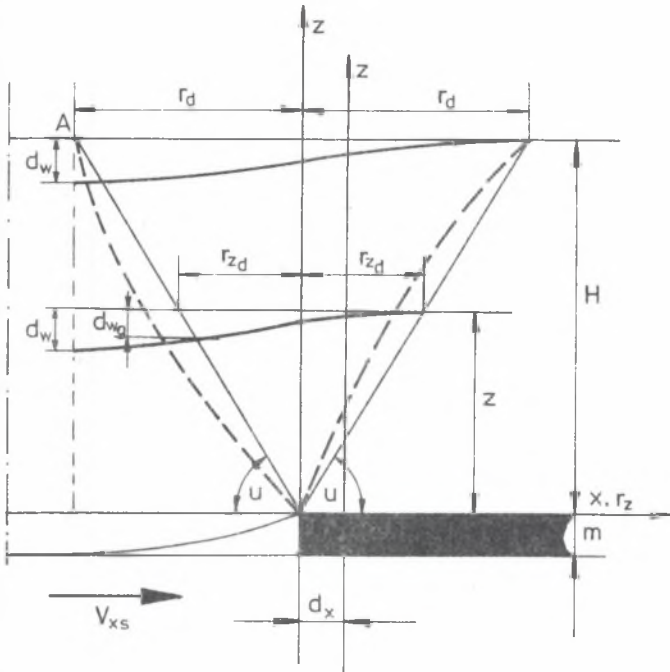
$$\frac{dw}{dt} = g \cdot t_z \quad (30)$$

gdzie:

t_z - czas pionowego ruchu punktu.

Jeżeli pomnożymy lewą stronę równania (30) licznik i mianownik przez dx , to równanie (30) przyjmie postać:

$$\frac{dx}{dx} \cdot \frac{dw}{dt} = g \cdot t_z$$



Rys. 11. Przyrost obniżeń warstw na horyzoncie z pod wpływem eksploatacji pokładu z frontem prostoliniowym przesuniętym o wartość dx

Fig. 11. Increment of the subsidence of strata on the horizon in result of mining activities in a ledge with a linear working front shifted by the value of dx

stąd jest:

$$\frac{dw}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = g \cdot t_z \quad (31)$$

Z równania (31) możemy określić czas ruchu punktu A, a mianowicie:

$$t_z = \frac{dw}{dx} \cdot v_x \frac{1}{g} \quad (32)$$

Ponieważ:

$$\frac{dw}{dx} = w_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}} \cdot \exp\left[\frac{-\pi x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}\right];$$

Wówczas równanie (32) będzie następujące:

$$t_z = \frac{V_x}{g} W_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}} \right]; \quad (33)$$

Czas ruchu punktu A określony równaniem (33) byłby bardzo krótki. W rzeczywistości ruch punktu odbywa się w długim czasie i przy małej szybkości (19). Wolny czas osiadania górotworu i powierzchni wynika z oporu masywu skalnego, który zależy od głębokości H , wytrzymałości R_{rs} , grubości wybieranego pokładu i parametru kierowania stropem.

Opór masywu skalnego określono, jako parametr spowolnienia ruchu masywu skalnego oznaczając go przez "Op".

Przyjmujemy, że każdemu przesunięciu frontu eksploatacyjnego o dx odpowiadać będzie obniżenie punktu A o wartość dw z pewnym opóźnieniem i spowolnieniem wpływów Op, to wówczas mamy:

$$dx = Op \cdot dw \quad (34)$$

gdzie:

Op - parametr spowalniający wpływ eksploatacji.

