



Energia i siły powodowane eksploatacją górnictwem

Energy and forces caused by mining exploitation

*Dr hab. inż. Tomasz Niemiec**

Treść: Liczne teorie opisują deformacje górotworu i powierzchni powodowane eksploatacją górnictwem w postaci tak zwanych wskaźników deformacji. Znając ruch punktu w przestrzeni i czasie, można w prosty sposób wyprowadzić wszystkie te wskaźniki, a przypisując przemieszczającemu się punktowi masę oraz znając jego prędkość – otrzymać można wskaźniki dynamiczne, które opisują siły oddziałujące na zbiór punktów – czyli np. obiekt budowlany. Rozważania zilustrowano przykładami obliczeniowymi. Rysunki przedstawiają używane w praktyce wskaźniki oraz zdefiniowane w niniejszej pracy wskaźniki dynamiczne – związane z występującą siłą w danym punkcie i czasie.

Abstract: Numerous theories describe the rock mass and surface deformations caused by mining exploitation in the form of so-called deformation indicators. Knowing the point motion in space and time, all these indicators can be easily determined. Assuming the mass and knowing the velocity of displacing point, the dynamic indicators that describe the forces acting on the set of points - that is e.g. building object - can be obtained. The considerations are illustrated with computational examples. Drawings show the indicators used in practice and dynamic indicators defined in this paper - related to the force occurring in the determined point and time.

Słowa kluczowe:

eksploatacja górnictwa, deformacje, energia, siły, opis teoretyczny, przykłady

Key words:

mining exploitation, deformations, energy, forces, theoretical description, examples

1. Wprowadzenie

Problem ochrony powierzchni terenu i posadowionych na niej obiektów przed szkodliwym wpływem eksploatacji górnictwa był przyczyną powstania licznych teorii i modeli służących do prognozowania deformacji.

Większość prognoz oparta jest na różnego rodzaju ciągłych funkcjach wpływów wywodzących się z funkcji rozkładu normalnego, jego pochodnych lub ich superpozycji.

Przy wydobywaniu kopaliny, we wnętrzu ziemi (górotworze) tworzona jest pustka poeksploacyjna. Pustka ta nie trwa wiecznie – prędzej czy później zostanie ona zapełniona przez otaczający górotwór; spękane na skutek działalności górnictwa złoża skalne, które można nazwać „rumoszem skalnym”.

Zjawisko to odbywa się w polu potencjalnym – siła grawitacji powoduje „wsypywanie” się rumoszu skalnego do wyeksploatowanej przestrzeni. Przeciwnie do ruchu rumoszu, wyróżnić można ruch pustek – szczelin lub porów – znajdujących się między elementami skalnymi. Ruch ten odbywa się w kierunku ku powierzchni terenu (jak bańki powietrza w akwarium) (rys. 1). Charakter deformacji analizowanej powierzchni w funkcji czasu (w szczególności powierzchni terenu) [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] sugeruje, że docierające do kresu

swej wędrówki pustki mają określone, a nie nieskończone małe wymiary¹.

Model oparty na błędzeniu losowym w przestrzeni [9], gdzie przyjęto określony wymiar wędrującej w górotworze pustki, pozwolił na opis deformowania się górotworu bardziej zgodny z obserwacjami, gdyż obrazuje on proces zarówno dyskretny jak stochastyczny.

Jednak nawet najlepsze prognozy, operujące licznymi wskaźnikami, nie określają jednoznacznie szkodliwości danej eksploatacji na obiekty inżynierskie na powierzchni. Obiekty te ulegają uszkodzeniom na skutek przyłożenia do nich siły, a nie w wyniku wartości rozlicznych wskaźników deformacji.

¹⁾ Wiedza i Życie nr 1, styczeń 2010 str. 31: Tadeusz Figielski: Wielka kariera małej płytki ...kwant światła zostaje pochłonięty przez odpowiedni półprzewodnik, a energia fotonu zostaje zużyta na wyrwanie elektronu z zewnętrznej powłoki elektronowej jednego z atomów tworzących kryształ półprzewodnika. Taki elektron nie opuszcza półprzewodnika, ale w nim pozostaje, stając się nośnikiem ujemnego ładunku elektrycznego, który może swobodnie przemieszczać się po kryształach i przewodzić prąd elektryczny. Uwolniony elektron pozostawia w swoim macierzystym atomie niezajęte miejsce, na które może przeskoczyć elektron z sąsiedniego atomu. W ten sposób to niezajęte miejsce – zwane dziurą elektronową – także może przemieszczać się po kryształach, zachowując się jak nośnik ładunku dodatniego!

*) MPL Katowice sp. z o. o.

2. Energia górotworu poddanego deformacji eksploatacją górnictwem

Niech będzie dany blok górotworu o objętości i wymiarach

$$V = L S H \quad (1)$$

oraz masie

$$m = V \gamma \quad (2)$$

leżący na pokładzie o grubości g_e (grubość eksploatacji – rys. 1),

gdzie γ jest masą właściwą górotworu.

Usuając spod bloku górotworu fragment pokładu o wymiarach

$$L S g_e \quad (3)$$

spowodować można jego osiadanie (wirtualne) o wartości ΔH .

Zmiana energii potencjalnej ΔU takiego bloku jest funkcją jego masy m oraz zmiany wysokości i wynosi [2]

$$\Delta U = m g \Delta H \quad (4)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie.

Ponieważ

$$\Delta H = g_e \quad (5)$$

zmianę energii potencjalnej można zapisać

$$\Delta U = m g_e \quad (6)$$

Przykład obliczeniowy 1

Gdy $L = 800$ m, $S = 200$ m, $H = 400$ m, $g_e = 1$ m, $g = 9,8$ m/s² to: $\Delta U = 800$ m · 200 m · 400 m · 2500 kg/m³ 1 m 9,8 m/s² $\approx 1,6 \cdot 10^{12}$ J

Przykład pokazuje zależność liniową energii potencjalnej wybranego bloku górotworu między innymi od głębokości H .

