ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: GÓRNICTWO z. 87 Nr kol. 558

Adam KRZYŻOWSKI

WPŁYW PRĘDKOŚCI WYBIERANIA NA ROZKŁAD PRZEMIESZCZEŃ PIONOWYCH, ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ W GÓROTWORZE PRZY CZYNNYM FRONCIE EKSPLOATACJI

Streszczenie. W artykule w oparciu o rozważania analityczne określono rozkład składowej pionowej przemieszczenia, odkształceń poziomych i naprężeń pionowych dla przyjętych warunków brzegowych. Otrzymane wzory, ujmujące w sposób przybliżony warunki geometryczne eksploatacji oraz czas i prędkość postępu frontu ścianowego, były podstawą do przeprowadzenia analizy wpływu prędkości wybierania na rozkład przemieszczeń pionowych i odkształceń na powierzchni terenu oraz naprężeń w stropie pokładu.

1. Wstęp

Problem eksploatacji pokładów węgla zalegających w filtrach ochronnych ma w chwili obecnej dla wielu naszych kopalń duże praktyczne znaczenie z uwagi na wyczerpywanie się zasobów zalegających poza obrębem tych filarów. Jednym z najważniejszych technicznych aspektów tego problemu jest możliwie dokładne przewidywanie wielkości deformacji górotworu i powierzchni terenu wywołanych przez eksploatację filarów ochronnych. Znajomość tych wielkości jest konieczna dla ustalenia optymalnych metod eksploatacji oraz profilaktycznych zabezpieczeń chronionych obiektów przed szkodliwymi wpływami eksploatacji górniczej.

Znajomość rozkładu naprężeń pionowych w górotworze, w sąsiedztwie czynnych frontów ścianowych, ma istotne znaczenie szczególnie przy wybieraniu pokładów zalegających na dużych głębokościach resztek pokładów, jak również w problematyce tąpań.

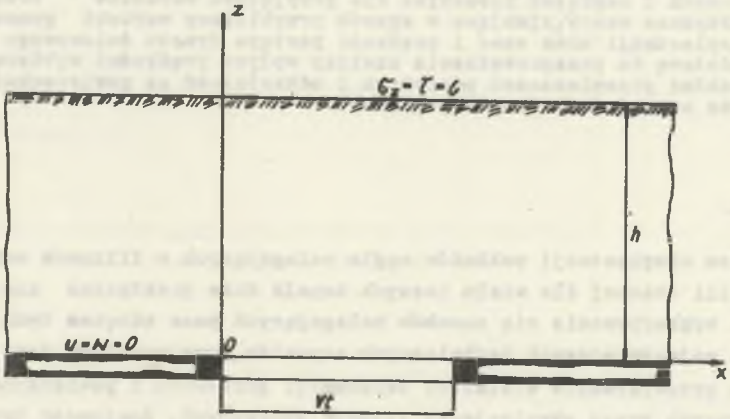
W niniejszym artykule, w oparciu o sposób rozwiązania analitycznego podanego w pracy [6], przeanalizowano wpływ prędkości wybierania na wielkość przemieszczeń pionowych, odkształceń poziomych na powierzchni terenu oraz naprężeń pionowych w sąsiedztwie czynnego frontu ścianowego.

Ponadto przeprowadzono analizę wpływu prędkości wybierania na deformację powierzchni terenu w zależności od głębokości zalegania pokładu.

2. Sformułowanie zagadnienia i metoda jego rozwiązania

W celu określenia rozkładu przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w górotworze nad eksploatowanym pokładem zalegającym na skończonej głębokości h, traktujemy górotwór jako liniowy, nieściśliwy, jednorodny i izotropowy ośrodek reologiczny o modelu "standart". Dla tak przyjętego modelu określono:

- składowe wektora przemieszczenia,
- składowe tensora odkształcenia,
- składowe tensora naprężenia,



