

MIROSLAW CHUDEK, WŁODZIMIERZ OLASZOWSKI,
BERNARD DRZEŻLA

OBLICZANIE DEFORMACJI SZYBU POD WPLYWEM EKSPLOATACJI

Streszczenie. W pracy omówiono podstawowe wskaźniki deformacji szybu przy eksploatacji. Wysłunęto potrzebę uwzględniania w projektach eksploatacji filarów szybowych takich wskaźników deformacji jak kąt odchylenia od pionu i krzywizna szybu. Na podstawie równań przemieszczeń poziomych w funkcji współrzędnej pionowej punktu wyprowadzono wzory ogólne i szczegółowe według teorii T. Kochmańskiego na wielkość wychylenia, kąta odchylenia od pionu i krzywizny szybu. Podano również sposób wykreslnego wyznaczania wielkości tych deformacji, gdy znane są ich składowe w dwu prostopadłych kierunkach.

1. Wstęp

Problem wykorzystywania zasobów węgla uwiezonych w filarach czynnych szybów stanowi od kilku lat centrum uwagi wielu praktyków i teoretyków górnictwa. Aktualnie kopalnie prowadzą eksploatację w szeregu filarach ochronnych dla szybów, przeważnie pomocniczych, a w kilku przypadkach przystąpiono do robót w filarach szybów górniczych. Zważywszy stosunkowo małe - w porównaniu do eksploatacji pod obiektami na powierzchni - doświadczenie w zakresie eksploatacji w filarach ochronnych szybów, ma ona jeszcze charakter eksperymentalny, szczególnie w trudnych warunkach naturalnych. Wynika stąd konieczność prowadzenia badań i rozwijania aparatu matematycznego służącego do przewidywania skutków tejże eksploatacji. Celem niniejszego opracowania jest właśnie uzupełnienie istniejących wzorów o dalsze, które mogą być przydatne w fazie projektowania eksploatacji przyszybowej.

Do istotnych wskaźników deformacji szybu przy eksploatacji autorzy zaliczają:

- odkształcenia właściwe (pionowe),
- wychylenie osi szybu,
- kąt odchylenia osi szybu od pionu,
- krzywizna szybu.

Jak dotąd interesowano się jedynie pierwszymi dwoma wskaźnikami. Dwa dalsze wskaźniki dotychczas nie były brane pod uwagę przy obliczaniu deformacji rury szybowej w wyniku eksploatacji. Brak było zresztą odpowiednich wzorów dla obliczania ich.

Pokrótkce omówimy teraz poszczególne rodzaje deformacji szybu.

Z wymienionych wskaźników odkształcenia właściwe pionowe są stosunkowo najlepiej poznane i opisane wzorami stosowanych w Polsce teorii ruchów gó-

rotworu przy eksploatacji [2, 7, 9, 10]. Można je obliczyć na podstawie wyników prac [6, 8, 9]. Z tego względu odkształcenia właściwe pionowe nie będą w artykule rozpatrywane.

Terminem wychylenia osi szybu utarło się nazywać wielkość poziomego przemieszczenia punktów szybu. W pracy zostanie podany sposób obliczania wychylenia osi szybu i określenia jego kierunku, gdy znane są składowe przemieszczenia w dwu prostopadłych kierunkach oraz sposób obliczania składowych przemieszczenia przy transformacji poziomego układu współrzędnych.

Przez kąt odchylenia osi szybu autorzy rozumieją kąt między pionem a osią szybu po jego zdeformowaniu. Należy tu stwierdzić, że podobnie jak dla obiektów budowlanych na powierzchni samo osiadanie punktów nie jest miarą ich deformacji, tak dla szybu samo wychylenie nie musi być połączone z zakłóceniami pracy szybu, o ile jest ono równomierne na całej jego długości. Bardziej istotne znaczenie ma właśnie kąt odchylenia. W niniejszej pracy będą wyprowadzone wzory określające wielkość kąta odchylenia w dowolnym kierunku poziomym oraz kierunek i wielkość największego kąta odchylenia dla danego punktu szybu.