Praca W wykonana przez siłę przy przemieszczaniu w polu grawitacyjnym punktu materialnego m jest równa zmianie energii kinetycznej tego punktu (przy założeniu zerowego rozproszenia energii w postaci ciepła)

$$W = \Delta K = \Delta U \quad (7)$$

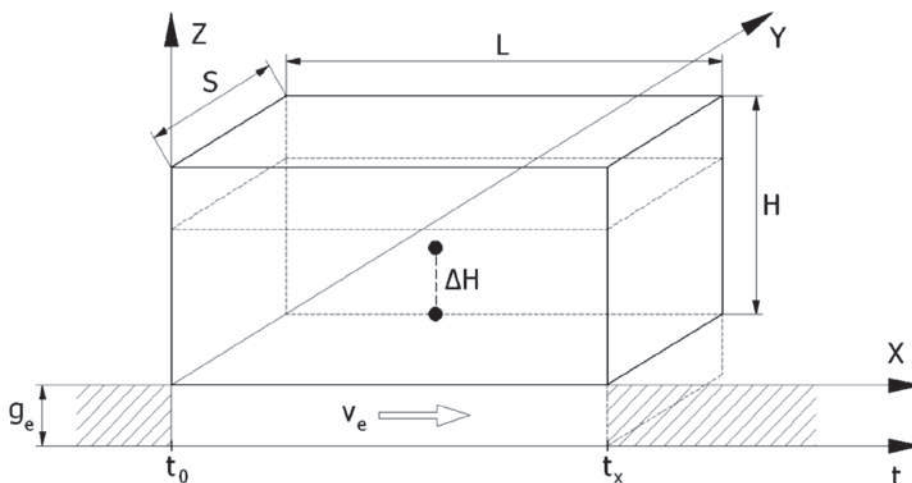
Niech prędkość v przemieszczania się punktu materialnego m – zgodnie z siłą ciężkości – jest funkcją postępu frontu eksploatacyjnego od x_p do x w przedziale czasu (t_0, t_x) (rys. 1)

$$v = \frac{\Delta H}{t_x - t_0} = \frac{g_e}{t_x - t_0} \quad (8)$$

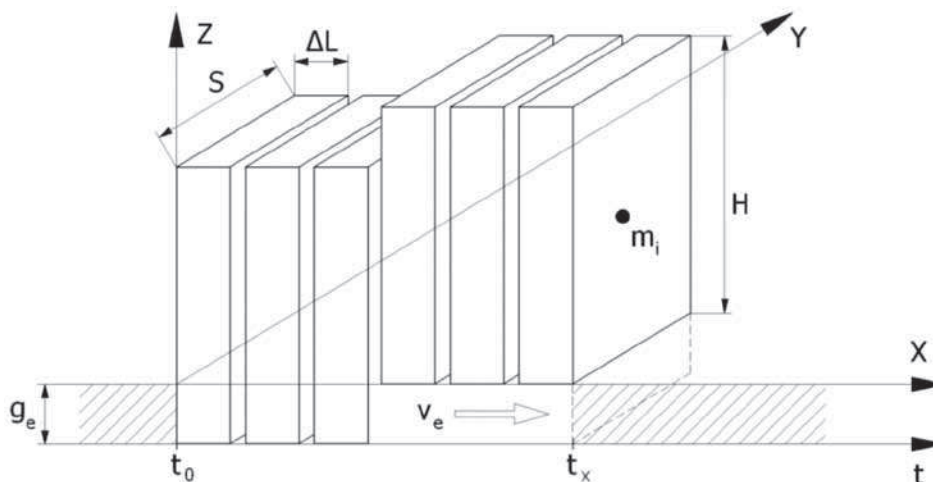
Energię kinetyczną, obliczyć można z poniższej zależności

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (9)$$

gdzie v jest prędkością obniżania bloku V o masie m .



Rys. 1. Wyróżniony blok górotworu
Fig. 1. Specified rock mass block



Rys. 2. Blok górotworu podzielony na fragmenty
Fig. 2. Rock mass block divided into fragments

Jest oczywiste, że eksploatacja podziemna pokładu o grubości g_e na głębokości H z prędkością v_e (od czasu t_0 do t_x) nie powoduje deformacji górotworu przedstawionej na rysunku 1, ani także na rysunku 2, gdzie blok górotworu podzielono na wąskie fragmenty (płyty) o wymiarach $\Delta L \cdot S$, każdy o masie m_i . W obu przykładach ruch punktów jest wyłącznie pionowy.

Bardziej adekwatnym modelem deformacji będzie podział nadległego nad eksploatacją górotworu na rumosz skalny (rys. 3).

W całym procesie deformacji bierze udział n cząstek o wymiarach $\Delta l \Delta s \Delta z$ i masie m_i , a ich przemieszczanie w przestrzeni rozłożyć można na składowe wzdłuż osi układu współrzędnych.

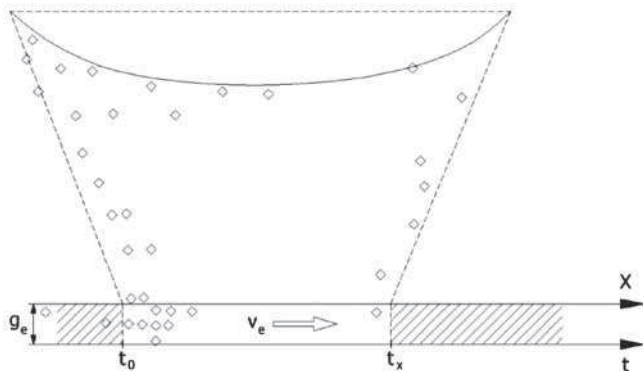
Wobec braku możliwości określenia wymiarów $\Delta l \Delta s \Delta z$ – a tym samym elementarnej masy m_i – zaproponowano następujące rozumowanie:

Niech cała masa górotworu o wymiarach $L \cdot S \cdot H$ i masie m zlokalizowana będzie w części pokładu o wymiarach $L \cdot S \cdot g_e$, czyli w prostopadłościanie o objętości

$$V = L S g_e \quad (10)$$

usytuowanego na głębokości H .

Obniżając strop tego pokładu w zadanym polu LS z poziomu H do $H-g_e$ w przedziale czasu od t_0 do t_x , czyli – zbliżając strop do spągu w sposób właściwy dla eksploatacji górniczej systemem ścianowym – tj: front eksploatacyjny S posuwa się od $x_p(t_0)$ do $x(t_x)$ – można rozważać efekty dynamiczne.



Rys. 3. Górotwór nad eksploatacją jako rumosz skalny. Przeciwnie do ruchu rumoszu wędrują ku powierzchni pustki

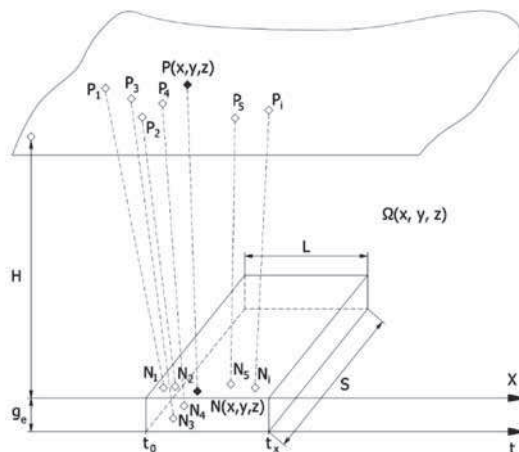
Fig. 3. Rubble as the rock mass above exploitation. Voids migration to the surface oppositely to rubble

Niech proces zbliżania stropu pokładu do spągu w polu potencjalnym (grawitacyjnym) generuje z powierzchni LS stropu pokładu elementarne pustki, które niezależnie od siebie wędrują ku powierzchni. Ich liczba zależy od powierzchni LS i wartości g_e obniżenia stropu. Niech ich łączna masa określona jest zależnością (2).