Podzielmy dwustronnie równanie (34) przez przyrost czasu dt w którym odbywa się zjawisko eksploatacji i obniżenia jednocześnie:

$$\frac{dx}{dt} = Op \cdot \frac{dw}{dt} \quad (35)$$

Z równania (35) mamy:

$$V_x = op \cdot V_z \quad (36)$$

(V_z - szybkość osiadania terenu)

oraz

$$\frac{1}{Op} = \frac{dw}{dx} \quad (37)$$

Wykorzystując równania (36) i (37) ostatecznie wartość parametru Op wyniesie:

$$Op = \frac{V_x}{V_z} = \frac{1}{\frac{dw}{dx}} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{\gamma_{\text{śr}}}}}{W_{\max}} \exp \left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}} \right]; \quad (38)$$

Minimalny opór masywu skalnego (38) będzie w miejscu największej deformacji taki, jaki jest na krawędzi pokładu (dla $x = 0$):

$$Op_{\min} = \frac{r}{W_{\max}} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}}{W_{\max}} \quad (39)$$

Np. dla

$$W_{\max} = 2 \text{ m}$$

$$R_{rs} = 3 \text{ MPa}$$

$$H = 1000 \text{ m}$$

$$\gamma_{sr} = 0,025 \text{ MPa/m}$$

$$Op_{\min} = \frac{1}{2\text{m}} \cdot \frac{1000 \cdot 3}{0,025} = 173$$

Parametr oporu masywu jest liczbą niemianowaną i zależną od wytrzymałości górotworu i rośnie z grubością belki H , czyli głębokością eksploatacji. Opór masywu rośnie wraz z grubością belki H oraz ze wzrostem wytrzymałości górotworu co determinuje zasięg wpływów.

W tabelicy 4 zestawiono wyniki obliczeń parametru Op .

Tabela 4

Wyniki obliczeń

H m	R_{rs} MPa	γ_{sr} MPa/m	W_{\max} m	Op_{\max}
200	1,5	0,021	2,0	59
400	2,0	0,022	2,0	95
600	2,5	0,023	2,0	127
800	3,0	0,024	2,0	158
1000	3,5	0,025	2,0	173

6. RÓWNANIE PROFILU NIECKI DYNAMICZNEJ

Z równania (30) wynika, że:

$$\frac{dw}{dt} = g \cdot t_z \rightarrow v_z \quad (40)$$

Uwzględniając funkcję (19) w równaniu (40) dla prędkości chwilowej otrzymamy:

$$\frac{dw}{dt} = V_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi x^2 \cdot \gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}\right]; \quad (41)$$

Ponieważ $x = V_x \cdot t$ stąd:

$$dw = V_x \cdot W_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi x^2 \cdot \gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}\right] dt \quad (42)$$

Całkując równanie (42), wówczas równanie profilu niecki dynamicznej ma postać:

$$w(v) = V_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}\right] dt; \quad (43)$$

6.1. Nachylenie profilu niecki dynamicznej

Nachylenie profilu niecki dynamicznej określa równanie (41) dla $x = V_x \cdot t$ (t - czas trwania eksploatacji na odcinku x)

$$\frac{dw}{dt} = V_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}\right];$$

Maksymalna wartość nachylenia przy uwzględnieniu (40) z równania (41) jest:

$$T_{(v)\max} = \frac{V_{zk}}{V_{xs}} \quad (44)$$

Maksymalna wartość nachylenia w niecce dynamicznej zależy od szybkości końcowej osiadania punktu V_{zk} :

$$V_{zk} = \frac{W_{\max}}{\tau_E} = \frac{W_{\max}}{\frac{2}{V_{xs}} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{\dot{s}r}}}}; \quad (45)$$

$$T_{(v)\max} = \frac{1}{V_{xs}} \cdot \frac{W_{\max}}{\frac{2}{V_{xs}} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{\dot{s}r}}}} = 0,5 W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\dot{s}r}}{H \cdot R_{rs}}}; \quad (46)$$

Nachylenie w niecce dynamicznej jest o połowę mniejsze od nachylenia $T(x)_{\max}$ w niecce ustalonej.

