

Josef ALDORF  
Karel VOJTASIK

PRZYCZYNEK DO INŻYNIERSKICH METOD  
OBLICZANIA OBUDOWY KOTWIOWEJ

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest problematyce doboru obudowy kotwiowej dla podziemnych wyrobisk górniczych przy pomocy niektórych tzw. metod inżynierskich z wykorzystaniem zasad teorii sklepienia skalnego i zasad wzmacniania górotworu kotwiami o wstępnym naprężeniu. Przedstawiono także nomogramy i wzory do obliczeń obudowy kotwiowej.

1. WSTĘP

W ostatnich latach w budownictwie podziemnym i w górnictwie rozszerzył się zakres stosowania obudowy kotwiowej. Stabilizujące działanie tej obudowy zostało wykazane w czasie jej pomyślnego stosowania nawet w najcięższych warunkach górniczo-geologicznych. Jednocześnie rozwijały się metody obliczeń tej obudowy, które w różny sposób modelują zachowanie się systemu górotwór - obudowy w procesie stabilizacji wyrobiska górniczego. Funkcja obudowy jest kombinacją następujących efektów:

- podpierającego (nośnego) przejawiającego się w przenoszeniu obciążenia luźnych, ewentualnie mało zwięzłych skał w strefie powstałego sklepienia skalnego lub obwału powstałego w wyniku szczelinyowości górotworu. Funkcja tego typu obudowy jest całkowicie pasywna,
- stabilizującego, przejawiającego się zmianami naprężeń w pobliżu wyrobiska górniczego i zmianami deformacyjnego stanu górotworu. Obudowa poprzez swe aktywne działanie stabilizuje górotwór, obniża koncentrację naprężeń i w ten sposób przyczynia się do zwiększenia i lepszego wykorzystania właściwej podporności górotworu,
- wzmacniającego, którego sens polega na tym, że ten rodzaj obudowy swym oddziaływaniem zwiększa wytrzymałość górotworu i jego sztywność. Jest to możliwe w obudowie kotwiowej dzięki wstępnemu naprężeniu kotwi, które zwiększa wytrzymałość na przemieszczanie się skał w obszarach nieciągłości oraz efektem iniektażowym u obu kotwi wklejanych.

Udział poszczególnych efektów tej obudowy w procesie stabilizacji i przenoszenia obciążenia zależy od rodzaju stosowanych kotwi, technologii i jej funkcjonalnego wprowadzenia, organizacji wykonywania obudowy w cyklu

drażenia wyrobiska, własności skał i innych parametrów, które trzeba analizować w czasie konkretnego doboru obudowy. Oprócz przedstawionych efektów o charakterze aktywnym należy jeszcze przypomnieć funkcję ochronną tej obudowy w przypadkach, gdy górotwór wokół wyrobiska jest słabo stateczny.

Ze względu na to, że cała problematyka jest znacznie skomplikowana zostały opracowane sposoby obliczania, które w różnym stopniu odzwierciedlają rzeczywiste zachowanie się całego systemu górotwór - obudowa.

Tak więc dla obudowy kotwiowej stosuje się sposoby obliczania oparte na:

- 1) przyjęciu założeń teorii sklepień,
- 2) przyjęciu założeń teorii belki nośnej,
- 3) aplikacji metody elementów skończonych,
- 4) inżynierskich sposobach obliczania, wywodzących się z metod empiryczno-analitycznych,
- 5) wzmacniającej i stabilizującej funkcji obudowy kotwiowej.

## 2. INŻYNIERSKIE METODY DOBORU PARAMETRÓW OBUDOWY KOTWIOWEJ

Obliczenia statyczne obudowy kotwiowej muszą dać odpowiedź na następujące zagadnienia:

- jaka powinna być długość kotwi,
- jak wielka jest powierzchnia (stropu, ociosów) przypadająca na 1 kotew (odstęp między kotwiami).

Klasyczne teorie sklepień rozwiązują te zagadnienia w zależności od warunków naturalnych wyrobiska poprzez ustalenie ciężaru skał w naturalnym sklepieniu ciśnień, przypadającego na 1 kotew. Długość kotwi określa się w zależności od wielkości i zakresu strefy spękań (rys. 1) tak, aby było ważne równanie:

$$L_s = b + L_k + l'$$

gdzie:

- $L_s$  - długość kotwi (m),
- $l$  - długość wystającej części kotwi (0,1-0,15 m),
- $b$  - wysokość strefy spękań górotworu (m),
- $L_k$  - długość zakotwienia części kotwi określona z obliczeń wytrzymałości kotwi (wytrzymałość w stanie zakotwienia).