Czyli – elementarne pustki emitowane są z powierzchni $N(x,y,z)$ poprzez przestrzeń $\Omega(x,y,z)$ ku powierzchni $P(x,y,z)$, która jest jednocześnie kresem ich wędrówki (rys. 4).

Niech punkt $N(x,y,z)$ na stopie pokładu oraz punkt $P(x,y,z)$ na powierzchni terenu łączą następujące relacje:

- 1) Punkty N i P łączyć można w pary na przykład wykorzystując rozkład dwuwymiarowy Gaussa (lub inny przyjmowany w znanych teoriach wpływów eksploatacji) bądź stosując model z błędzeniem losowym [9].
- 2) Liczba elementów n_k , które generuje w przestrzeń powierzchnia N (strop pokładu) jest funkcją iloczynu wymiarów $L \cdot S \cdot g_e$ i przyjętych wymiarów pustki elementarnej.
- 3) Niech każda pustka m_i niesie energię



Rys. 4. Aproxymacja przestrzeni wyeksploatowanej $g_e L S$ i jej oddziaływanie na powierzchnię $P(x,y,z)$

Fig. 4. Approximation of exploited space $g_e L S$ and its impact on the surface $P(x,y,z)$

$$E_i = \frac{\Delta U}{n_k} \quad (11)$$

gdzie n_k jest liczbą pustek w prostopadłościanie $L \cdot S \cdot g_e$.

Energię całkowitą układu dla postępu frontu eksploatacyjnego x (w czasie t_x) określa bilans (pominięto energię cieplną)

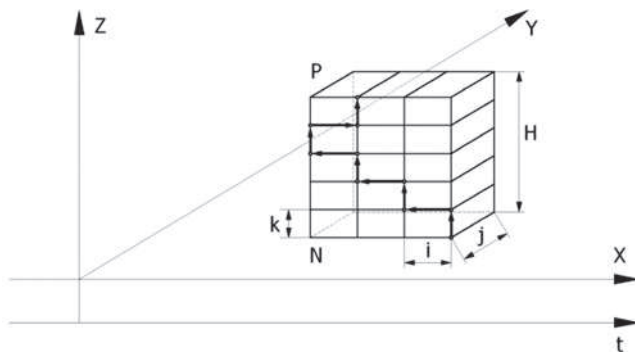
$$E_{ctx} = \sum_i E_{ki} + \sum_i E_{pi} \quad (12)$$

gdzie :

- E_{ki} – energia kinetyczna i – tej pustki,
 - E_{pi} – energia potencjalna i – tej pustki,
- Dla czasu t_0 wzór (12) przyjmuje postać

$$E_{ct0} = \sum_n E_{pi} \quad (13)$$

Zamiast rozpatrywać relacje zachodzące między nieskończoną liczbą punktów powierzchni N i nieskończoną liczbą punktów powierzchni P – poprzez przestrzeń Ω – można rozpatrywać losową wędrówkę skończonej liczby pustek pomiędzy węzłami ortogonalnej sieci przestrzennej (rys. 5) [9].



Rys. 5. Węzły ortogonalnej sieci przestrzennej – przykład błędzenia losowego i wędrówki elementu od N do P

Fig. 5. Nodes of orthogonal lattice – the example of random walks and element migrations from N to P

Węzły tej sieci określone zostały poprzez przyjęte rozmiary oczka i, j, k poszczególnych osi x, y, z .

Przyjmując konkretne wymiary, można modelować na przykład relacje zachodzące podczas eksploatacji górniczej.

Niech: $i=j=k$, a wymiar pustki jest równy κ ;
to ich liczba n_κ w węźle na stopie N pokładu jest funkcją wymiaru koraz g_e i wyniesie

$$n_\kappa = g_e / \kappa \quad (14)$$

Natomiast energia potencjalna DU słupa górotworu o wysokości H , uwolniona po wyemitowaniu n pustek zawartych w objętości $i \times j \times g_e$ (czyli poniżej stropu pokładu aż do jego spagu) wynosi

$$\Delta U = i j H \gamma g_e \quad (15)$$

Stąd energia potencjalna E_κ pojedynczej pustki kma wartość

$$E_\kappa = i j H g \gamma g_e / n_\kappa \quad (16)$$

gdzie:

i, j, H , m
 g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2
 γ – gęstość górotworu, kg/m^3
 g_e – obniżenie stropu (na skutek eksploatacji), m
Energia jednostkowa pustki κ (odnoszona do jednostki powierzchni – na przykład do $ij=1 m^2$)

$$E_j = H g \gamma g_e / n_\kappa \quad (17)$$

Przykład obliczeniowy 2

$$\Delta U = 10 m \cdot 10 m \cdot 400 m \cdot 2500 kg/m^3 \cdot 9,8 m/s^2 \cdot 1 m = 9,8 \cdot 10^8 J$$

Przykład obliczeniowy 3

Energia jaką można przyporządkować pojedynczej pustce zależna jest od wymiarów siatki $i=j=10 m$, głębokości $H=400 m$, gęstości górotworu $\gamma=2500 kg/m^3$, przyspieszenia ziemskiego $g=9,8 m/s^2$, wartości $g_e=1 m$ oraz przyjętego wymiaru elementarnej pustki; np., gdy $\kappa=1 mm$, to pojedyncza pustka będzie miała (w przyjętym modelu) energię

$$U_\kappa = \Delta U / n = 9,8 \cdot 10^5 J \quad (18)$$

2.1. Moc w węźle układu

Niech do punktu A_i leżącego na powierzchni $P(x,y)$ przybywają kolejno pustki w odstępach czasowych Δt . Moc uzyskiwaną w punkcie A_i – a ściślej, przechodzącą przez ten punkt – określa poniższa zależność

$$M_\kappa = U_\kappa / \Delta t \quad (19)$$

Przykład obliczeniowy 4

Przyjmując $\Delta t = 24$ godziny = 86400 s, można obliczyć moc, jaką posiada zdefiniowany układ zasilany pojedynczą pustką kw odstępnie doby (dane z przykładu 3):

$$M_\kappa = 9,8 \cdot 10^5 J/\text{doba}, \text{ czyli:}$$

$$M_\kappa = 9,8 \cdot 10^5 J/86400 s = 11,34 W$$

2.2. Siła w węźle układu

Mając określoną moc M_κ układu oraz prędkość ruchu v_g pustki przybywającej do punktu $A, (B, C, \dots)$ powierzchni $P(x,y)$, można określić siłę, z jaką działa pojedyncza pustka na rozpatrywany punkt

$$F = M_\kappa / v_g \quad (20)$$

Przykład obliczeniowy 5

Uzupełniając dane z powyższego przykładu o prędkość pustki przybywającej do punktu A równą np. $v_g = 12 m/\text{doba}$ - obliczyć można siłę powodowaną przez tę pustkę:

$$F = 9,8 \cdot 10^5 J/\text{doba} / 12 m/\text{doba} = 81,666 kN \approx 8,2 \text{ Ton}$$

Natomiast dla innej prędkości np. $v_g = 120 m/\text{doba}$, siła ta wyniesie: $F = 8,1666 kN \approx 0,82 T$

2.3. Siła, jako funkcja energii i przemieszczenia

Mając określoną energię to jest pracę wykonaną przez pojedynczą pustkę, można zapisać zależność pomiędzy energią, siłą i przemieszczeniem.

$$U_\kappa = F s \quad (21)$$

Przykład obliczeniowy 6

Z jaką siłą oddziałuje pojedyncza pustka ko energii $E_\kappa = 9,8 \cdot 10^5 J$ przemieszczając punkt A na odległość s ?