6.2. Krzywizna terenu

Szybkość zmian krzywizny terenu w niecce dynamicznej określa druga pochodna równania (43)

$$k(v) = \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \cdot \partial t} \quad (47)$$

$$K(v) = W_{\max} \frac{v_x^2 \cdot 2\pi \cdot t \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi \cdot v_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right]; \quad (48)$$

Maksymalna wartość krzywizny wystąpi, gdy:

$$v_x \cdot t = 0,4 r \quad (49)$$

Wówczas z równania (48) mamy:

$$K(v) = \frac{W_{\max} \cdot 2\pi \cdot 0,4 \cdot \frac{2r^2}{t_E} \cdot 0,6 \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}};$$

$$K(v) = \frac{W_{\max} \cdot 2\pi \cdot 0,8 \left(\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}\right)^2 \cdot 0,6 \cdot \gamma_{sr}}{\frac{2r}{v_x} H \cdot R_{rs}} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}}$$

$$K(v) = 1,5 \cdot v_x \cdot W_{\max} \cdot \frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \quad (50)$$

6.3. Przemieszczenia poziome

$$u(v) = B \cdot \frac{dw}{dx}$$

$$u(v) = 0,4 \cdot v_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \cdot \exp\left[\frac{-\pi \cdot v_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] t_E \quad (51)$$

Ponieważ:

$$v_x = \frac{2 \cdot r}{t_E}$$

$$u(v) = 0,8 \cdot W_{\max} \cdot \exp \left[\frac{-\pi V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right];$$

Maksymalne przemieszczenie następuje dla $t = 0$ (zatrzymana eksploatacja na czas krótki).

$$u(v) = 0,8 W_{\max}; \quad (52)$$

Przemieszczenia poziome w czasie trwania eksploatacji osiągają podwójne wartości, a po zatrzymaniu eksploatacji na czas dostatecznie długi

$$u(v) = u_{\max} = 0,4 W_{\max}$$

6.4. Odkształcenia poziome

Odkształcenia poziome w czasie trwania eksploatacji określane są z pochodnej przemieszczeń poziomych $u(v)$ (51), a mianowicie:

$$\varepsilon(v) = \frac{du(v)}{dx} \quad (53)$$

$$\varepsilon(v) = \frac{0,4 \cdot W_{\max} \cdot V_x \cdot 2 \cdot \pi \cdot V_x \cdot t \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] t_E;$$

$$\varepsilon(v) = \frac{0,8 \cdot W_{\max} \cdot V_x \cdot \pi \cdot V_x \cdot t \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] t_E;$$

$$\varepsilon(v) = \frac{0,8 W_{\max} \frac{2r}{t_E} \cdot \pi \cdot 0,4 r \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}}$$

$$\cdot \exp \left[\frac{-\pi V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] t_E;$$

$$\varepsilon(v) = 2 W_{\max} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot V_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] \quad (54)$$

Maksymalna wartość odkształceń wystąpi w punkcie $V_x \cdot t = 0,4 r$, stąd:

$$\varepsilon_{(v) \max} = 1,2 \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}}; \quad (55)$$

Odkształcenia poziome w niecce dynamicznej osiągają wartości podwójne.

7. SZYBKOŚĆ FRONTU EKSPLOATACJI V_x

Wyniki obserwacji wykazują, że początkowo ze wzrostem postępu frontu górniczego minimalizują się deformacje, a następnie po przekroczeniu pewnej prędkości V_x dalszemu jego wzrostowi następuje wzrost deformacji.

Korzystając z równania (19) oraz równania (30) można określić średnią wartość postępu szerokiego frontu górniczego dla warunków płaskiego stanu przemieszczeń.

Przyjmując, że:

$$V_{zk} = g \cdot t_z = g \cdot \frac{2r}{V_x}; \quad (56)$$

Z równania (19) mamy:

$$\begin{aligned} \frac{g \cdot \frac{2r}{V_x}}{W_{\max}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{\gamma_{\text{śr}}}} \exp\left[\frac{\pi x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}\right] &= V_{xs} \\ V_{xs}^2 &= \frac{2g \cdot H \cdot R_{\text{rs}}}{W_{\max} \cdot \gamma_{\text{śr}}} \exp\left[\frac{\pi x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}\right]; \\ V_{xs} &= \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot R_{\text{rs}}}{W_{\max} \cdot \gamma_{\text{śr}}} \exp\left[\frac{\pi x^2 \cdot \gamma_{\text{śr}}}{H \cdot R_{\text{rs}}}\right]}; \end{aligned} \quad (57)$$