Rys. 1

$$\sigma_z(x,h,t) = 0 \qquad (1a)$$

$$\tau(x,h,t) = 0 \qquad (1b)$$

$$u(x,0,t) = 0 \quad \text{dla} \quad -\infty < x < \infty \qquad (1c) \qquad (1)$$

$$W(x,0,t) = \begin{cases} W_0\left[1-e^{-\frac{\beta}{V}(Vt-x)}\right] & \text{dla} \quad 0 < x < Vt \\ 0 & \text{dla} \quad x < 0 \text{ i } x > Vt \end{cases} \qquad (1d)$$

gdzie:

V – stała prędkość eksploatacji

$\beta = \frac{G}{\eta}$ – współczynnik opóźnienia sprężystego

t – czas

w układzie płaskim stanowiącym nieskończona, nie obciążone na brzegu górnym pasmo z przemieszczeniowymi warunkami brzegowymi na dolnym brzegu pasma i naprężeniowymi warunkami na górnym brzegu pasma.

Przyjęto układ współrzędnych o osi x skierowanej wzdłuż stropu poziomo zalegającego pokładu, której początek mieści się w punkcie rozpoczęcia eksploatacji, natomiast oś z skierowana jest pionowo w górę (rys. 1).

Dalej założono, że eksploatacja poziomego pokładu prowadzona jest jednoskrzydłowo systemem ścianowym z podsadzką hydrauliczną o dostatecznie długim froncie eksploatacji, ze stałą w czasie prędkością postępu frontu ścianowego. Powyższy układ opisują formuły (1). Wzór (1d) w obszarze $0 < x < Vt$ na dolnym brzegu pasma odpowiada założeniu, że przy jednoskrzydłowym przesuwaniu się frontu eksploatacji prędkość obniżenia stropu jest proporcjonalna do różnicy między końcową wielkością osiadania a obniżeniem aktualnym oraz, że na granicy rozpoczęcia eksploatacji następuje ścięcie stropu o wielkość równą obniżeniu maksymalnemu W_0 [4].

Na górnym brzegu pasma przyjęto naprężenia pionowe i styczne równe zero. Rozważano górotwór nieważki. Współczynnik β przyjęto równy $\beta = \frac{G}{\eta}$, utożsamiając go ze współczynnikiem opóźnienia sprężystego górotworu [4]. W celu prowadzenia dalszych rozważań wykorzystano podaną przez H. Gila [3] metodę upraszczającą równania opisujące płaski stan odkształcenia w ośrodku sprężysto-lepkim o modelu "standart". Reologiczne równanie stanu dla górotworu o modelu "standart" ma w zapisie tensorowym następującą postać:

$$\sigma_{ij} + n\,\dot{\sigma}_{ij} = 2G\,\varepsilon_{ij} + 2\eta\,\dot{\varepsilon}_{ij}\,, \tag{2}$$

gdzie:

- σ_{ij} – dewiator naprężenia,
- $\dot{\sigma}_{ij}$ – pochodna względem czasu dewiatora naprężenia,
- ε_{ij} – dewiator odkształcenia,
- $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – pochodna względem czasu dewiatora odkształcenia,
- G – moduł sprężystości postaciowej,
- η – współczynnik lepkości,
- n – czas relaksacji,
- i,j,k – współrzędne kartezjańskie.

Rozpisanie powyższego równania w płaskim stanie odkształcenia, wykorzystanie związków geometrycznych Cauchy'ego, równań równowagi i nierozdzielności oraz funkcji naprężeń dla ośrodka reologicznego prowadzi do układu równań, który można rozwiązać w oparciu o transformację całkową Fouriera i przyjęte warunki brzegowe.