Ważnym problemem jest określenie wielkości strefy spękań w stropie oznaczonej symbolem "b". Chociaż istnieje szereg metodyk obliczania tej wielkości, to w ostatnim czasie są stosowane przede wszystkim metody inżynierskie, które oparte są na pomiarach in situ. Matematycznie określa

się zależność funkcyjną mierzonych wartości i mających na nie wpływ czynników, a następnie z tych analiz określa się żądane wielkości.

Inny sposób obliczania wielkości "b", który został oparty na obserwacji szeregu przypadków wyrobisk górniczych podaje Mostkow [3]. Zasięg odprężonej strefy górotworu można określić w przybliżeniu ze wzoru:

$$b = k \cdot l_0,$$

gdzie:

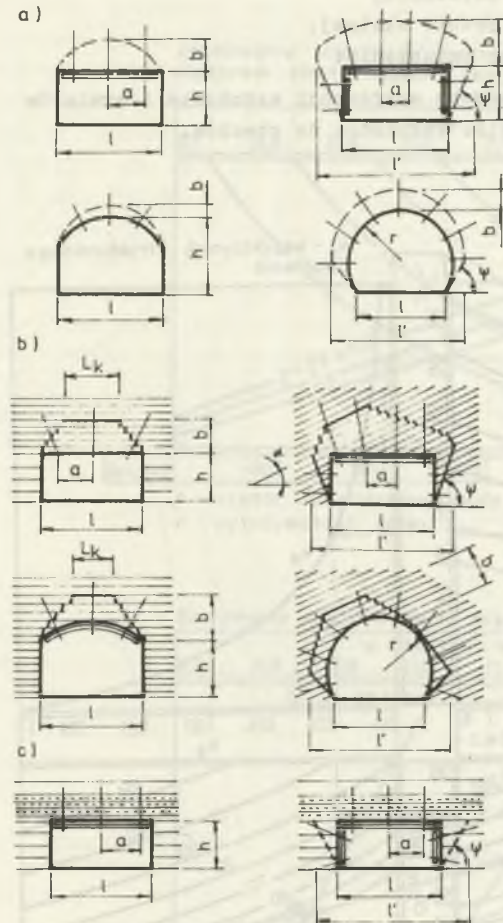
- $l_0$  - rozpiętość sklepienia wyrobiska,
- $k$  - współczynnik proporcjonalności, który jest funkcją charakteru skał [1].

Odstęp między poszczególnymi kotwiami w sklepieniu "a" określa się z szeregu warunków [3]:

- ograniczenie powstawania naprężeń rozciągających lub ścinających u podstawy sklepienia,
- zachowanie spójności skał w kotwionej strefie górotworu,
- zachowanie równości między wytrzymałością kotwi "p", a ciężarem skał w skalnym sklepieniu przypadającym na 1 kotew.

Z ustalonych w ten sposób odstępów między kotwiami wybiega się najmniejszą z obliczonych wartości.

Na rys. 2, 3, 4 przedstawiono nomogramy służące do obliczania parametrów obudowy kotwionej sporządzone w oparciu o podaną metodykę uzupełnioną o uwzględnienie wpływu strukturalnych nieciągłości górotworu na jej wytrzymałość wg wzoru:



Rys. 1. Schematyczne zobrazowanie funkcji kotwi przy obliczeniach wg teorii sklepień w zależności od warunków naturalnych (wg [5])

a - kształt strefy spękań w górotworze jednorodnym, b - jw. w górotworze uwarstwionym, c - przykład przykotwienia stropu bezpośredniego do mocnych warstw leżących powyżej