Z kolei krzywizna szybu ma znaczenie dla pracy szybu w trakcie eksploatacji między innymi ze względu na dodatkowe naprężenia obudowy szybu.

Podobnie jak dla kąta odchylenia, zostaną w pracy wyprowadzone wzory określające wielkość krzywizny w dowolnym kierunku poziomym oraz kierunek i wielkość największej krzywizny dla danego punktu szybu.

Zapowiedziane dotąd wzory - nazwiemy je wzorami ogólnymi - są niezależne od kształtu obszaru eksploatacji i od tego, jaką teorię ruchów górotworu przy eksploatacji przyjmiemy jako podstawę obliczeń. Dla praktycznego wykorzystania wzorów ogólnych konieczna jest znajomość wielkości poszczególnych deformacji w dwu dowolnych, ale najlepiej prostopadłych kierunkach. Wzory na wielkości rozważanych deformacji w dwu prostopadłych kierunkach równoległych do boków prostokątnego obszaru eksploatacji w położeniu poziomym wyprowadzimy na podstawie teorii T. Kochmańskiego [9]. Wzory te będziemy nazywać wzorami szczegółowymi.

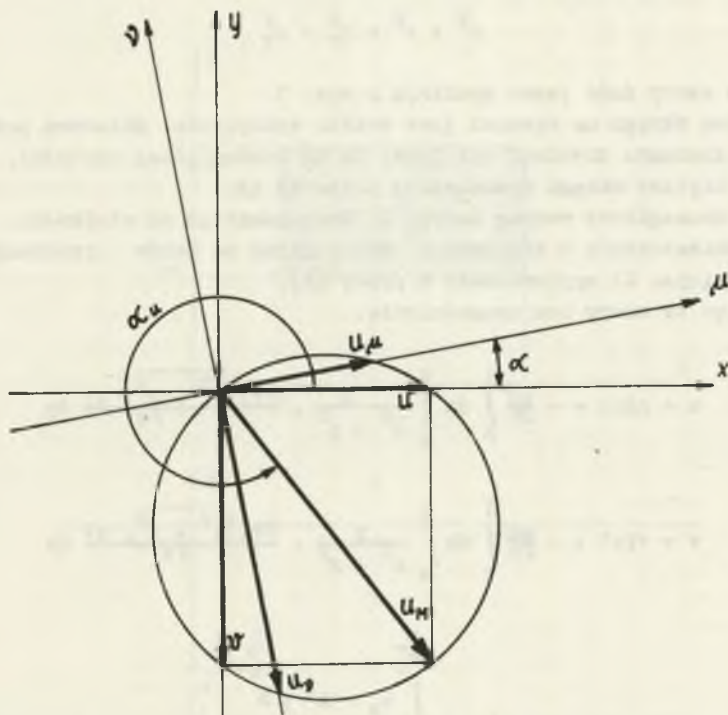
Należy zaznaczyć, że teoria T. Kochmańskiego była zastosowana z dobrym wynikiem w projektach pierwszych, eksperymentalnych eksploatacji filarów przyszybowych.

2. Wychylenie osi szybu

Wielkość wychylenia osi szybu jest sumą wektorową składowych przemieszczeń poziomych danego punktu osi w dwu prostopadłych kierunkach.

Niech u i v będą składowymi przemieszczenia odpowiednio w kierunkach osi x i y (rys. 1). Wtedy wielkość wychylenia osi szybu wyniesie

$$u_M = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.1)$$



Rys. 1. Wykreślenie wyznaczanie wychylenia osi szybu i składowych przemieszczeń w dowolnych kierunkach

A kierunek wychylenia będzie określony równaniem

$$\operatorname{tg} \alpha_u = \frac{v}{u} \quad (2.2)$$

gdzie:

α_u - kąt między osią x , a kierunkiem wychylenia osi szybu.