Występujące w tych równaniach całki niewłaściwe obliczono w oparciu o teorię funkcji analitycznych wykorzystując głównie podstawowe twierdzenie tej teorii, tj. twierdzenie Cauchy'ego o residuach. Przedstawiony powyżej chronologiczny tok postępowania i sposób obliczeń w sposób ścisły tutaj nie zamieszczono u uwagi na ograniczoną objętość niniejszego artykułu oraz

skomplikowane przeliczenia. Poniżej podano już ostatecznie tylko przykładowo jeden z wyprowadzonych wzorów na odkształcenia poziome ε_x (x,z,t). Pozostałe wzory podane są w pracy [6].

$$\varepsilon_x = \frac{W_o}{h}\Bigg\{aA_o e^{-\frac{\beta}{V}(Vt-x)} + kAk\Big[(1+\frac{k}{a})e^{-(\frac{Vt-x}{h})k} + (1-\frac{k^2}{a^2})e^{-\frac{x}{h}k} -$$

$$-\frac{k}{a}(1-\frac{k}{a})e^{-\beta t-\frac{x}{h}k}\Big] + \sum_{p=1}^{\infty} ZpAp\Big[(1-i\frac{zp}{a})e^{i(\frac{Vt-x}{h})Zp} + (1+\frac{Zp^2}{a^2})e^{i\frac{x}{h}Zp} +$$

$$+\frac{Zp}{a}(i-\frac{Zp}{a})e^{-\beta t+i\frac{x}{h}Zp}\Big]\Bigg\}$$

dla $x \in (0, Vt)$

$$\varepsilon_x = \frac{W_o}{h}\Bigg\{kAk\Big[(\frac{k}{a}-1)e^{-(\frac{x-Vt}{h})k} + (1-\frac{k^2}{a^2})e^{-\frac{x}{h}k} - \frac{k}{a}(1-\frac{k}{a})e^{-\beta t-\frac{x}{h}k}\Big] +$$

$$+\sum_{p=1}^{\infty} ZpAp\Big[(-1-i\frac{Zp}{a})e^{i(\frac{x-Vt}{h})Zp} + (1+\frac{Zp^2}{a^2})e^{i\frac{x}{h}Zp} + \frac{Zp}{a}(i-\frac{Zp}{a})e^{-\beta t+i\frac{x}{h}Zp}\Big]\Bigg\}$$

dla $x \in (Vt, \infty)$

$$\varepsilon_x = \frac{W_o}{h}\Bigg\{kAk\Big[(1+\frac{k}{a})e^{-(\frac{Vt-x}{h})k} - (1-\frac{k^2}{a^2})e^{\frac{x}{h}k} - \frac{k}{a}(1+\frac{k}{a})e^{-\beta t+\frac{x}{h}k}\Big] +$$

$$+\sum_{p=1}^{\infty} ZpAp\Big[(1-i\frac{Zp}{a})e^{i(\frac{Vt-x}{h})Zp} - (1+\frac{Zp^2}{a^2})e^{-i\frac{x}{h}Zp} + \frac{Zp}{a}(i+\frac{Zp}{a})e^{-\beta t-i\frac{x}{h}Zp}\Big]\Bigg\}$$

dla $x \in (-\infty, 0)$,

gdzie:

$$A_a = \frac{\frac{z}{h}a\cos a\cos\Big[(1-\frac{z}{h})a\Big] + (1-\frac{z}{h})a^2\sin(\frac{z}{h}a)}{\cos^2 a - a^2}$$

$$A_k = \frac{\frac{z}{h}\cos k\cos\Big[(1-\frac{z}{h})k\Big] + (1-\frac{z}{h})k\sin(\frac{z}{h}k)}{(1-\frac{k^2}{a^2})(\sin 2k+2k)}$$

$$Ap = \frac{\frac{z}{h}\,\mathrm{ch}zp\,\mathrm{ch}\left[\left(1 - \frac{z}{h}\right)z_p\right] - \left(1 - \frac{z}{h}\right)zp\,\mathrm{sh}\left(\frac{z}{h}\,zp\right)}{\left(1 + \frac{zp^2}{a^2}\right)(\mathrm{sh}2zp + 2zp)}$$

$$a = \frac{\beta h}{V}$$

3. Analiza wpływu prędkości wybierania na rozkład przemieszczeń i odkształceń na powierzchni terenu oraz naprężeń w sąsiedztwie eksploatowanego pokładu

