ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1987

Seria: GÓRNICTWO z. 145 Nr kol. 885

Zdzisław GERGOWICZ

Marek LESZCZYŃSKI

Instytut Geotechniki
Politechniki Wrocławskiej

CIŚNIENIE GÓROTWORU NA OBUDOWY WYROBISK ZLOKALIZOWANYCH NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH

Streszczenie. Wzięto pod uwagę wyrobiska korytarzowe, przebiegające w słabych górotworach na dużych głębokościach. Specjalną uwagę zwrócono na te przypadki, w których skały budujące ociosy są słabe lub bardzo słabe. Podano analizę zmian zachodzących w górotworze wokół wyrobiska oraz rozpatrzono kształt i rozwój strefy rozluźnionej. Rozważano możliwość wytworzenia się stanu równowagi granicznej układu: obudowa-górotwór. Za podstawę przyjęto warunek przemieszczeniowy. Dokonano próby określenia wielkości przemieszczeń, warunkujących utworzenie się strefy rozluźnionej o odpowiednio dużym zasięgu, by w jej obszarze mógł wystąpić stan równowagi granicznej. Opierając się na analizie znanych hipotez, przyjęto taki schemat obliczeniowy, uwzględniający wpływ przemieszczeń, który pozwoliłby na wyznaczenie ciśnień działających na obudowę. Podstawę tego schematu stanowi założenie, że sklepienie nośne powstałe nad wyrobiskiem górniczym powinno zamykać się w strefie rozluźnionej. Przyjmując, zgodnie z Sałustowiczem, eliptyczny kształt tej strefy określa się wielkość pionowej osi elipsy ze wzoru:

$$a = h + \frac{w}{2},$$

przy czym zgodnie z hipotezą Protodiakonowa:

$$h = \frac{l + w\,tg(45 + \varnothing/2)}{tg\varnothing},$$

gdzie:

w – wysokość wyrobiska,

l – połowa szerokości wyrobiska,

$\varnothing$ – kąt tarcia wewnętrznego rozluźnionej skały.

Połowę poziomej osi elipsy określającej strefę rozluźnioną wyznacza się ze wzoru:

$$b = \frac{2l\cos\varnothing + w(2 - \sin\varnothing)}{[\alpha(m-1) + m - 2]\sin\varnothing},$$

gdzie:

$\alpha = R_c : p_z$,

R_c – wytrzymałość skał na rozciąganie,

p_z – pierwotne naprężenie pionowe,

m – liczba Poissona.

Warunkiem powstania sklepienia nośnego jest pionowe przemieszczenie skał do wyrobiska. Zgodnie z hipotezą Kommerella wielkość tego przemieszczenia określa wzór:

$$s_z = \frac{\left[1 + w\,tg(45 - \varnothing/2)\right]}{100\ tg\varnothing}$$

gdzie δ - współczynnik rozluźnienia [%].
Przemieszczeniu temu będzie towarzyszyć przemieszczenie poziome

$$s_x = \left\{ \frac{2l\ \cos\varnothing + w(2 - \sin\varnothing)}{\left[\alpha(m-1) + m - 2\right]\sin\varnothing} - 1 \right\} \frac{\delta}{100}$$

Gdy zostaną spełnione wspomniane wyżej warunki, na obudowę będzie działać ciśnienie statyczne zgodnie z hipotezą Protodiakonowa. W przypadku gdy przemieszczenia skał nie osięgną koniecznych wartości, ciśnienie na obudowę będzie duże. Można to ciśnienia określić za pomocą wzoru Terzaghiego wprowadzając liniową zależność pomiędzy rzeczywistymi przemieszczeniami a wielkością strefy rozluźnionej.

1. WSTĘP

Większość hipotez, dotyczęcych wtórnego lub, inaczej mówięc, statycznego ciśnienia górotworu na obudowy wyrobisk, prowadzi w końcowej konkluzji do stwierdzenia, że ciśnienie to jest niezależne od głębokości, na jakiej wyrobisko zostało zlokalizowane. Tego rodzaju konkluzja staje się zrozumiała, jeśli uwzględni się fakt, że w większości przypadków hipotezy te oparte sę na warunku stanu równowagi granicznej górotworu, a nie układu obudowa-górotwór. Rzecz jednak charakterystyczna, że właściwie żadna z tych hipotez nie wymienia wszystkich warunków, które muszę być spełnione, by wspomniany stan równowagi granicznej mógł zaistnieć. Dla przykładu wystarczy wspomnieć dwie ogólnie znane hipotezy sklepienia ciśnień, mianowicie Sałustowicza i Protodiakonowa. Zarówno jedna, jak i druga pomijają całkowitym milczeniem tak istotny w odniesieniu do stanu równowagi granicznej warunek, jakim jest wystąpienie odpowiednich przemieszczeń górotworu w najbliższym sąsiedztwie wyrobiska. Zakłada się po prostu, że takie przemieszczenia na pewno wystąpię.