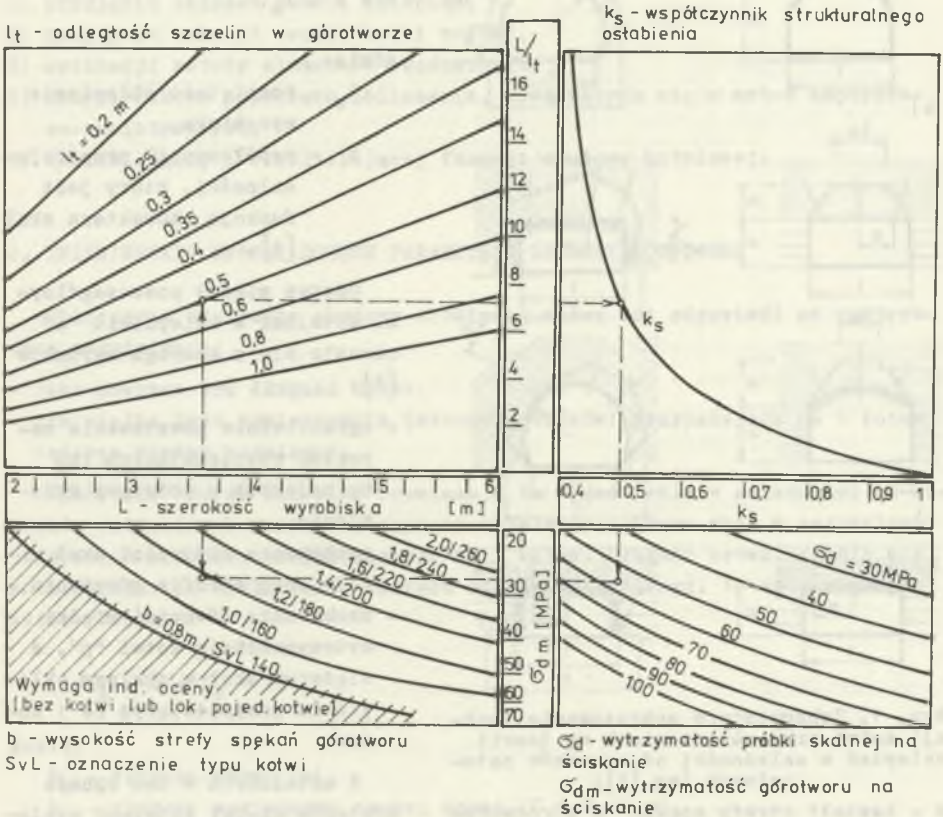
czania parametrów obudowy kotwionej sporządzone w oparciu o podaną metodykę uzupełnioną o uwzględnienie wpływu strukturalnych nieciągłości górotworu na jej wytrzymałość wg wzoru:

$$\sigma_{dm} = k_s \cdot \sigma_d$$

gdzie:

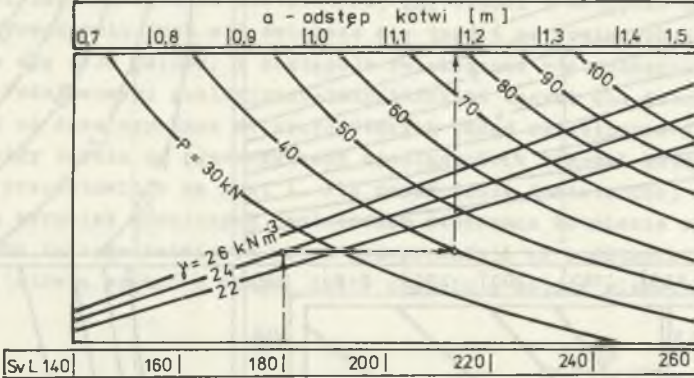
- $\sigma_{dm}$  - wytrzymałość górotworu na ściskanie,
- $\sigma_d$  - wytrzymałość na ściskanie próbki skalnej,
- $k_s$  - współczynnik strukturalnego osłabienia.

Wielkość  $k_s$  jest wyznaczana ze stosunku szerokości wyrobiska i wymiarów bloków skalnych i charakteryzuje m.in. skłonność do obwałów.



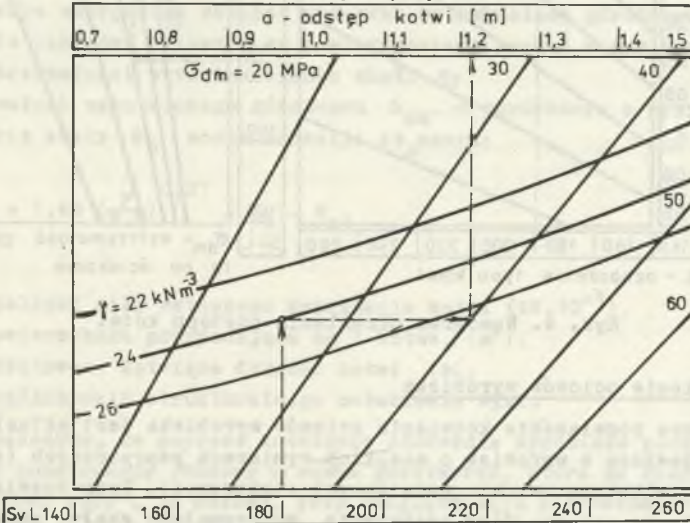
Rys. 2. Nomogram określenia typu kotwi

Zachowanie równowagi między wytrzymałością kotwi a ciężarem strefy spękań przypadającym na jedną kotew