Na przykład, gdy $s = 0,02 m$;

To dodatkowa siła w punkcie A wynosi

$$F = 9,8 \cdot 10^5 J / 0,02 m = 2,45 \cdot 10^7 N = 4,9 \cdot 10^4 kN = 4,9 \cdot 10^3 kG \approx 5 T$$

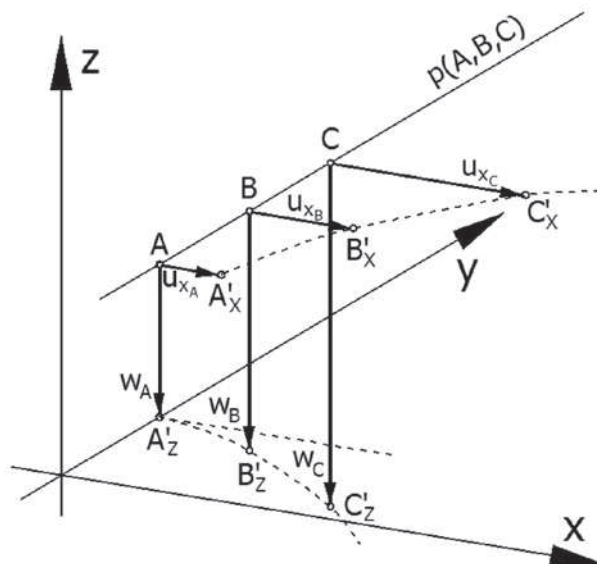
albo, gdy $s = 2 m$, to wynosi ona:

$$F = 9,8 \cdot 10^5 J / 2 m = 4,9 \cdot 10^5 N = 4,9 \cdot 10^2 kN \approx 500 kG$$

Określenie wartości siły z zależności (20) jest możliwe jedynie wówczas, gdy jest znana droga s .

2.4. Energia i moc w dyskretnym modelu deformacji

Ruch punktów A, B, C, \dots w przestrzeni pod wpływem eksploatacji górniczej poglądowo ilustruje rysunek 6. Trajektorie ruchu rozłożyć można na składowe oznaczane przez w, u, v , lub zwyczajowo (jak na rys. 6) przez w, u_x, u_y (dla przejrzystości rysunku przyjęto $u_y = 0$).



Rys. 6. Deformacja prostej p – punkty A, B, C podlegają zróżnicowanym przemieszczeniom o składowych w_A, u_{xA}, \dots (dla przejrzystości rysunku przyjęto $u_y = 0$)

Fig. 6. Deformation of the straight line p – points A, B, C are subjected to different displacements of the components w_A, u_{xA} (for draw clarity it was assumed $u_y = 0$)

Ponieważ wszystkie wskaźniki deformacji określone są zależnościami zmiennymi w czasie, ich prędkości łatwo zdefiniować. Kluczowe w dalszym rozumowaniu będą składowe prędkości (obniżania, poziomego przesunięcia wzdłuż osi x , poziomego przesunięcia wzdłuż osi y) węzła o współrzędnych x, y, z w funkcji czasu t_i .

Gdy energia $E_{\kappa \text{ pustki}}$ kma wartość według zależności (17) oraz przemieszcza się ze znanymi składowymi prędkościami, można przyjąć że:

- przyrost mocy w węźle wzdłuż osi z w czasie t_i

$$P_z(x, y, z, t_i) = \dot{w}(x, y, z, t_i) E_\kappa \quad (22)$$
- przyrost mocy w węźle wzdłuż osi x w przedziale czasowym $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

$$Px(x, y, z, t_i) = \dot{u}(x, y, z, t_i)E_\kappa \quad (23)$$

- przyrost mocy w węźle wzdłuż osi y w przedziale czasowym $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

$$Py(x, y, z, t_i) = \dot{v}(x, y, z, t_i)E_\kappa \quad (24)$$

Z inżynierskiego punktu widzenia, interesującym staje się zagadnienie wpływu modelowanego procesu na obiekt posadowiony w przestrzeni zdarzeń Ω . Obiektem tym niech będzie budowla o wymiarach $s \cdot l \cdot f$ (szerokość, długość, głębokość fundamentowania) posadowiona tuż pod powierzchnią P.

W dalszym rozumowaniu przyjęto, że głębokość fundamentowania ma wymiar jednostkowy ($f=1, m$).

2.5. Siły powodowane eksploatacją górnictw

2.5.1. Siły poziome

Na rysunku 7a i 7b, pokazano punkt B – centrum kwadratu ($l \times l = l^2$) w rzucie na płaszczyznę poziomą, którego boki zorientowane są równoległe i prostopadłe do prostej p(A,B,C...).

- Na boki kwadratu oddziałują siły w następujący sposób:
- siła pozioma równoległa do prostej p(A, B, C...) działająca w chwili t_i na bok kwadratu o wymiarze l

$$\vec{F}_x^S(x, y, z, t_i) = \frac{Px(x, y, z, t_i) \cdot l}{v_g} = \frac{\dot{u}(x, y, z, t_i)E_\kappa \cdot l}{v_g} \quad (25)$$

- siła pozioma prostopadła do prostej p(A,B,C...) działająca na bok kwadratu o wymiarze l

$$\vec{F}_y^N(x, y, z, t_i) = \frac{Py(x, y, z, t_i) \cdot l}{v_g} = \frac{\dot{v}(x, y, z, t_i)E_\kappa \cdot l}{v_g} \quad (26)$$

- moment poziomy sił względem odcinka A, B, C (rys. 7a, 7b)