Maksymalna wartość deformacji jest, gdy front górniczy przesunie się o wielkość $x = V_x \cdot t = 2r$, wówczas maksymalny postęp określa wzór:

t - czas wybrania pokładu na wybieg ściany o długości x

$$\begin{aligned} V_{xs \max} &= \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot R_{\text{rs}}}{W_{\max} \cdot \gamma_{\text{śr}}} \cdot e^{4\pi}}; \\ V_{xs \max} &= 0,0275 \sqrt{\frac{H \cdot R_{\text{rs}}}{W_{\max} \cdot \gamma_{\text{śr}}}}; \quad (\text{m/d}) \end{aligned} \quad (58)$$

Np. dla

$$H = 1000 \text{ m}; \quad W_{\max} = 2 \text{ m}$$

$$\gamma'_{\text{gr}} = 0,025 \text{ MPa/m}, \quad R_{\text{rs}} = 3 \text{ MPa}$$

$$V_{\text{xs max}} = 0,0275 \sqrt{\frac{1000 \cdot 3,0}{2 \cdot 0,025}} = 6,8 \text{ m/d}$$

Z wzoru (57) wynika, że szybkość przesuwania się frontu proetolinowego może być większa dla pokładów cienkich oraz dla systemu z podsadzką hydrauliczną. Prędkość (57) maleje wraz z malejącą głębokością wybierania, zaś rośnie wraz z wzrostem wytrzymałości skał nadległych R_{rs} .

W tabelicy 5 zestawiono wyniki obliczeń za pomocą wzoru (58) dla parametru $a = 0,7$ i $a = 0,15$ przy $m = 2 \text{ m}$, oznaczając:

$V_{\text{xs}(p)} \text{ max}$ - szybkość przy systemie z podsadzką hydrauliczną,

$V_{\text{xs}(z)} \text{ max}$ - szybkość przy systemie z zaważem stropu.

Tabela 5

Wyniki obliczeń

H m	R_{rs} MPa	γ'_{gr} MPa/m	W_{\max}		$V_{\text{xs}(z)}$ m/d	$V_{\text{xs}(p)}$ m/d
			$a = 0,7$	$a = 0,15$		
200	2,0	0,022	2,1	0,45	2,54	5,5
400	2,2	0,023	2,1	0,45	3,75	8,0
600	2,5	0,024	2,1	0,45	4,76	10,5
800	3,0	0,025	2,1	0,45	5,90	12,7
1000	3,5	0,026	2,1	0,45	7,0	15,0

8. WNIOSKI

Z podanych równań i wzorów oraz wyników obliczeń dla założonych własności geomechanicznych i zmiennych pozostałych parametrów wynikają następujące wnioski:

1. Eksploatacja pokładu rozpoczynająca się w punkcie $x = 0$ wywołuje po czasie retardacji określonej wzorem (25) oraz wzorem (26) cofanie się wpływów w kierunku ujemnych wartości osi x układu współrzędnych. Wynika to z tworzenia się brzeżnej części niecki nad krawędzią pokładu od którego rozpoczęto eksploatację.

2. Dalszy postęp frontu górniczego powoduje tworzenie się dynamicznej niecki obniżeniowej którego równanie profilu określone jest wzorem (43). Wzór (46) określający nachylenie profilu niecki dynamicznej wskazuje na to, że jest ono dwa razy mniejsze od nachylenia profilu niecki ustalonej. Krzywizna zaś (48) i (50) nie wykazuje większych wartości od krzywizny w niecce ustalonej. Zaznacza się również podwójna wartość przemieszczeń poziomych (51) i (52).

Podczas eksploatacji niecka dynamiczna charakteryzuje się zwiększeniem wartości odkształceń poziomych (55).

3. Czas osiadania punktu A na powierzchni terenu zależy od własności geomechanicznych skał i głębokości, jak również od oporu masywu skalnego op zalegającego ponad pokładem. Wzór (33), który nie uwzględnia oporu określa najkrótszy czas ruchu punktu podczas wstrząsów masywu skalnego, a wzór (38) i (39) uwzględnia opór masywu ρ , czyli tzw. parametr spowolnienia wpływów eksploatacji.

