Górnictwo i Geoinżynieria • Rok 34 • Zeszyt 2 • 2010

*Andrzej Kwinta**

POSTULAT NIEŚCIŚLIWOŚCI OŚRODKA PRZY PROGNOZOWANIU DEFORMACJI WZDŁUŻ SZYBU

1. Wprowadzenie

Czynniki ekonomiczne i technologiczne powodują wzrost zainteresowania eksploatacją górniczą w rejonie wyrobisk głównych zakładu górniczego. Eksploatacja taka powinna powodować maksymalnie najpełniejsze wykorzystanie złoża kopaliny przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa funkcjonowania szybów. Już od dawna przemysł interesował się możliwością eksploatacji w filarach szybowych. W polskim górnictwie eksploatację w filarach szybowych rozpoczęto po 1960 roku. Na przestrzeni lat opracowano wiele koncepcji prowadzenia bezpiecznej eksploatacji w filarach szybowych [1]. Niektóre z tych metod znalazły praktyczne zastosowanie, a wiele spośród nich pozostało jedynie w postaci teoretycznych rozważań.

Eksploatacja górnicza prowadzona w obrębie filarów szybowych wymusiła konieczność opracowania metod prognozowania deformacji wewnątrz górotworu. Rozkład wskaźników deformacji wewnątrz górotworu oraz dobór odpowiedniego zakresu i harmonogramu prowadzenia robót górniczych, tak aby ograniczyć uszkodzenia w rurze szybowej było przedmiotem wielu prac [1, 5, 16].

Teoria prognozowania deformacji Knothego pierwotnie została opracowana dla powierzchni terenu, a dopiero później została rozwinięta na przestrzeń górotworu. Dla powierzchni ośrodka generalnie postać funkcji zmienności promienia zasięgu wpływów głównych nie ma znaczenia. Ważne jest aby teoria prognozowania spełniała postulaty matematycznego modelu ośrodka. Model ten został podany przez Litwiniszyna [15], a jednym z postulatów jest postulat tranzytywności (przechodniości), który determinuje własności funkcji zmienności promienia zasięgu wpływów głównych w górotworze [13].

Ze względu na brak odpowiedniego zbioru wyników pomiarów geodezyjnych wewnątrz górotworu, prace nad budową funkcji $r(z)$ opierały się głównie na rozważaniach teoretycz-

* Katedra Geodezji, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

nych [2] i badaniach modelowych [3, 11]. Pewne próby zweryfikowania uzyskanych rezultatów były prowadzone na wyrywkowym materiale obserwacyjnym [10].

W niniejszej pracy przedstawione zostaną uwagi dotyczące stosowania teorii Knothego do prognozowania deformacji wzdłuż rury szybowej oraz przedstawione zostanie rozwiązanie eliminujące nieścisłość związaną z niespełnieniem warunku nieściśliwości ośrodka.

2. Poglądy na zmienność zasięgu wpływów głównych w górotworze

Wielokrotnie podejmowano rozważania na temat postaci funkcji zmienności promienia zasięgu wpływów głównych w górotworze. Niektóre z uzyskanych rozwiązań budzą poważne zastrzeżenia od strony teoretycznej, dotyczy to również rozwiązań stosowanych w praktyce. W tabeli 1 zestawiono wybrane funkcje zmienności promienia zasięgu wpływów w górotworze wraz z wyznaczonymi parametrami tych funkcji.

Budryk wyprowadził swoją zależność na podstawie rozważań teoretycznych dotyczących rozkładu wskaźników deformacji wewnątrz górotworu [2]. Z kolei na podstawie przeprowadzonych badań modelowych Krzysztoń [11] sformułowała cały szereg interesujących wniosków na temat przebiegu zmienności zasięgu wpływów w górotworze. Również badania nad zmiennością zasięgu wpływów eksploatacji wewnątrz górotworu przez wiele lat prowadził Drzęźla [4]. Funkcja zaproponowana przez Drzęźlę uwzględnia występowanie promienia zasięgu wpływów na poziomie stropu eksploatowanego pola.

Próbę określenia przebiegu zmienności $r(z)$ w górotworze w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych przeprowadził Kowalski [10]. Poniżej w tabeli 1 zestawiono kilka proponowanych rozwiązań.