Z uwagi na skomplikowaną postać podanych wzorów dla przeprowadzenia powyższej analizy obliczenia przeprowadzone na maszynie cyfrowej ODRA - 1305 za pomocą specjalnie do tego celu opracowanego programu przyjmując założenie, że $\beta = \frac{G}{\eta} = \frac{1}{n}$ dla następujących przykładowych danych:

$$W_o = 0{,}6 \text{ m}$$

$$V = 100,\ 300 \text{ i } 500 \text{ m/rok}$$

$$VT = 300 \text{ m}$$

$$h = 50,\ 100,\ 150 \text{ m},\ 200 \text{ m}$$

$$z = 1,\ 50,\ 100 \text{ m}$$

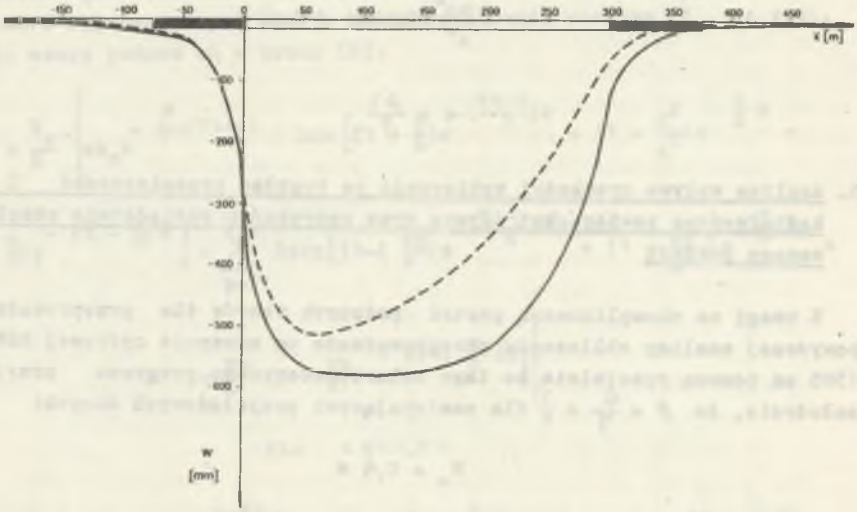
$$\beta = 3.0\ \frac{1}{\text{rok}}$$

$$G = 588600000 \text{ N/m}^2$$

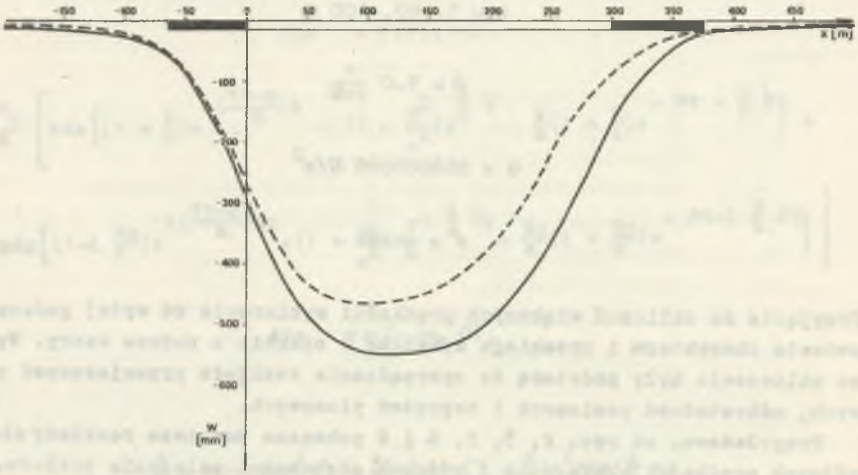
$$n = \frac{1}{3} \text{ rok}$$

Przyjęcie do obliczeń większych prędkości wybierania od wyżej podanych nie zmienia charakteru i przebiegu zjawiska w oparciu o podane wzory. Wykonane obliczenia były podstawą do sporządzenia rozkładu przemieszczeń pionowych, odkształceń poziomych i naprężeń pionowych.