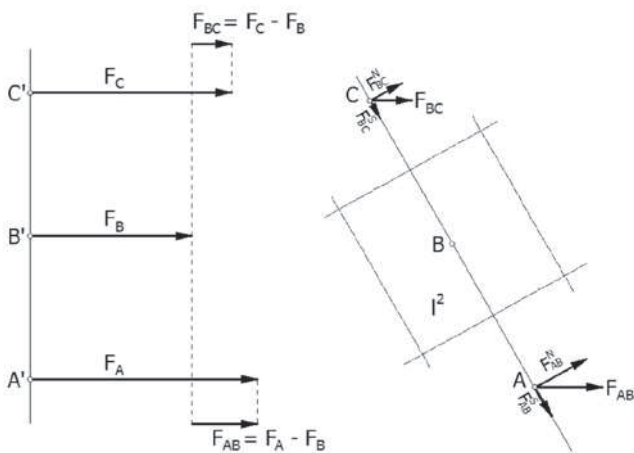
$$M\vec{F}^N_{AC} = \vec{F}^N_{AB} \cdot l_{AB} + \vec{F}^N_{BC} \cdot l_{BC} \quad (27)$$

- różnica sił poziomych działających na bok l kwadratu (Rys. 7a, 7b) wzdłuż odcinka A, B, C – czyli **siła odkształcenia poziomego**, gdy $l \rightarrow 0$

$$\vec{\varepsilon}^S_{AC} = \frac{\vec{F}^S_{AB} - \vec{F}^S_{BC}}{l_{AB} + l_{BC}} \quad (28)$$

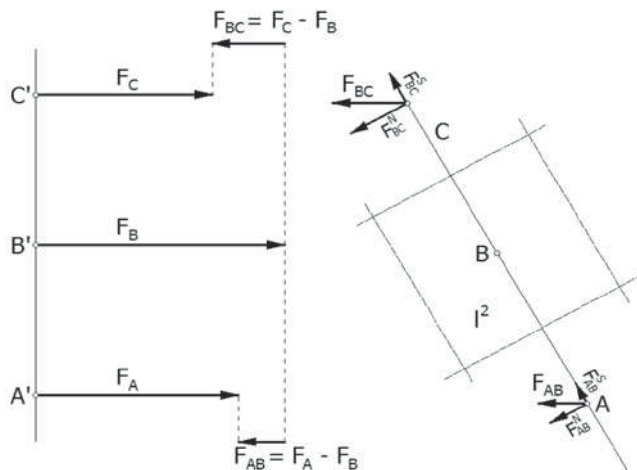
gdzie:

- \vec{F}^N_{AB} – siła normalna do odcinka AB,
- \vec{F}^S_{AB} – siła styczna wzdłuż odcinka AB,
- l_{AB}, l_{BC} – moduły linii obliczeniowej A,B,C...
- l^2 – utożsamiać można z fundamentem budowli.



Rys. 7a. Zróżnicowane i zmienne siły poziome przyłożone do punktów A-B-C leżących na prostej, wywołują na bokach kwadratu l^2 odkształcenia i momenty sił

Fig. 7a. Varied and variable horizontal forces applied to the points A-B-C lying on the straight line causing strains and forces moments on the square sides l^2



Rys. 7b. Zróżnicowane i zmienne siły poziome przyłożone do punktów A-B-C leżących na prostej, wywołują na bokach kwadratu l^2 odkształcenia i momenty sił

Fig. 7b. Varied and variable horizontal forces applied to the points A-B-C lying on the straight line causing strains and forces moments on the square sides l^2

2.5.2. Siły pionowe

Przez analogię do zależności (27), można zapisać:

- moment pionowy sił względem odcinka A,B,C (rys. 7a, 7b):

$$M\vec{F}^W_{AC} = \vec{F}^W_{AB} \cdot l_{AB} + \vec{F}^W_{BC} \cdot l_{BC} \quad (29)$$

gdzie:

- \vec{F}^W_{AB} – siła pionowa normalna do odcinka AB,
- l_{AB}, l_{BC} – moduły linii obliczeniowej A,B,C...
- oraz

$$\vec{F}^W_{AB} = \vec{F}^W_z(x, y, z, t_i) = \frac{Pz(x, y, z, t_i) \cdot l}{v_g} = \frac{\dot{w}(x, y, z, t_i)E_\kappa \cdot l}{v_g} \quad (30)$$

3. Przykłady obliczeniowe

Jak wpływać będzie na obiekt na powierzchni eksploatacja pokładu o grubości $g_e=2$ m i wymiarach: wybieg ściany $L=800$ m i jej długość $S=240$ m, prowadzona na głębokości $H=400$ m z prędkościami postępu frontu $v_e=4$ m/d oraz $v_e=8$ m/d natomiast prędkość przejścia wpływów przez górotwór $v_g=100$ m/d. Parametry czasu przyjęto odpowiednio: $c=0.01/d$ i $c=0.1/d$.

Dla dużej wartości parametru czasu (np. $c=0,1/d$) rozkłady zmienności wskaźników osiągają wartości ekstremalne. Przeciwnie – dla mniejszych wartości parametru czasu (np. $c=0,01/d$) – wartości niektórych wskaźników są wyraźnie mniejsze. W tym drugim przypadku, proces deformowania górotworu trwa dłużej (górotwór z pamięcią) i niektóre wskaźniki, zwłaszcza te, które są sumą przeciwstawnych przemieszczeń, osiągają mniejsze wartości (rys. 8).

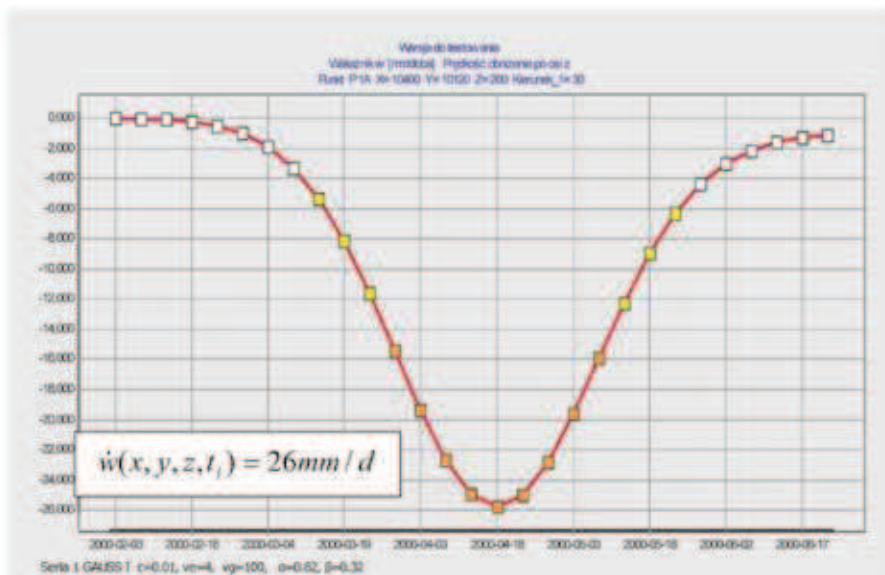
Prędkość przemieszczania się frontu eksploatacyjnego v_e w istotny sposób wpływa na rozkłady wartości niektórych wskaźników; szczególnie widoczne to jest dla wskaźników pochodnych po czasie (np. $\dot{w}, \dot{u}_1, \dot{u}_2$).