TABELA 1
Poglądy na postać funkcji zasięgu wpływów głównych w górotworze

Autor	Funkcja	Parametry
Budryk [2]	$r(z) = r(H)\left(\frac{z}{H}\right)^n$	$n = \sqrt{2\pi}\tan\beta \approx 5$
Knothe [8]		$n = 1$
Gromysz [6]		$n = 0{,}61$
Drzęźla [4]	$r(z) = r(H)\left(\frac{z+z_0}{H+z_0}\right)^n$	$n \in \langle 0{,}405; 0{,}735\rangle$ $\quad n = 0{,}665$, $z_0 = \frac{Hm}{m-1}$
Kowalski [10]	$\tan\beta_{(z,H)} = cH^\mu\left(\frac{z}{H}\right)^{1-n}$	$\tan\beta_H = cH^\mu,\ 1-n = 0{,}34; 0{,}52; 0{,}45$
Kot [9]	$r(z) = k\left(\frac{z}{H}\right)^n$	$\begin{cases} k = 548 & n = 0{,}405 \\ k = 407 & n = 0{,}344 \end{cases}$

W swojej rozprawie habilitacyjnej Niedojadło [16] przeprowadził analizę rozwiązań dotyczących przyjmowania postaci i parametrów funkcji promienia zasięgu wpływu w górotworze, w odniesieniu do projektowania i eksploatacji filarów szybowych, w warunkach LGOM. Kluczowe znaczenie dla obliczeń wskaźników deformacji wzdłuż rury szybowej ma uwzględnienie wartości parametrów adekwatnych dla danych warunków prowadzenia eksploatacji, ale również odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnych wartości wskaźników deformacji.

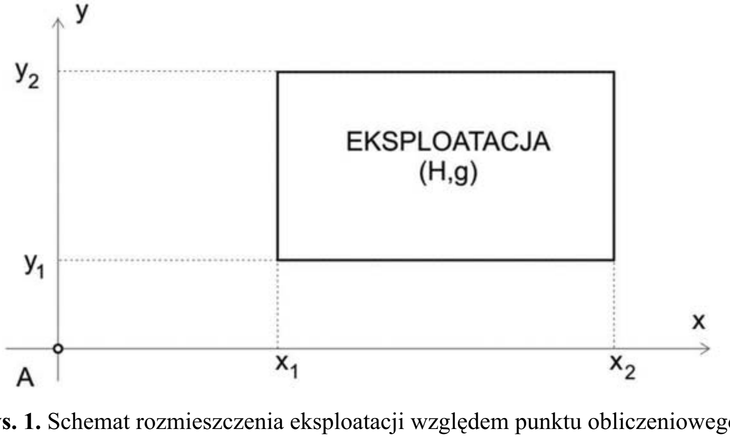
3. Warunek nieściśliwości ośrodka w klasycznej teorii prognozowania

Podstawową teorią prognozowania deformacji wywołanych podziemną eksploatacją górniczą jest teoria Knothego-Budryka. Również do obliczeń wzdłuż rury szybowej wykorzystywana jest ta teoria uzupełniona o funkcję zmienności promienia zasięgu w górotworze podaną przez Drzęźlę (tab. 1). Wzór ten wraz z parametrami powszechnie przyjmowanymi, nie daje zadość jednemu z podstawowych założeń teorii tj. o nieściśliwości ośrodka.

W założeniach teoretycznych leżących u podstaw teorii zakłada się że:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \tag{1}$$

Sprawdźmy ten warunek w odniesieniu do stosowanych powszechnie zależności Knothego-Budryka i przyjmowanych wartości parametrów tej teorii. Rozważmy eksploatację jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia eksploatacji względem punktu obliczeniowego

Zgodnie z teorią Knothego [8] przemieszczenie pionowe dla punktu A umieszczonego w początku układu współrzędnych (rys. 1) można obliczyć następująco:

$$W_A = \frac{W_{\max}}{r^2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \exp\left(-\pi \frac{\lambda^2 + \eta^2}{r^2}\right) d\lambda\, d\eta \tag{2}$$

gdzie:

W_{max} — maksymalne przemieszczenie pionowe,

r — promień zasięgu wpływów głównych.