Przykładowo, na rys. 2, 3, 5, 6 i 8 pokazano powyższe rozkłady dla dwóch różnych prędkości wybierania i różnych głębokości zalegania pokładu. Analizując wpływ prędkości wybierania na rozkład przemieszczeń pionowych(rys. 2 i 3) należy stwierdzić, że wzrost prędkości powoduje znaczne zmniejszenie wartości przemieszczeń pionowych, zarówno nad przestrzenią wybraną, jak i nad calizną węglową w sąsiedztwie czynnego frontu ścianowego,

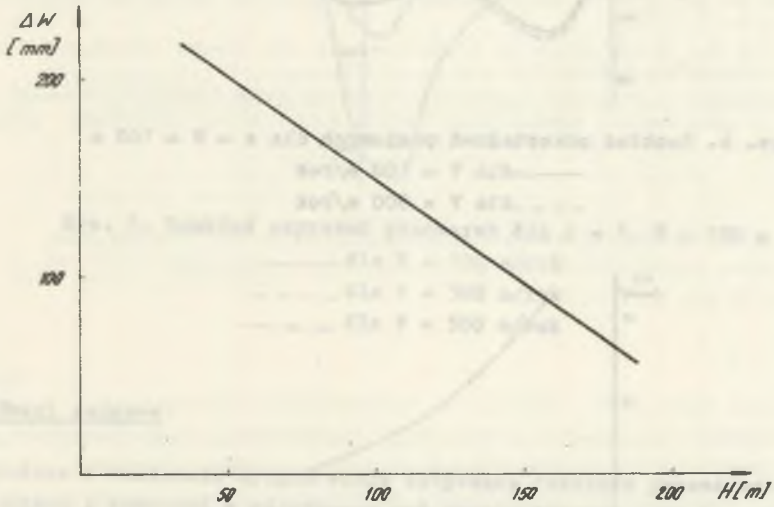


Rys. 2. Rozkład przemieszczeń pionowych dla z = H = 50 m
——— dla V = 100 m/rok
- - - - dla V = 300 m/rok

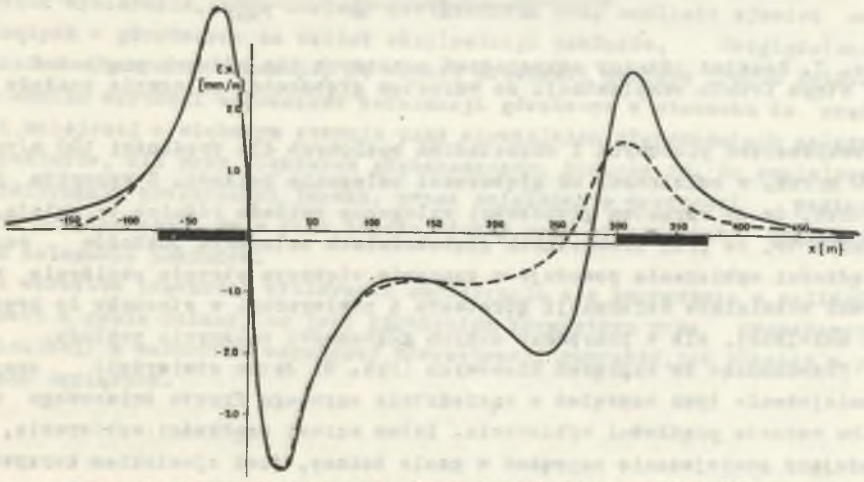


Rys. 3. Rozkład przemieszczeń pionowych dla z = H = 100 m
——— dla V = 100 m/rok
- - - - dla V = 300 m/rok

przy czym ze wzrostem głębokości zalegania pokładu różnica wartości przemieszczeń dla różnych prędkości zmniejsza się. Biorąc pod uwagę odkształcenia poziome (rys. 5 i 6) należy również stwierdzić, że zwiększenie prędkości wybierania powoduje znaczne obniżenie wartości odkształceń w stosunku do mniejszej prędkości postępu frontu ścianowego. Analogicznie jak w przemieszczeniach można stwierdzić, że ze wzrostem głębokości zalegania pokładu różnice wartości odkształceń poziomych maleją dla różnych prędkości wybierania. Dla przykładu na rys. 4 i 7 pokazano maksymalne różnice