Kierunek zerowej wielkości składowej przemieszczenia jest prostopadły do kierunku wychylenia, czyli

$$\alpha_{u0} = \alpha_u \pm 90^\circ \quad (2.3)$$

Składowe przemieszczenia w kierunkach osi układu (μ, ν) obróconego względem układu (x, y) o kąt α wyznaczmy z równań transformacyjnych

$$u_\mu = u \cos \alpha + v \sin \alpha \quad (2.4)$$

$$u_\nu = -u \sin \alpha + v \cos \alpha$$

Na podstawie (2.3) łatwo wykazać istnienie następującego związku:

$$u^2 + v^2 = u_{\mu}^2 + u_{\nu}^2 \quad (2.5)$$

Podane wzory dość jasno wynikają z rys. 1.

Średnicą okręgu na rysunku jest wektor wychylenia. Składowa przemieszczenia w kierunku dowolnej osi jest, co do bezwzględnej wartości, równa długości cięciwy okręgu wyznaczonej przez tę oś.

Wzory szczegółowe według teorii T. Kochmańskiego na wielkości składowych przemieszczenia w kierunkach równoległych do boków prostokąta eksploatacji (rys. 2) wyprowadzono w pracy [4].

Podamy więc te wzory bez uzasadnienia:

$$u = u(z) = -\frac{aE}{2\eta} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{x}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z} dy \quad (2.6)$$

$$v = v(z) = -\frac{aE}{2\eta} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{y}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z} dy$$

gdzie:

$$\varphi(r, z) = \frac{\frac{r}{r_0} \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda b} d\lambda}{\int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda b} d\lambda};$$

a - współczynnik zależny od sposobu kierowania stropem,

g - grubość pokładu,

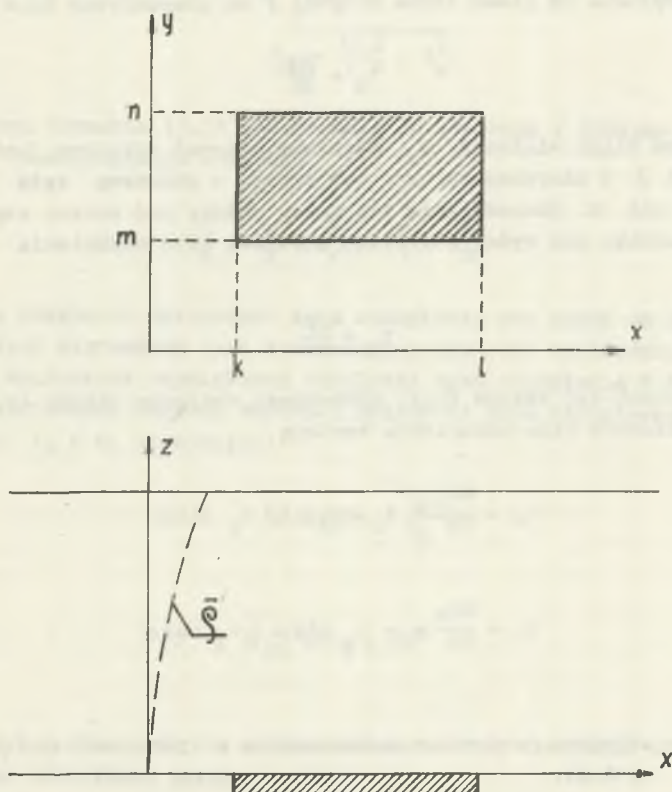
r_0, b - parametry teorii; $r_0 = r_0(z)$, $b = b(z)$,

z - współrzędna pionowa określająca odległość danego punktu w górotworze od pokładu.