Natomiast odkształcenie pionowe zgodnie z definicją można wyznaczyć następująco (3):

$$\varepsilon_z \overset{def}{=} \frac{dw}{dz} = \frac{dw}{dr}\frac{dr}{dz} \tag{3}$$

Różniczkując (2) zgodnie z (3) mamy:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dr} = & \frac{-2W_{\max}}{r^3} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\pi \frac{\lambda^2}{r^2}\right) d\lambda \int_{y_1}^{y_2} \exp\left(-\pi \frac{\eta^2}{r^2}\right) d\eta + \\ & + \frac{W_{\max}}{r^2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{2\pi\lambda^2}{r^3} \exp\left(-\pi \frac{\lambda^2}{r^2}\right) d\lambda \int_{y_1}^{y_2} \exp\left(-\pi \frac{\eta^2}{r^2}\right) d\eta + \\ & + \frac{W_{\max}}{r^2} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\pi \frac{\lambda^2}{r^2}\right) d\lambda \int_{y_1}^{y_2} \frac{2\pi\eta^2}{r^3} \exp\left(-\pi \frac{\eta^2}{r^2}\right) d\eta \end{aligned} \tag{4}$$

Porządkując (4) oraz całkując przez części, a następnie podstawiając zależności na obliczanie krzywizny [7] uzyskujemy:

$$\varepsilon_z = \frac{r^2}{2\pi}[K_x + K_y]\frac{dr}{dz} \tag{5}$$

Biorąc pod uwagę zależność Budryka:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= -BK_x \\ \varepsilon_y &= -BK_y \end{aligned} \tag{6}$$

Wstawiając (6) do (5) oraz korzystając z (1) uzyskujemy:

$$B(z) = \frac{r}{2\pi}\frac{dr}{dz} \tag{7}$$

Zatem warunek o nieściśliwości ośrodka spełniony jest, gdy współczynnik proporcjonalności spełnia zależność (7). Dla funkcji promienia zasięgu wpływów w górotworze [3, 4] uzyskujemy:

$$B(z) = \frac{nr(z)}{2\pi(z + z_0)} r(z) \tag{8}$$

Przyjmijmy następujące przeciętne wartości parametrów:

$$\begin{aligned} n &= 0,6 \\ z_0 &= 0,1H \\ \tan\beta &= 2,0 \end{aligned} \tag{9}$$

Wstawiając wartości tych parametrów do zależności (8) dla powierzchni terenu uzyskujemy:

$$B(z = H) = 0,043r(H) \tag{10}$$

A klasyczna wartość tego współczynnika podana przez Budryka wynosi:

$$B(z = H) = 0,4r(H) \tag{11}$$

Korzystając z zależności (10) uzyskujemy odkształcenia poziome prawie 10 krotnie mniejsze niż uzyskane z wykorzystaniem wartości współczynnika podanej przez Budryka (11). Na podstawie powyższego należy stwierdzić bardzo istotne rozbieżności pomiędzy założeniami teoretycznymi, a obliczanymi wskaźnikami deformacji.

4. Metoda prognozowania spełniająca warunek nieściśliwości ośrodka

Przedstawione w poprzednim rozdziale rozbieżności można wyeliminować poprzez zastosowanie innego modelu obliczeniowego. Można zaproponować model, który formalnie poprawnie połączy prognozowanie deformacji w płaszczyźnie poziomej i pionowej, na powierzchni terenu i wewnątrz górotworu [12]. W oparciu o funkcję wpływów Knothego i istnienie hipotetycznego aktywnego punktu działania środka ciężkości dla pojedynczego elementu eksploatacji górniczej, można wyeliminować niezgodności formalne [14].

Definicja 1.

Dla eksploatacji elementarnej i konkretnego horyzontu obliczeniowego istnieje pewien wyidealizowany punkt leżący na osi pionowej tej eksploatacji elementarnej, w kierunku którego przemieszczają się wszystkie punkty leżące na przyjętym horyzoncie obliczeniowym, przy czym odległość pionowa pomiędzy tym punktem a eksploatacją zależy od współrzędnej pionowej przyjętego horyzontu obliczeniowego.