$\gamma$  - ciężar objętościowy skały  
 $P$  - wytrzymałość kotwi

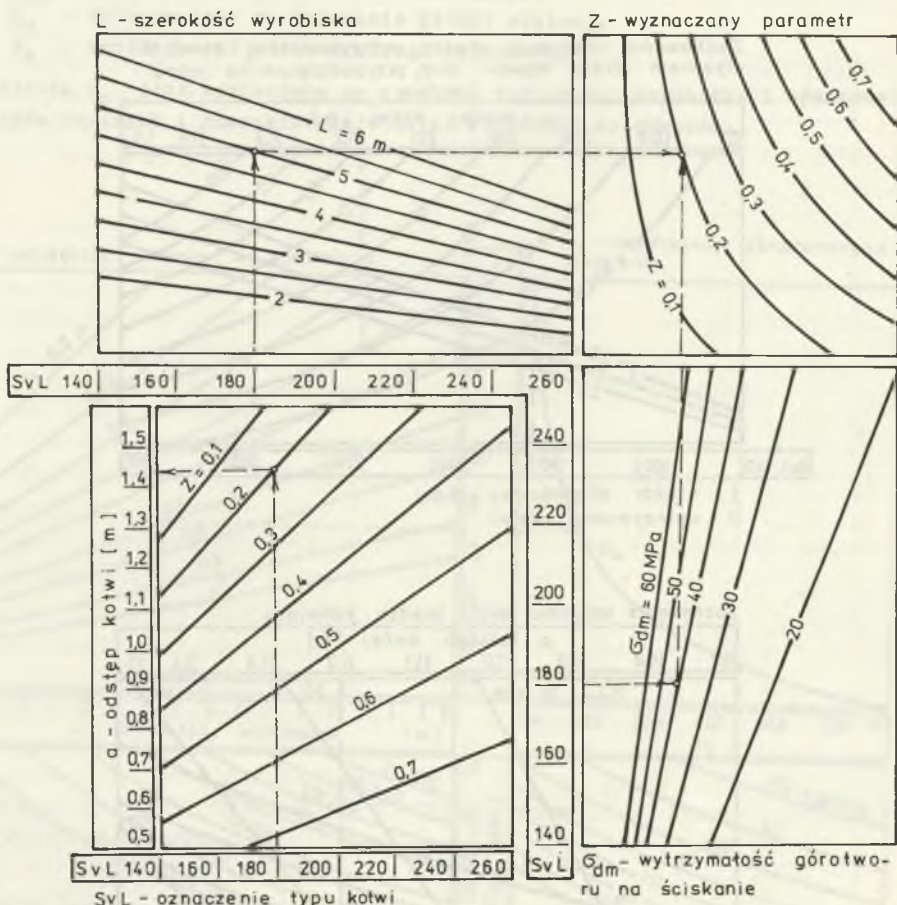
Zachowanie spójności skały między kotwiami



$\gamma$  - ciężar objętościowy skały  
 $\sigma_{dm}$  - wytrzymałość górotworu na ściskanie

Rys. 3. Nomogram określenia odstępów kotwi

Ograniczenie powstawania naprężeń rozciągających i ścinających u podstawy sklepienia wyrobiska



Rys. 4. Nomogram określenia odstępów kotwi

### 2.1. Kotwienie ociosów wyrobiska

Statyczne rozwiązanie kotwienia ociosów wyrobiska jest aktualnym problemem zwłaszcza u wyrobisk o wielkich wymiarach poprzecznych (np. ścian wyrobisk wielkocomorowych, podziemnych elektrowni). Przy rozwiązaniu tego zagadnienia ociosu, jego nachylenie, wytrzymałość skały, charakter i ukierunkowanie płaszczyzn nieciągłości, wytrzymałość na przesunięcie (ściananie) w tych płaszczyznach, działanie wody (obniżenie wytrzymałości na kontakcie płaszczyzn, ciśnienie hydrodynamiczne). Główną przyczyną utraty stateczności ociosów jest ciężar skały. Przed utratą stateczności chroni