Dla wskaźników dynamicznych jak: **1) moment poziomy sił** względem odcinka (27), **2) moment pionowy sił** (29), **3) siła odkształcenia poziomego** (28) – parametry modelu; H, v_e a w szczególności v_e – w sposób istotny wpływają na rozkłady ich wartości w funkcji czasu (rys. 9 ÷ 11).

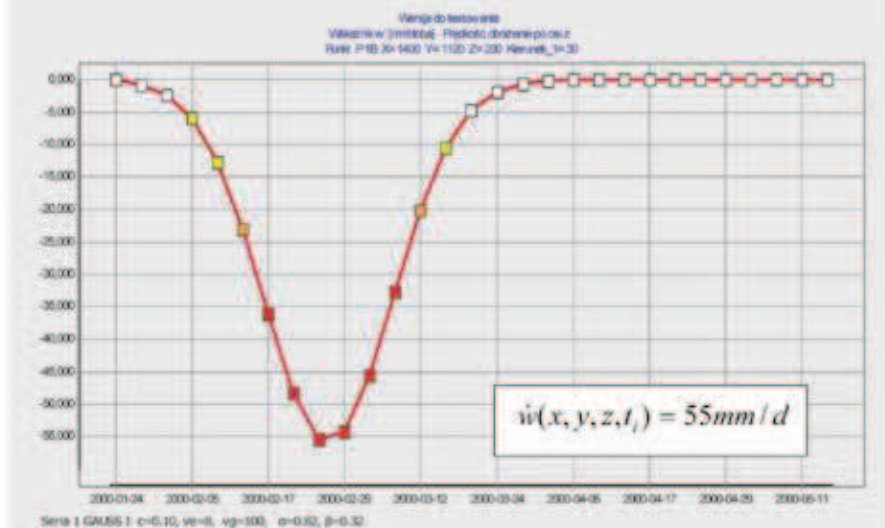
4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony w licznych publikacjach autora dyskretny i stochastyczny model propagacji wpływów, charakteryzujący następujące cechy:

1. Niech będzie dana w górotworze elementarna i już bardziej niepodzielna pustka poeksploacyjna. Zapelnianie tej pustki przez otaczający ją nieciągły, dyskretny górotwór, utożsamiać można z ruchem pustki w górotworze.
1. Zjawisko to odbywa się w polu potencjalnym – siła grawitacji powoduje „wsypywanie” się rumoszu skalnego do wyeksploatowanej przestrzeni. Przeciwnie do ruchu rumoszu, wyróżnić można ruch pustek – szczelin lub porów – znajdujących się między elementami skalnymi.
2. Niech zbiór pustek leży na powierzchni $N(x,y,z)$ w przestrzeni zdarzeń $\Omega(x,y,z)$ i może być ograniczony.
3. Niech powierzchnia $N(x,y,z)$ (nadajniki) ma zdolność emisji pustek w przestrzeń $\Omega(x,y,z)$ po spełnieniu warunków początkujących tę emisję, czyli podczas dokonywania eksploatacji górniczej.
4. Emisja ta może być jednoczesna w określonych podzbiórach (np. dzienny postęp).
5. Zmianą intensywności emisji w czasie pustek z poszczególnych podzbiorów niech rządzi równanie wzrostu Mitscherlicha.
6. Prędkość v_e rozprzestrzeniania się początków emisji poszczególnych podzbiorów jest określona w pewnym wybranym kierunku (postęp frontu eksploacyjnego).
7. W przestrzeni $\Omega(x,y,z)$ wyróżnić można zbiór odbiorników $P(x,y,z)$ – w szczególności powierzchnię terenu.
8. Dystans od nadajnika N do odbiornika P elementy pokonują w skończonym czasokresie Δt , czyli z prędkością v_g (prędkość przejścia wpływów przez górotwór).
9. Elementarna pustka, która dotarła do odbiornika P z określonego kierunku, powoduje jego przesunięcie o jej wymiar $-k$.
10. Elementarnej pustce przyporządkować można określoną energię.
11. Podano definicje wskaźników dynamicznych w funkcji czasu (rysunki od 9 do 11); **momenty sił poziomych i pionowych oraz siłę odkształceń poziomych w wybranym kierunku.**
Opierając się na dyskretnym modelu górotworu i powierzchni oraz ich deformacji powodowanych eksploatacją



Dla parametrów: $c=0.1/d$, $v_e=4m/d$, $v_g=100m/d$ określono 1 ekstremum prędkości obniżania punktu



Dla parametrów: $c=0.1/d$, $v_e=8m/d$, $v_g=100m/d$ określono 1 ekstremum prędkości obniżania punktu

Rys. 8. Prędkości obniżania punktu w funkcji czasu dla różnych parametrów czasu i prędkości eksploatacji

Fig. 8. Velocities of point subsidence in relation to time for different time parameters and exploitation velocities

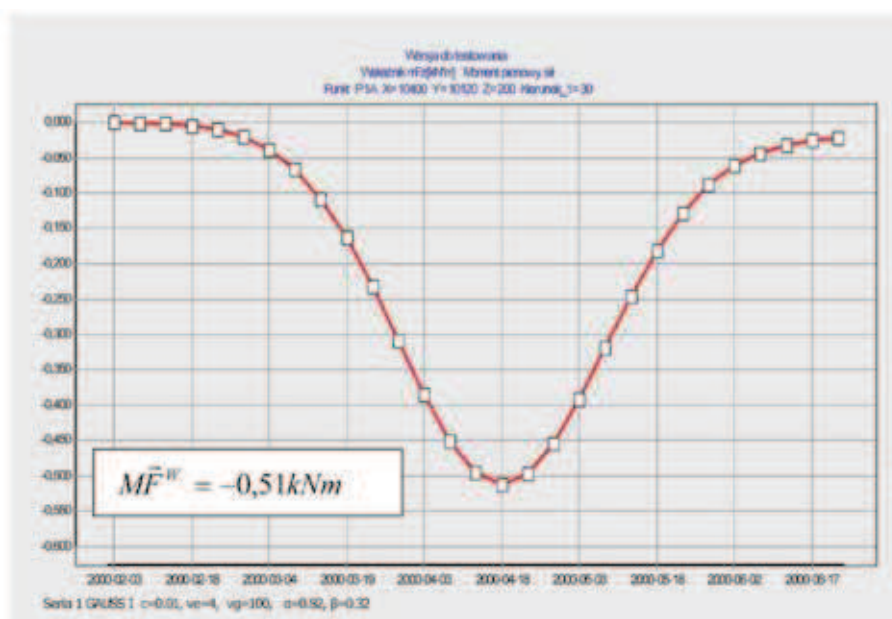
górnictwem - określono ruch punktu w przestrzeni w funkcji czasu w sposób kinetyczny oraz - przypisując punktowi masę - w sposób dynamiczny, gdzie występują siły i relacje między nimi.