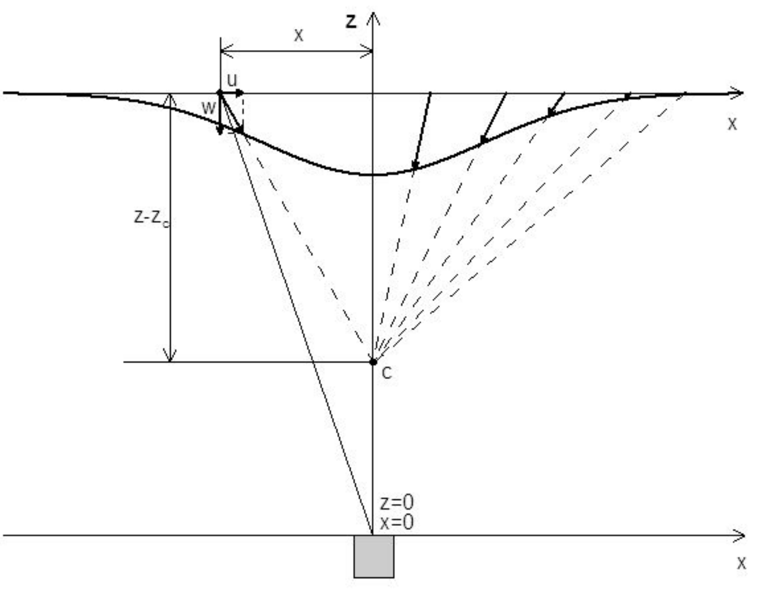
Symbolicznie definicję tą przedstawić możemy w następującej postaci:

$$\underset{\substack{dP(0,0)\in P \\ z\in\langle 0,H\rangle}}{\forall} \ \underset{c(0,z_c)}{\exists} \ \frac{u_e(x,y,z)}{w_e(x,y,z)} = \frac{x\cos\alpha + y\sin\alpha}{z - z_c(z)} \tag{12}$$

gdzie:

P — pole eksploatacyjne,
$dP(0,0)$ — elementarna eksploatacja,
H — głębokość eksploatacji,
c — aktywny punkt ciężkości,
$u_e(x, y, z)$ — elementarne przemieszczenie poziome,
$w_e(x, y, z)$ — elementarne przemieszczenie pionowe,
x, y, z — współrzędne punktu na wybranym horyzoncie obliczeniowym,
α — kąt poziomy jaki tworzy prosta poprowadzona przez punkt obliczeniowy i początek układu współrzędnych z osią x,
$z_c(z)$ — współrzędna pionowa aktywnego punktu ciężkości c,

Powyższą definicję graficznie przedstawiono na rysunku 2 ograniczając się do płaskiego stanu deformacji w celu uproszczenia rysunku.



Rys. 2. Aktywny punkt działania środka ciężkości dla wybranego horyzontu obliczeniowego

W zależności od postaci funkcji opisującej migrację aktywnego punktu ciężkości w zależności od rozpatrywanego horyzontu obliczeniowego można uzyskiwać różne postacie wzorów na poziome i pionowe wskaźniki deformacji na powierzchni terenu i w górotworze. Jedną z prostszych postaci takiej funkcji może być funkcja liniowa:

$$z_c(z) = kz - m \tag{13}$$

gdzie:

k — jest to szybkość zbliżania się aktywnego punktu środka ciężkości do współrzędnej pionowej elementu eksploatacji,

m — jest to współrzędna pionowa aktywnego punktu środka ciężkości dla horyzontu obliczeniowego na poziomie stropu eksploatowanego elementu.

Dla tak przyjętej funkcji z_c uzyskuje się następujące postacie zależności niezbędne do wyznaczania wskaźników deformacji:

— funkcja promienia zasięgu wpływów w górotworze:

$$r(z) = r(z = H)\left[p + (1 - p)\frac{z}{H}\right]^{1-k} \tag{14}$$

gdzie:

$$p = \left[\frac{r(z = 0)}{r(z = H)}\right]^{\frac{1}{1-k}}$$

— współczynnik proporcjonalności pomiędzy poziomymi i pionowymi wskaźnikami deformacji:

$$B(z) = \frac{r^2(z)}{2\pi[(1 - k)z + m]} \tag{15}$$

Oczywiście w takim przypadku ważne jest wyznaczenie wartości parametrów występujących w powyższych wzorach. W tym celu skorzystajmy z przeciętnych wartości parametrów klasycznego modelu (9) i (11) otrzymując:

$$\begin{aligned} k &= 1 - \frac{1}{n} = -\,0,667 \\ m &= \frac{z_0}{n} = 0,017H \\ r(z = 0) &= \left(\frac{z_0}{H + z_0}\right)^n = 0,237r(z = H) \end{aligned} \tag{16}$$

W każdym rozważanym przypadku, chcąc wykonywać obliczenia wskaźników deformacji, należy wyznaczyć wartości parametrów adekwatne do danych warunków prowadzenia eksploatacji.