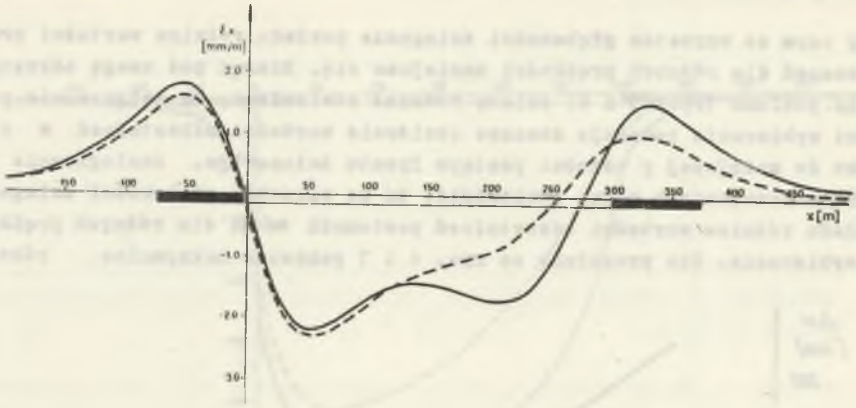
Rys. 4. Rozkład różnicy przemieszczeń pionowych dla różnych prędkości postępu frontu eksploatacji ze wzrostem głębokości zalegania pokładu



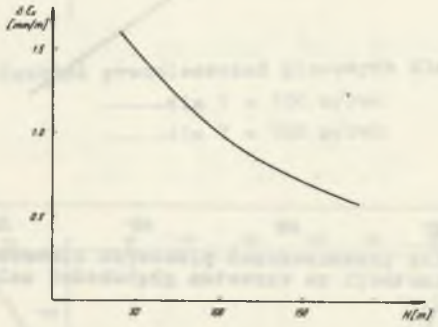
Rys. 5. Rozkład odkształceń poziomych dla z = H = 50 m

——— dla V = 100 m/rok

– – – dla V = 300 m/rok



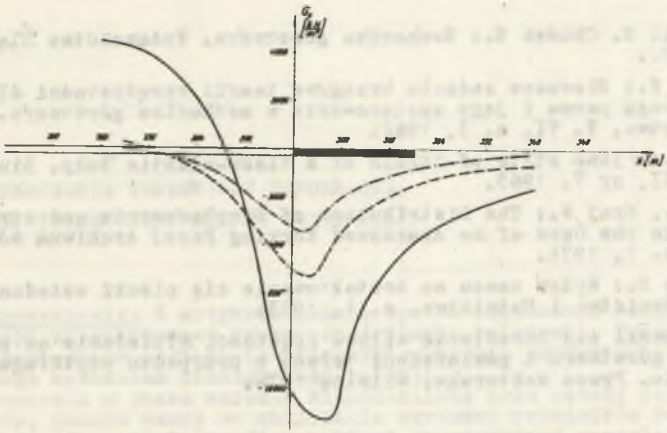
Rys. 6. Rozkład odkształceń poziomych dla z = H = 100 m
———dla V = 100 m/rok
_ _ _ _dla V = 300 m/rok



Rys. 7. Rozkład różnicy odkształceń poziomych dla różnych prędkości postępu frontu eksploatacji ze wzrostem głębokości zalegania pokładu

przemieszczeń pionowych i odkształceń poziomych dla prędkości 100 m/rok i 300 m/rok, w zależności od głębokości zalegania pokładu. Z rysunków tych wynika, że ze wzrostem głębokości zalegania pokładu różnice te maleją. Oznacza to, że przy niewielkich głębokościach zalegania pokładów wzrost prędkości wybierania powoduje w znacznie większym stopniu obniżenie wartości wskaźników deformacji górotworu i powierzchni w stosunku do prędkości mniejszej, niż w przypadku dużych głębokości zalegania pokładu.