wytrzymałość skały, która wprawdzie w większości przypadków jest znaczna, ale bywa pomniejszana poprzez niekorzystne ukierunkowanie płaszczyzn nieciągłości, które zwykle określają powierzchnię ślizgową, po której może dojść do przemieszczenia się bloków skalnych do wyrobiska. Celem kotwienia jest zatem uniemożliwienie tego przemieszczania w taki sposób, że siły wywołujące ruch skał trzeba zlikwidować poprzez sztuczne wprowadzenie siły kotwi zakotwionych na dostatecznej głębokości i wstępnie naprężonych. Dzięki wprowadzeniu tych sił zwiększa się tarcie na powierzchni ślizgowej (zwiększa się siła osiowa) i następuje zwiększenie stateczności ociosu wyrobiska. Podstawowymi geologiczno-inżynierskimi danymi dla doboru obudowy kotwionej są dane uzyskane ze szczegółowych badań szczelinowatości górotworu i siły tarcia na płaszczyznach nieciągłości. Schemat kotwienia ociosów jest przedstawiony na rys. 1. Dla zapewnienia dostatecznej stabilności spągu wyrobisk górniczych jest czasem stosowane kotwienie spągu. Dobór sposobu takiego kotwienia można przeprowadzić na podstawie teorii sklepień (strefa spękań w spągu) lub w oparciu o metodę elementów skończonych.

### 3. DOBÓR OBUDOWY KOTWIONEJ Z UWZGLĘDNIENIEM JEJ FUNKCJI WZMACNIAJĄCEJ

Obliczenia obudowy kotwionej uwzględniające jej funkcję stabilizującą i wzmacniającą są oparte na doświadczeniach, z których wynika, że kotew poprzez swoje naprężenie wstępne zwiększa wytrzymałość górotworu i dzięki zwiększeniu naprężeń osiowych na powierzchniach spękań a tym samym zwiększeniu wytrzymałości przemieszczania skał.

Wytrzymałość zakotwionego górotworu  $\sigma_{mk}$  w porównaniu z pierwotną wytrzymałością skały  $\sigma_d$  można określić ze wzoru:

$$\sigma_{mk} = 1,48 \left( \frac{P}{F \cdot L} \right)^{0,27} \cdot \sigma_d \cdot k_s,$$

gdzie:

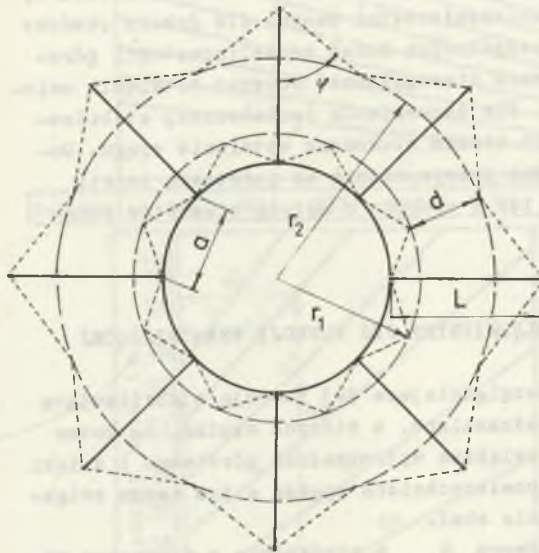
- P - wielkość siły wstępnego naprężenia kotwi ( $kN \cdot 10^{-1}$ ),
- F - powierzchnia przypadająca na 1 kotew ( $m^2$ ),
- l - efektywna, kotwiąca długość kotwi (m),
- $k_s$  - współczynnik strukturalnego osłabienia skał.

Jeśli założymy, że poprzez kotwienie otoczenia wyrobiska podziemnego wytworzymy konstrukcję obudowy w samym górotworze, która ma charakter "grubościennej rury", to możemy, przy uwzględnieniu nierównomierności obciążenia, określić jej wytrzymałość ze wzoru (rys. 5)

$$p' = 0,2 \cdot \left( \frac{P}{F \cdot L} \right)^{0,27} \cdot \sigma_d \cdot k_s \left[ 1 - \frac{(r_o + s)^2}{(r_o + l - s)^2} \right],$$

gdzie:

- $p'$  - wytrzymałość (podporność) "obudowy" wytworzonej w górotworze dzięki kotwieniu [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ],
- $r_0$  - promień wyrobiska w wyłomie (m),
- $s$  - wysokość sklepienia skalnego w kotwionym górotworze (nieefektywna strefa wzmocnienia) (m),
- $l$  - efektywna, kotwiąca długość kotwi (m).