3. Kąt odchylenia osi szybu od pionu

Zakładamy, że w pierwotnym położeniu oś szybu pokrywała się z osią z układu współrzędnych prostokątnych (x, y, z) . W wyniku eksploatacji szyb ulega deformacji i oś szybu przejdzie w krzywą o równaniu wektorowym

$$\vec{\rho} = (u(z), v(z), z) \quad (3.1)$$



Rys. 2. Rozpatrywany kształt obszaru eksploatacji

Ze względu na małe wielkości kąta odchylenia krzywej od pionu będziemy przyjmować tangens tego kąta za jego wielkość.

Kąt odchylenia od pionu rzutu krzywej $\bar{\rho}$ na płaszczyznę (x, z) wyniesie:

$$t_x = \frac{du}{dz} \quad (3.2.1)$$

W dalszym ciągu wielkość t_x będziemy nazywać składową kąta odchylenia krzywej $\bar{\rho}$ w kierunku osi x - lub krócej - składową kąta odchylenia w kierunku osi x . Uzasadnienie tej nazwy podamy pod koniec tego ustępu.

Analogicznie, jak wyżej określimy składową kąta odchylenia w kierunku osi y

$$t_y = \frac{dv}{dz} \quad (3.2.2)$$

W kierunkach osi układu (μ, ν) obróconego względem układu (x, y) o kąt α (rys. 1) składowe kąta odchylenia wyniosą

$$t_\mu = \frac{du_\mu}{dz} = t_x \cos \alpha + t_y \sin \alpha \quad (3.3)$$

$$t_\nu = \frac{du_\nu}{dz} = -t_x \sin \alpha + t_y \cos \alpha$$

gdzie:

u_μ, z_ν - składowe poziome przemieszczenia w kierunkach osi μ i ν (wzory 2.4).

Kierunek największej składowej kąta odchylenia wyznaczmy z równania

$$\frac{dt_\mu}{d\alpha} = 0$$

Otrzymamy stąd

$$\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{t_y}{t_x} \quad (3.4)$$

gdzie:

α_t - kąt między osią x , a kierunkiem największej wartości składowej kąta odchylenia krzywej $\bar{\rho}$ od pionu.

Po wstawieniu (3.4) do pierwszego z równań (3.3) otrzymamy wielkość największej składowej kąta odchylenia

$$t_M = \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \quad (3.5)$$

Podnosząc równania (3.3) obustronnie do kwadratu i dodając je stronami dowodzimy następującego związku

$$t_x^2 + t_y^2 = t_\mu^2 + t_\nu^2 = t_M^2 \quad (3.6)$$

czyli suma kwadratów składowych kąta odchylenia osi szybu od pionu w dwóch prostopadłych kierunkach jest dla danego punktu osi wielkością stałą i równa się kwadratowi największej składowej kąta odchylenia w tym punkcie.

Z kolei kierunek zerowej wartości składowej kąta odchylenia wyznaczmy z równania $t_\mu = 0$, otrzymując

$$\operatorname{tg} \alpha_{t_0} = -\frac{t_x}{t_y}$$

czyli

$$\alpha_{t_0} = \alpha_t \pm 90^\circ \quad (3.7)$$

gdzie:

α_{t_0} - kąt między osią x , a kierunkiem zerowej wielkości składowej kąta odchylenia szybu od pionu.

Kąt między krzywą $\bar{\rho}$, a osią z będzie właściwym kątem odchylenia osi szybu od pionu. Kosinus tego kąta wyniesie

$$\cos t = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{K}}{|\bar{\rho}| \cdot |\bar{K}|} = \frac{1}{\sqrt{1 + t_M^2}}$$

gdzie:

\bar{K} - wektor osi z ; $\bar{K} = (0, 0, 1)$.

Powyższy wzór upraszczamy kolejno:

$$\sin t = \frac{t_M}{\sqrt{1 + t_M^2}}$$

$$t \approx \frac{t_M}{\sqrt{1 + t_M^2}} \approx t_M \quad (3.8)$$

Przyjęte uproszczenia są uzasadnione małą wielkością t_M .