Rozważania zilustrowano przykładami obliczeniowymi. Rysunki przedstawiają używane w praktyce wskaźniki oraz zdefiniowane w pracy wskaźniki dynamiczne, związane z występującą siłą w danym punkcie i czasie.

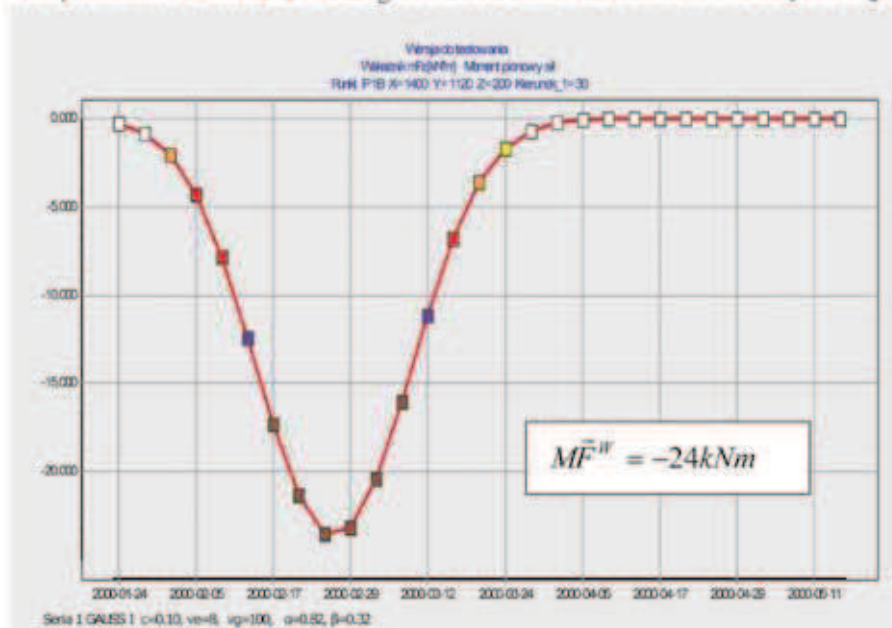
Wartości dynamicznych wskaźników deformacji najlepiej byłoby zweryfikować pomiarami różnych, rzeczywistych przypadków. Jednak wobec braku takich porównań, można używać przedstawiony model deformacji w sposób względny - czyli jak wpływać będą zmienne jego parametry (H, v_e, v_g, c) na rozkłady wskaźników. W razie potrzeby ochrony obiektów powierzchniowych, można minimalizować wartości wskaźników dynamicznych prędkością postępu frontu eksploatacyjnego v_e .

Z analizy przebiegów wskaźników sformułować można następujące wnioski:

1. Dla dużej wartości parametru czasu (np. $c=0,1/d$), rozkłady zmienności wskaźników osiągają wartości ekstremalne. Przeciwnie - dla mniejszych wartości parametru czasu (np. $c=0,01/d$) - wartości niektórych wskaźników są mniejsze.
1. Prędkość przemieszczania się frontu eksploatacyjnego v_e w istotny sposób wpływa na rozkłady wartości niektórych wskaźników, co szczególnie widoczne jest dla wskaźników, które są pochodnymi po czasie (np. $\dot{w}, \ddot{u}_1, \ddot{u}_2$).
2. Dla wskaźników dynamicznych (moment poziomy sił $M\bar{F}^N$, moment pionowy sił - $M\bar{F}^W$, siła odkształcenia poziomego - $\bar{\epsilon}^S$) - także inne parametry (H, v_e, v_g) wpływają na rozkłady ich wartości w funkcji czasu.
3. Omówione wskaźniki dynamiczne mają jedno, dwa lub trzy ekstrema. Na ich wartości w sposób wyraźny wpływają przyjęte wartości parametrów.



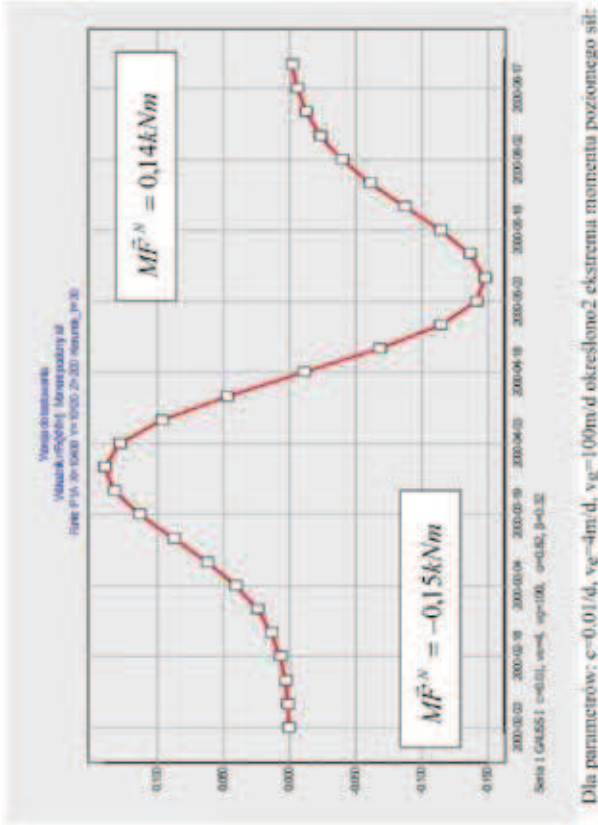
Dla parametrów: $c=0.01/d, v_e=4m/d, v_g=100m/d$ określono 1 ekstremum momentu pionowego sił



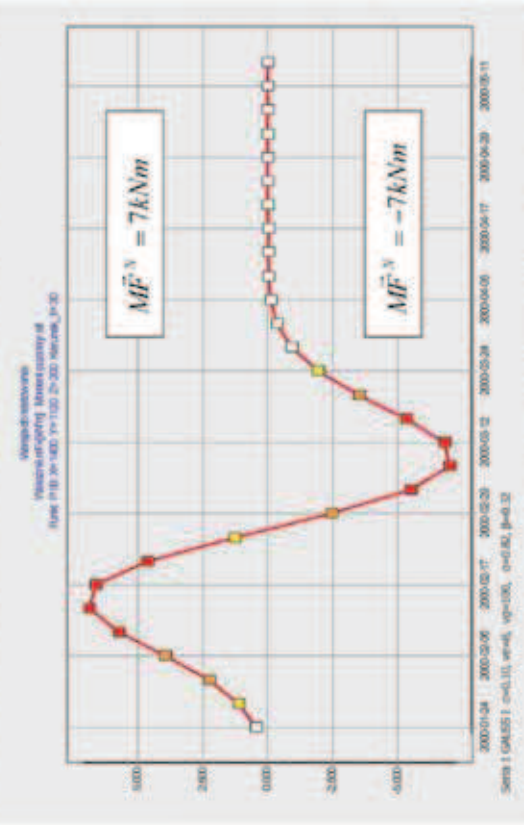
Dla parametrów: $c=0.1/d, v_e=8m/d, v_g=100m/d$ określono 1 ekstremum momentu pionowego sił