4. Szybkość posuwu frontu górniczego (57) i (58) określa minimalne i maksymalne wielkości w zależności od parametru kierowania stropem oraz własności geomechanicznych górotworu.

Szybkość $V_{xs \max}$ wzrasta z głębokością eksploatacji i wytrzymałością górotworu a malejąc wraz z wzrostem grubości pokładu.

LITERATURA

- [1] Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu. Wyd. Śląsk 1972.
- [2] Chudek M.: Mechanika górotworu. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 1981.
- [3] Chudek M.: Zachowanie się skał stropowych nad wyrobiskiem ścianowym w świetle badań modelowych. ZN Pol. Śl. s. Górnictwo, z. 30, 1968.
- [4] Chudek M.: Analiza przyczyn obrywania się skał w wyrobiskach wybierkowych, ZN Pol. Śl. s. Górnictwo z. 19; 1964.
- [5] Chudek M.: Wpływ głębokości na stan deformacyjno-naprężeniowy w otoczeniu wyrobisk górniczych. Przegląd Górniczy Nr 5. 1983.
- [6] Chudek M., Stefański L.: Teoretyczne ujęcie eksploatacji złóż na deformację powierzchni przy uwzględnieniu warstwowej budowy górotworu. ZN Pol. Śl., Górnictwo z. 145, 1987.
- [7] Chudek M., Stefański L.: Loads and stress occurring in the vicinity of wall headings remains of ocal seams and barrier pillars in uderground mines. Wyd. PAN Ossolineum 1985.
- [8] Chudek M., Stefański L.: Wpływ obciążeń występujących nad przwstrzeżnię zawałową na zachowanie się górotworu i powierzchni. ZN Pol. Śl. s. Górnictwo z. 134, 1985.
- [9] Chudek M., Iwaszchenko W.: Badania modelowe nad wpływem głębokości na odkształcenia skał i naprężeń w otoczeniu wyrobisk ścianowych. ZN Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 109, 1981.
- [10] Chudek M., Stefański L.: Obciążenia i naprężenia w otoczeniu frontów eksploatacyjnych jako funkcji własności geomechanicznych skał górotworu i głębokości. ZN Pol. Śl. s. Górnictwo, z. 128, 1984.

- [11] Chudek M., Stefański L.: Wpływ górotworu naruszonego eksploatacją na górotwór nienaruszony i powierzchnię. Ochrona Terenów Górniczych Nr 68/2. Rok XVIII, 1984.
- [12] Chudek M., Olszowski W.: A fedii rezgesenek hatasa a fajtesi biztosítószekerkezetre kozetrenge eseten. BANYSZT 111, evfolyam 1978, 10 sz.
- [13] Chudek M., Flisowski A.: Ustalona powierzchnniowa niecka obniżeniowa przy przesuniętej normalnej krzywej wpływów. Ochrona Terenów Górniczych Nr 83, 1988.
- [14] Chudek M., Stefański L.: Eksploatacja zawałowa warstwy odprężającej w górotworze o wysokiej wytrzymałości i jej wpływ na ochronę powierzchni. Przegląd Górniczy Nr 11-12, 1987.
- [15] Chudek M., Stefański L.: Kryteria eksploatacji pod zwartą obudwą oraz system wybierania pokładu uwzględniający minimalizację deformacji górotworu i powierzchni. Przegląd Górniczy Nr 2, 1989.
- [16] Stefański L.: Zasięg promienia filaru ochronnego funkcją parametrów górotworu i ochrony powierzchni. Ochrona Terenów Górniczych WUG, 1983.
- [17] Chudek M., Stefański L.: Wpływ podziemnej eksploatacji na deformację górotworu o warstwowej budowie. Kraków, sesja naukowa, wrzesień 1989, Wyd. AGH, kwartalnik górnictwo, z. 145.
- [18] Chudek M., Stefański L.: Teoretyczne podstawy nowej metody wyznaczania filarów ochronnych dla obiektów powierzchniowych i podziemnych. Ochrona Terenów Górniczych Nr 81/3-82/4, 1987.
- [19] Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed uszkodzeniami górnictwami. Wyd. Śląsk, Katowice 1982.
- [20] Knothe St.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wyd. Śląsk 1984.