Właściwy kąt odchylenia osi szybu od pionu jest więc w przybliżeniu równy kątowi odchylenia od pionu rzutu krzywej $\bar{\varphi}$ na płaszczyznę pionową przechodzącą przez oś z i nachyloną do osi x pod kątem α_t (wzór 3.4).

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że kąt odchylenia osi szybu od pionu ma w pewnym sensie własności wektora, stąd uzasadnienie dla określenia "składowa kąta odchylenia". Wszystkie wyprowadzone w tym ustępie wzory oprócz (3.1), (3.2) i (3.8) mają swoje odpowiedniki we wzorach z ustępu 2, stąd wniosek, że elementy charakteryzujące kąt odchylenia osi szybu od pionu można wyznaczać według schematu pokazanego na rys. 1.

Wzory szczegółowe przy eksploatacji jak na rys. 2 będą następujące:

$$t_x = -\frac{ag}{2\pi} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{x}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z^2} dy$$

$$t_y = -\frac{ag}{2\pi} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{y}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z^2} dy \quad (3.9)$$

4. Krzywizna szybu

Krzywizna rzutu osi szybu po jego zdeformowaniu, czyli krzywej $\bar{\varphi}$ na płaszczyznę (x, z) wyraża się wzorem

$$h_x = \frac{\frac{d^2 u}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{du}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{d^2 u}{dz^2}}{(1 + t_x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Popelniając minimalny bład przyjmujemy

$$1 + t_x^2 = 1$$

wobec czego wzór powyższy uprości się do postaci

$$h_x = \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (4.1.1)$$

Wielkość h_x nazwiemy składową krzywizny szybu w kierunku osi x .
W kierunku osi y składowa krzywizny wyniesie

$$h_y = \frac{d^2 v}{dz^2} \quad (4.1.2)$$

Łatwo wykazać, że dla krzywizny szybu zachodzą wzory całkowicie analogiczne do wzorów (3.3-3.7), a w szczególności można dowieść, że

$$h_M = \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \quad (4.2)$$

gdzie h_M jest największą wielkością krzywizny rzutu krzywej $\bar{\rho}$ na płaszczyznę pionową (największa składowa krzywizny). Płaszczyzna ta jest nachylona do osi x pod kątem α_h określonym równaniem

$$\operatorname{tg} \alpha_h = \frac{h_y}{h_x} \quad (4.3)$$

Właściwą wielkość krzywizny krzywej $\bar{\rho}$ obliczamy według wzoru [5]

$$h = \frac{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}{(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{z}^2)^{\frac{3}{2}}}$$

gdzie:

$$A = \begin{vmatrix} \dot{v} & \dot{z} \\ \ddot{v} & \ddot{z} \end{vmatrix} = -h_y$$

$$B = \begin{vmatrix} \dot{z} & \dot{u} \\ \ddot{z} & \ddot{u} \end{vmatrix} = h_x$$

$$C = \begin{vmatrix} \dot{u} & \dot{v} \\ \ddot{u} & \ddot{v} \end{vmatrix} = t_x h_y - t_y h_x$$

Pomijając wyrazy małe wyższego rzędu, otrzymujemy

$$h = h_M$$

Krzywizna szybu jest więc w przybliżeniu równa największej swojej składowej. Elementy charakteryzujące krzywiznę szybu można wyznaczać również wykreślnie, podobnie jak kąt odchylenia osi szybu od pionu, według schematu podanego na rys. 1.