Rys. 5. Schemat obudowy utworzonej poprzez kotwienie wokół wyrobiska z uwzględnieniem wzmacniającej funkcji kotwi

Wielkość  $s$  określa się ze stosunku:

$$s = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \varphi,$$

gdzie:

- $a$  - odległość między kotwiami (odstęp) (m),
- $\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznej skały.

Przy uwzględnieniu stabilizującego działania kotwi  $p_k$  w wyrobisku podziemnym:

$$p_k = \frac{p}{F}$$

można wytrzymałość obliczeniową tej obudowy określić ze wzoru:

$$p' = 0,2 \cdot \left( \frac{p}{F \cdot I} \right)^{0,27} \cdot \sigma_d \cdot k_s \left[ 1 - \frac{(r_0 + s)^2}{(r_0 + l - s)^2} \right] + 0,15 \cdot \frac{p}{F} \left[ 1 + \frac{(r_0 + s)^2}{(r_0 + l - s)^2} \right]$$

Stateczność obudowy będzie zapewniona, gdy prawdziwe będzie wyrażenie:

$$p' \geq p,$$

gdzie:

- $p$  - naprężenie na wewnętrznej powierzchni konstrukcji skalnej tworzącej wzmocniony pierścień może być określone z warunku:



$$\frac{r_0 + l - s}{R} = 1,$$

gdzie:

$R$  - promień strefy zruszonych skał w pobliżu wyrobiska, przy wykorzystaniu jednej z teorii parcjtalnej stateczności [1].

Naprężenie  $p$  jest zatem stabilizującą reakcją na obwodzie otworu o promieniu  $a = r_0 + l - s$ .

Tak na przykład wg Talobra dla określenia wielkości  $p$  jest ważny wzór:

$$p = (\gamma \cdot H \cdot \frac{1}{1-\mu} + c \cdot \operatorname{ctg}\varphi) (1 - \sin\varphi) - c \cdot \operatorname{ctg}\varphi,$$

gdzie:

$H$  - głębokość wyrobiska względem powierzchni,

$\gamma$  - ciężar objętościowy skały,

$\mu$  - liczba Poissona dla skały,

$c$  - kohezja skały,

$\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznej skały.

#### 4. ZAKOŃCZENIE

Artykuł jest poświęcony problematyce inżynierskich metod obliczania obudowy kotwiowej. Ich stosowanie jest podyktowane potrzebą uproszczenia postępowania przy doborze i aplikacji obudowy kotwiowej i zachowaniu przy tym dostatecznej granicy pewności. Dlatego wielkości uzyskane z dokładnych obliczeń matematycznych są korygowane współczynnikami uzyskanymi w sposób empiryczny. Współczynniki te kompensują wpływ czynników naturalnych i uproszczenie modelu matematycznego.

#### LITERATURA

- [1] Aldorf J., Exner K., Škrabiš A.: Stabilita a vyztužování dlouhých důlních děl. SNTL, Praha 1979.
- [2] Krawczenko G.I.: Oblegiennyje krepki wertikalnych wyrobotok. Niedra, Moskwa 1974.
- [3] Mostkow W.M.: Podzemnyje sooruzenijsa bolszego seczienia. Niedra, Moskwa 1974.
- [4] Aldorf J., Exner K.: Studie návrhu výztuže VPV - 2,4 m. VSB, Ostrava 1977.
- [5] Bakłaszow I.W., Timofiejew O.W.: Konstrukcji i rascziot krepiej i obiedielok. Niedra, Moskwa 1979.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław Chudek

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1984 r.

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ПОВОДУ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ  
РАСЧЕТА АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Работа посвящена проблематике подбора анкерного крепления для подземных горных выработок при помощи некоторых т.н. инженерных методов с использованием основ теории горных потолочных систем и основ подкрепления горообразования анкерами с предварительной нагрузкой. Приведены номограммы и формулы для расчетов анкерного крепления.

THE CONTRIBUTION TO ENGINEERING METHODS  
OF ROOF BOLTS CALCULATION

S u m m a r y

The article describes problems of roof bolts selection for the underground mining workings by means of some, so called, engineering methods with the use of the rock roof theory principles and the principles of strengthening the rock with anchors with an initial-stress. Nomographs and formulae for the roof bolting calculation have been presented.