Przechodząc do naprężeń pionowych (rys. 8) łatwo stwierdzić znaczne zmniejszenie tych naprężeń w sąsiedztwie czynnego frontu ścianowego w wyniku wzrostu prędkości wybierania. Zatem wzrost prędkości wybierania, powodujący zmniejszanie naprężeń w czole ściany, jest zjawiskiem korzystnym przy prowadzeniu eksploatacji w warunkach wzmożonej koncentracji naprężeń, a przede wszystkim przy prowadzeniu eksploatacji w pokładach tąpiących.



Rys. 8. Rozkład naprężeń pionowych dla z = 1, H = 100 m
——— dla V = 100 m/rok
– – – – dla V = 300 m/rok
.–.–.– dla V = 500 m/rok

4. Uwagi końcowe

Podane w rozdziale drugim wzory dotyczące rozkładu przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w górotworze nad eksploatowanym pokładem, uwzględniające w sposób przybliżony warunki geometryczne eksploatacji oraz czas i prędkość wybierania, mogą znaleźć zastosowanie przy analizie zjawisk zachodzących w górotworze na skutek eksploatacji pokładów. Uwzględnienie prędkości wybierania wskazuje, że wzrost prędkości postępu frontu ścianowego obniża wartości wskaźników deformacji górotworu w stosunku do prędkości mniejszej w większym stopniu przy niewielkich głębokościach zalegania pokładów, niż przy większych głębokościach. Oznacza to, że zmniejszenie deformacji powierzchni terenu, przez zwiększenie prędkości postępu frontu eksploatacji, daje dużo lepsze efekty przy niewielkich głębokościach zalegania pokładów.

Ze wzrostem prędkości wybierania zmniejszają się naprężenia w caliźnie węglowej w czole ściany, co jest zjawiskiem korzystnym przy prowadzeniu eksploatacji w warunkach wzmożonej koncentracji naprężeń, jak również w pokładach tąpiących.

LITERATURA

[1] Borecki M. Chudek M.: Mechanika górotworu. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1972.

[2] Dymek F.: Mieszane zadania brzegowe teorii sprężystości dla nieograniczonego pasma i jego zastosowanie w mechanice górotworu. Archiwum Górnictwa, T. VI, z. 3, 1962.

[3] Gil H.: Plane state of Strain of a Visco-elastie Body. Biuletyn PAN, Vol. XI, nr 7. 1963.

[4] Gil H., Kraj W.: The Distribution of Displacemente and stresses in a Rock in the Case of an Abandoned Working Face. Archiwum Górnictwa, T. XIX, z. 1, 1974.

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

[6] Krzyżowski A.: Określenie wpływu prędkości wybierania na proces deformacji górotworu i powierzchni terenu w przypadku płytkiego zalegania pokładu. Praca doktorska, Gliwice 1976.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЫЕМКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОЧИСТНОМ ФРОНТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р е з ю м е

В статье приводятся, опираясь на аналитические рассуждения, определено распределение вертикальной составляющей перемещения, горизонтальных деформаций и вертикальных напряжений для принятых крайних условий. Полученные формулы взятые в приближённый способ геометрические условия эксплуатации, а также время и скорость подвигания фронта лав составляли основу для проведения анализа влияния скорости выемки на распределение вертикальных перемещений и деформаций на поверхности земли, а также напряжений в кровле пласта.

INFLUENCE OF WORKING RATE ON THE DISTRIBUTION OF VERTICAL DISPLACEMENTS AND OROGEN STRESSES AND STRAINS

S u m m a r y:

Basing on analytical considerations the vertical displacement component distribution, horizontal strain and vertical stress have been determined for assumed edge terms. Formulae have been obtained generalising approximately working geometrical conditions. Wall work rate and time allowed to analyse vertical displacements and surface strains as well as bed roof stress.