ВЛИНИЕ ПОДВИГАНИЯ ФРОНТА ГОРНЫХ РАБОТ
НА СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ МЕСТНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ

Р е з ю м е

В работе выведено уравнение для профиля мульды оседания появляющейся при эксплуатации пласта на глубине H , над которым залегают массив горных пород со значительной средней прочностью на растяжение R_{rs} , причем, величина оседаний и остальных показателей деформации зависит от скорости подвигания прямолинейного фронта горных работ. Таким образом, уравнение профиля динамической мульды имеет вид:

$$W(v) = v_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{ср}}}{H \cdot R_{rs}}} \int_0^{\infty} \exp \left[\frac{-\pi \cdot v_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{\text{ср}}}{H \cdot R_{rs}} \right] dt \quad (43)$$

Наклон профиля динамической мульды

$$T(v)_{\max} = \frac{1}{v_x} \frac{W_{\max}}{\frac{2}{v_x} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{\text{ср}}}}} = 0,5 W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{ср}}}{H \cdot R_{rs}}}$$

Кривизна местности

$$K(v) = 1,5 \cdot V_x \cdot W_{\max} \frac{\gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}} \quad (50)$$

Горизонтальное перемещение

$$U(v) = 0,8 W_{\max} \quad (52)$$

Горизонтальная деформация

$$\epsilon(v)_{\max} = 1,2 \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (55)$$

Выведена также формула для скорости оседания точки под влиянием эксплуатации (рис. 9)

$$V_{zk} = V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\eta \cdot x^2 \cdot \gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}} \right] \quad (19)$$

а также для максимальной скорости оседания точки

$$V_{zk \max} = 0,043 V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (20)$$

для протяженности фронта эксплуатации $x_1 = -\infty$

Представлена зона влияния эксплуатации в динамической мульдe

$$r_d = \frac{V_{xs}}{V_{zk}} \cdot W_{\max} \quad (22)$$

Когда протяженность фронта эксплуатации будет $x_1 \geq 2r$, тогда скорость оседания точки на поверхности определяется по формуле

$$V_{zs} = 0,00035 \cdot V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma'_{\acute{s}r}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (23)$$

Выведены также формулы для:

- времени задержки влияния эксплуатации

$$t_0 = 2t_r = \frac{2W(x)}{V_{zk}}$$

$$W(x) = W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \int_x^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda \quad (10)$$

$$t_0 = \frac{2}{v_{xs}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] \int_x^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] d\lambda \quad (25)$$

для $x = 0$

$$t_{0 \max} = \frac{2}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}} \quad (26)$$

- времени образования полной мульды оседания, которое составляет

$$t_{ob} = \frac{4}{v_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}} \quad (28)$$

- параметра замедления влияния эксплуатации (рис. 11)

$$O_p = \frac{v_x}{v_z} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}}{W_{\max}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] \quad (38)$$

- времени движения точки А (рис. 11)

$$t_z = \frac{v_x}{g} W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] \quad (33)$$

где: g - земное ускорение

- минимального сопротивления горного массива, которое проявляется в месте самой большой деформации, т.е. на краю пласта (для $x = 0$)

$$O_{p \min} = \frac{r}{W_{\max}} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}}{W_{\max}}$$

- средней величины подвигания фронта горных работ

$$V_{xs} = \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot R_{rs}}{W_{\max} \cdot \gamma_{sr}} \exp\left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right]} \quad (57)$$

где:

t_E - время эксплуатации необходимое для образования динамической мулды

- максимальной величины подвигания фронта горных работ, когда фронт переместится на величину

$$X = V_x \cdot t = 2r$$

$$V_{xs \max} = 0,0275 \frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr} \cdot W_{\max}} \quad \text{m/d} \quad (58)$$

где:

V_x - скорость подвигания фронта горных работ

t - время выборки пласта на протяженность лавы длиной x .