Wzory szczegółowe według teorii T. Kochmańskiego przy eksploatacji jak na rys. 2 będą następujące

$$h_x = - \frac{gk}{2\pi} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{x}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial^3 \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z^3} dy \quad (4.5)$$

$$h_y = - \frac{gk}{2\pi} \int_k^1 dx \int_m^n \frac{y}{x^2 + y^2} \cdot \frac{\partial^3 \varphi(\sqrt{x^2 + y^2}, z)}{\partial z^3} dy$$

5. Uwagi końcowe

Wzory szczegółowe wyprowadzone w pracy dotyczą eksploatacji w kształcie prostokąta, ale stosowanie ich może być rozszerzone na dowolne obszary eksploatacji według zasad superpozycji wpływów wyłożonych w pracy [9]. Wzorów tych nie rozwijano szerzej, ponieważ i tak konieczne byłoby tabularyzowanie ich przy pomocy maszyny cyfrowej.

Duże znaczenie przy eksploatacji filara ochronnego szybu ma przewidywanie wielkości deformacji w czasie. Wzory podane w pracy określają tak zwane ostateczne wielkości deformacji, czyli wielkości, które występują po upływie dostatecznie długiego okresu czasu od chwili ustalenia danego kształtu obszaru eksploatacji. Uwzględnienie czynnika czasu wymaga zastosowania znanych funkcji czasowych lub też wyprowadzenia nowych funkcji dla powierzchni i w głębi górotworu.

LITERATURA

- [1] Borecki M., Chudek M.: "Mechanika górotworu", Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1968.
- [2] Budryk W.: "Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu", Archiwum Górnicztwa i Hutnictwa t. I, zeszyt 1, 1953 r.
- [3] Drzęźła B.: "Komunikat o wynikach pracy nad nowym ujęciem zagadnienia obliczania poziomych deformacji górotworu przy eksploatacji", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnicztwo Zeszyt

- [4] Drzeźła B.: "Poziome deformacje górotworu przy eksploatacji górniczej", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo (w druku).
- [5] Goetz A.: "Geometria różniczkowa", PWN Warszawa 1965.
- [6] Janusz W.: "Przebieg osiadań w głębi górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej w oparciu o teorię Z. Kowalczyka", materiały na I Krajowe Sympozjum na temat "Ochrona powierzchni przed uszkodzami górnictwami, 1969 r.
- [7] Knothe S.: "Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania", Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t. I zeszyt 1, 1953 r.
- [8] Knothe S., Leśniak J.: "Wyznaczanie wielkości spodziewanych wpływów eksploatacji w szybowych filarach ochronnych" Archiwum Górnictwa t. XI, zeszyt 4, 1966 r.
- [9] Kochański T.: "Obliczanie ruchów punktów górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej", PWN Warszawa 1956 r.
- [10] Kowalczyk Z.: "Określenie wielkości odkształceń powierzchni na skutek eksploatacji górniczej metodą przekrojów pionowych", Geodezja i Kartografia t. 9, zeszyt 2, 1960 r.

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ СТВОЛА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Резюме

В работе обсуждены основные показатели деформации ствола при эксплуатации. Выдвинуто необходимость принять во внимание в проектах эксплуатации околоствольных целиков такие показатели деформации, как угол отклонения от вертикали и кривизну ствола. На основании горизонтальных перемещений в функции вертикальной координаты точки выведены общие и подробные формулы по теории Т. Кожманского на величину отклонения, угла отклонения от вертикали и кривизны ствола. Представлен тоже способ определения по диаграмме величин тех деформаций, когда известны их составляющие в двух перпендикулярных направлениях.

THE DETERMINATION OF SHAFT DEFORMATIONS IN RESULT OF THE EXPLOITATION OF COAL

Summary

The paper discusses the fundamental deformation coefficients of a shaft in result of its exploitation. It has been suggested that it is necessary to take into consideration - while designing the exploitation of the shaft posts - such coefficients of deformation as the angle of deviation from the vertical and the curvature of the shaft. Basing on the equations of horizontal translocations in the function of the vertical punctual coordinate, there have been developed general and detailed formulae, accor-

ding to T. Kochamański's theory, determining the proportion of the deflection, the angle of deviation from the vertical and the curvature of the shaft. There was also suggested how to find graphically the proportion of these deformations, their components in the two perpendicular directions being known.