5. Podsumowanie

Prowadzenie eksploatacji górniczej w pobliżu lub wewnątrz wyznaczonego filara szybu powoduje konieczność wcześniejszego określenia przewidywanych wartości wskaźników deformacji, jakie mogą wystąpić wzdłuż rury szybowej. Bezpieczeństwo najważniejszego wyrobiska, jakim jest szyb, zależy od przyjętego modelu obliczeniowego, wyznaczonych parametrów tego modelu, prawidłowej identyfikacji danych o eksploatacji oraz oceny stanu technicznego i odporności danego szybu. Do obliczeń powszechnie wykorzystuje się teorię Knothego-Budryka, a funkcję zmienności promienia zasięgu wpływów przyjmuje się za Drzężlą. W takim przypadku występują istotne nieścisłości formalne dotyczące szczególnie ważnych odkształceń poziomych i pionowych. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie modelu aktywnego punktu działania środka ciężkości.

LITERATURA

[1] *Borecki M.* [red.]: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wyd. „Śląsk", Katowice 1980

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

[3] *Drzężla B.*: Badania teoretyczne i modelowe ruchów górotworu przy eksploatacji górniczej. Politechnika Śląska, Gliwice 1971, (praca doktorska)

[4] *Drzężla B.*: Zmienność zasięgu wpływów eksploatacji w górotworze. Przegląd Górniczy, nr 10, Katowice 1979

[5] *Dżegniuk B.*: Odkształcenia pionowe rury szybowej przy eksploatacji filarów szybowych. Prace Komisji Nauk Technicznych, Górnictwo z. 5, Kraków 1967

[6] *Gromysz J.*: Rozkład przemieszczeń pionowych w górotworze w otoczeniu ścianowego wyrobiska eksploatacyjnego. AGH, Kraków 1977, (praca doktorska)

[7] *Hejmanowski R.* [red.]: Prognozowanie deformacji górotworu i powierzchni terenu na bazie uogólnionej teorii Knothego dla złóż surowców stałych, ciekłych i gazowych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2001

[8] *Knothe S.*: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wyd. „Śląsk", Katowice 1984

[9] *Kot A.*: Wpływ czynników górniczo-geologicznych na kształtowanie się wskaźników deformacji powierzchni i parametry teorii S. Knothego i T. Kochmańskiego. Materiały konferencyjne. Komisja Ochrony Terenów Górniczych PAN, Katowice 1981

[10] *Kowalski A.*: Określenie zmienności parametru promienia zasięgu wpływów głównych w górotworze rz teorii Budryka-Knothego na podstawie badań geodezyjnych przemieszczeń pionowych górotworu. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1984, (praca doktorska)

[11] *Krzysztoń D.*: Parametr zasięgu niecek osiadania. Archiwum Górnictwa, t. X, z. 1, Warszawa 1965

[12] *Kwinta A.*: Prognozowanie deformacji w płaszczyźnie poziomej. Materiały konferencji „IX Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych" , Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 278, Gliwice 2007

[13] *Kwinta A.*: Transitivity Postulate Effect on Function of Influences Range Radius in Knothe Theory. Archives of Mining Sciences, vol. 54 issue 1,Kraków 2009.

[14] *Kwinta A.*: Uogólniony model aktywnego punktu działania środka ciężkości do obliczania wskaźników deformacji. Kraków 2009 (nie publikowane)

[15] *Litwiniszyn J.*: O niektórych liniowych i nieliniowych modelach niecki osiadania w górotworze sypkim. Przegląd Górniczy, t. XVIII, Nr 5, Katowice 1962

[16] *Niedojadło Z.*: Problematyka eksploatacji złoża miedzi z filarów ochronnych szybów w warunkach LGOM. Wyd. AGH seria Rozprawy Monografie nr 177, Kraków 2008