В формулах:

R_{rs}, γ_{sr} - средние величины прочности породы в пластах горного массива на растяжение и объемный вес эксплуатируемого пласта от кровли до поверхности.

EFFECTS OF THE PROGRESS OF THE WORKING FRONT UPON THE RATE OF DEFORMATIONS OF THE SURFACE AREA

Summary

The paper provides an equation for the profile of the trough of depression in the course of mining activities in coal seams at the depth H , above which there is a rock massif with an average tensile strength R_{rs} , the value of the depression as well as the value of the remaining factors of deformation depending on the rate of the linear shift of the working front. Thus the equation for the profile of the dynamic trough looks like this:

$$W_{(v)} = V_x \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{-\pi \cdot r_x^2 \cdot t^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] dt \quad (43)$$

The inclination of the profile of the dynamic trough:

$$T_{(v)\max} = \frac{1}{V_{xs}} \frac{W_{\max}}{\frac{2}{r_s} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}} = 0,5 W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (46)$$

The curvature of the surface area:

$$K_{(v)} = 1,5 \cdot V_x \cdot W_{\max} \frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \quad (50)$$

Horizontal displacement:

$$U_{(v)} = 0,8 W_{\max} \quad (52)$$

Horizontal deformations:

$$\varepsilon_{(v)\max} = 1,2 W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (55)$$

Moreover a formula for the rate of subsidence in result of mining activities (fig. 9) has been derived:

$$V_{zk} = V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp\left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}\right] \quad (19)$$

as well as for the maximum rate of subsidence

$$V_{zk \max} = 0,043 V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (20)$$

for the coasting of the working front $X_1 = -\infty$

The range of the influence of mining activities in the dynamic trough has been given:

$$r_d = \frac{V_{xs}}{V_{zk}} \cdot W_{\max} \quad (22)$$

At the coasting of the working front $X_1 \geq 2r$, the rate of subsidence of any point at the surface will be described by the formula

$$V_{zs} = 0,00035 \cdot V_{xs} \cdot W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \quad (23)$$

Moreover, the following formulae have been derived:

- for the delay of the effects of mining activities

$$t_o = 2t_r = \frac{2W(x)}{V_{zk}} \quad (10)$$

$$W(x) = W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \int_x^{\infty} \exp \left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] d\lambda \quad (25)$$

$$t_o = \frac{2}{V_{xs}} \exp \left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] \int_x^{\infty} \exp \left[\frac{-\pi \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] d\lambda \quad (26)$$

if $x = 0$

$$t_{o \max} = \frac{2}{V_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}$$

- for the time of the formation of the full trough of depression (fig.11)

$$t_{ob} = \frac{4}{V_{xs}} \sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}} \quad (38)$$

- for the time of the movement of point A (fig. 11)

$$t_z = \frac{V_x}{g} W_{\max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] \quad (33)$$

where: g - acceleration of gravity

- the minimum resistance of the rock mass occurs at the point of the greatest deformation, i.e. at the edge of the ledge (if $x = 0$)

$$Op_{\min} = \frac{r}{W_{\max}} = \frac{\sqrt{\frac{H \cdot R_{rs}}{\gamma_{sr}}}}{W_{\max}}$$

- for the mean value of the progress of the working front

$$V_{xs} = \sqrt{\frac{2g \cdot H \cdot R_{rs}}{W_{\max} \cdot sr} \exp \left[\frac{\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right]} \quad (57)$$

where:

t_E - time of mining activities indispensable for the formation of a dynamic trough

- the progress of the working front reaches its highest value when the working front is shifted by

$$x = V_x \cdot t = 2r$$

$$V_{xe \max} = 0,0275 \frac{H \cdot R_{rs}}{\sqrt{sr} \cdot W_{\max}} \quad a/d \quad (58)$$

where:

V_x - rate of shift of the working front,

t - time of mining at the coasting of the longwall, having a length of x .