Rys. 9. Rozkłady momentów sił pionowych dla różnych parametrów czasu i prędkości eksploatacji

Fig. 9. Distributions of vertical forces moments for various parameters of time and exploitation velocities

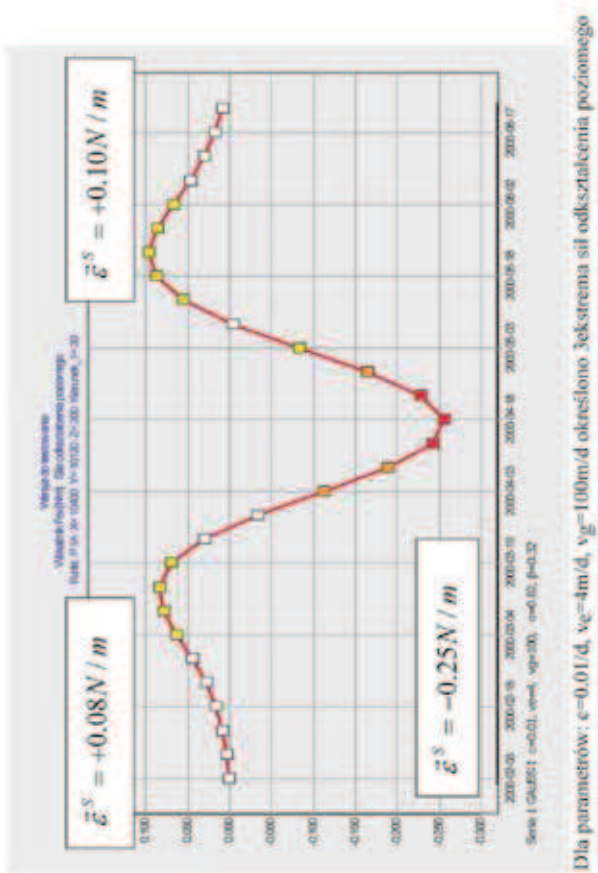


Dla parametrów: $\epsilon=0,01/d$, $v_e=4m/d$, $v_g=100m/d$ określono 2 ekstremum momentu poziomego sił:

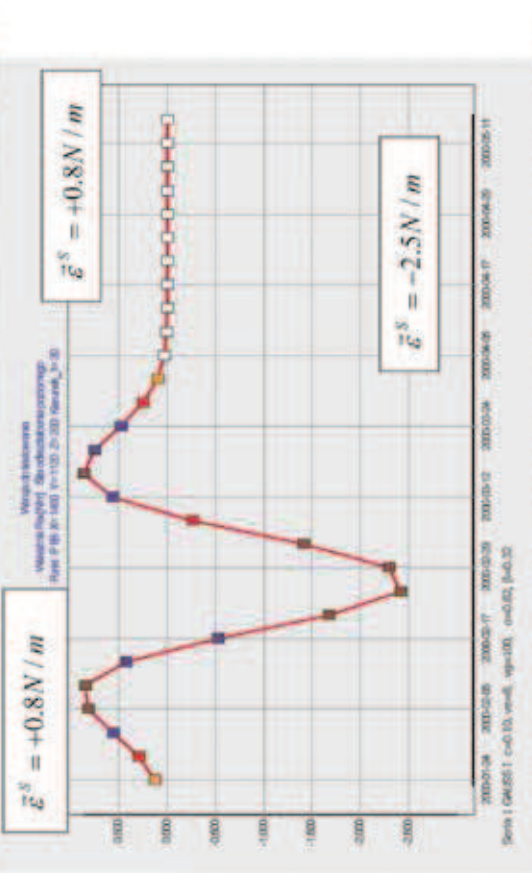


Dla parametrów: $\epsilon=0,1/d$, $v_e=8m/d$, $v_g=100m/d$ określono 2 ekstremum momentu poziomego sił

Rys. 10. Rozkłady momentów sił poziomych dla różnych parametrów czasu i prędkości eksploatacji
Fig. 10. Distributions of horizontal forces moments for various parameters of time and exploitation velocities



Dla parametrów: $\epsilon=0,01/d$, $v_e=4m/d$, $v_g=100m/d$ określono 3 ekstremum sił odkształcenia poziomego



Dla parametrów: $\epsilon=0,1/d$, $v_e=8m/d$, $v_g=100m/d$ określono 3 ekstremum sił odkształcenia poziomego

Rys. 11. Rozkłady sił odkształcenia poziomego dla różnych parametrów czasu i prędkości eksploatacji
Fig. 11. Distributions of horizontal strain for various parameters of time and exploitation velocities

Literatura

1. *Batkiewicz W.*: Odchylenia standardowe poeksploatacyjnych deformacji górotworu. PAN Oddział w Krakowie Geodezja 10, Kraków 1971
2. *Frisz S., Timoriewa A.*: Kurs fizyki tom I. Warszawa PWN 1962
3. *Kowalski A.*: Nieustalone górnicze deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz. Prace Naukowe GIG No 871, Katowice 2007
4. *Knothe St.*: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wydawnictwo „Śląsk” 1984
5. *Litwiniszyn J.*: Przemieszczenia górotworu w świetle teorii prawdopodobieństwa. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. II, z. 1, 1954
6. *Niemiec T., Radola W.*: Kwantowy model opóźniający i jego zastosowanie do opisywania osiadania w czasie punktu powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji górniczej. Ochrona Terenów Górniczych nr 56, 1981
7. *Niemiec T.*: A Discrete, Random Function of Influence in a Quantum Model of Surface Deformation. PAN Oddział w Krakowie. Prace Komisji Górniczo – Geodezyjnej. Geodezja 31, 1985
8. *Niemiec T.*: Dyskretny i stochastyczny charakter deformacji powodowanych eksploatacją górniczą. Prace naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Seria: Konferencje nr 20 – Ochrona powierzchni i obiektów budowlanych przed szkodami górniczymi. Katowice, 1997
9. *Niemiec R., Niemiec T.*: Błądzenie losowe i jego zastosowanie do modelowania deformacji górotworu powodowanych eksploatacją górniczą. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa „Górnictwo i Środowisko” nr VI/2008 Katowice
10. *Popiołek E.*: Rozproszenie statystyczne odształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnej obserwacji skutków eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja z. 44. Kraków 1976
11. *Rogowska J.*: Badania eksperymentalne tworzenia się niecek osiadania w ośrodku sypkim z uwzględnieniem zmiany gęstości ośrodka. Cz. I niecki szczelinowe, Archiwum Górnictwa, t. XXII, z. 3, 1977
12. *Stewart I.*: Zniesienie prawa średnich. Świat Nauki, czerwiec 1998

Szanowni Czytelnicy!
Przypominamy o wznowieniu
prenumeraty „Przeglądu Górniczego”

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.