2. PRZEBIEG ZMIAN W GÓROTWORZE WOKÓŁ WYROBISKA KORYTARZOWEGO

Z przedstawionym wyżej ujęciem omawianego zagadnienia można by się do pewnego stopnia zgodzić, lecz jedynie w odniesieniu do skał mocnych. W takich skałach strzałka sklepienia ciśnień, a zatem również strefa rozluźniona są nieduże, stęd też przemieszczenia, wywołane odprężeniem i rozluźnieniem sę niewielkie. Poza tym ten typ skał posiada zwykle wiele cech, charakterystycznych dla ośrodków sprężysto-kruchych, stęd też można przyjęć, że zarówno odkształcenia, jak i spowodowane nimi przemieszczenia wystąpię stosunkowo szybko. Czas pomiędzy wykonaniem wyrobiska i ustawieniem obudowy może być w takim przypadku dostatecznie duży, by wystąpił stan równowagi granicznej w naruszonym górotworze.

Zastrzeżenia natomiast rodzą się z tą chwilą, gdy pod uwagę weźmiemy skały słabe i bardzo słabe, a zwłaszcza, gdy słabe skały tworzą ociosy wyrobiska. W celu bliższego wyjaśnienia tego problemu rozpatrzmy go na przykładzie dowolnego wyrobiska prostokątnego. Zgodnie z ogólnie znanymi wzorami, określającymi stan naprężenia na obrysie wyrobiska, proces zniszczenia, równoznaczny z odprężeniem i rozluźnieniem, może się rozpocząć albo w stropie, albo w ociosach. Może też wystąpić równocześnie i w stropie i w ociosach. Bez względu jednak na to, skąd wspomniany proces weźmie swój początek, wokół wyrobiska wytworzy się strefa rozluźniona, przejawiająca się zwykle licznymi spękaniami, a w przypadku skał słabych wręcz rozdrobnieniem materiału skalnego. Kształt i wielkość tej strefy opisuje, między innymi, hipoteza Sałustowicza. Z tej hipotezy wynika, że strefa odprężona i rozluźniona ma kształt elipsy, przy czym stosunek półosi tej elipsy wyrażony jest poprzez dwa odrębne kryteria stateczności wyrobiska. Kryteria te, opisane dwoma wzorami, warto przytoczyć:

$$\frac{a}{b} = \frac{R_r + p_z - p_x}{2p_x}, \tag{1}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{2p_z}{R_c - p_z + p_x}, \tag{2}$$

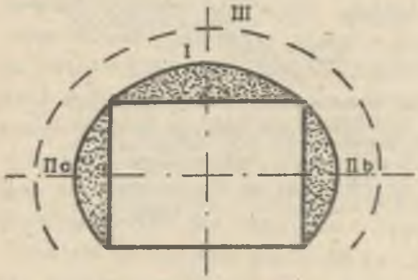
gdzie:

- a – półoś pionowa elipsy,
- b – półoś pozioma elipsy,
- R_r – wytrzymałość skały na rozciąganie,
- R_c – wytrzymałość skały na ściskanie,
- p_z i p_x – naprężenia pierwotne w górotworze, pionowe i poziome.

Pierwszy z przytoczonych wyżej wzorów oparty jest na warunku stateczności stropu, drugi natomiast związany jest z wytrzymałością ociosów.

Po przeprowadzeniu dokładniejszej analizy hipoetezy Sałustowicza [1] dochodzi się do wniosku, że podstawowe znaczenie ma kryterium określone wzorem (2). Wynika to z faktu, że kryterium to decyduje o zasięgu strefy rozluźnionej oraz o jej ewentualnym postępującym rozwoju. Kryterium pierwsze natomiast określa jedynie kształt tej strefy, tzn. wyraża za pomocą wzoru (1) wzajemny stosunek obu półosi elipsy, strefę tę ograniczającej.

Jeśli chodzi o zasięg i stopniowy rozwój strefy rozluźnionej, to najlepiej można prześledzić ten proces na przyjętym już uprzednio przykładzie wyrobiska prostokątnego. W przypadku odpowiednio mocnych skał ociosowych wykonanie wyrobiska spowoduje, jeśli przekroczona zostania wytrzymałość skał stropowych na rozciąganie, utworzenie się sklepienia ciśnień (rys. 1). Będzie nim znany z hipotezy Sałustowicza odcinek I elipsy, wyznaczonej wzorem (1). Strefa rozluźniona, ograniczona wspomnianym odcinkiem elipsy, pojawi się jedynie w stropie, w którym jednocześnie wystąpi stan równowagi granicznej. Jeśli jednak naprężenia w ociosach okazałyby się większe niż wytrzymałość skały na ściskanie, wówczas również w ociosach, jako następstwo częściowego ich zniszczenia, pojawi się strefa rozluźniona. Strefa ta będzie ograniczona dalszymi odcinkami IIa i IIb (rys. 1) tej samej co poprzednio elipsy.



Rys. 1. Rozwój strefy rozluźnionej wokół wyrobiska prostokątnego

Fig. 1. Development of loose zone around rectangular heading

Rzecz jednak w tym, że powstała w ten sposób strefa rozluźniona może nie stanowić zakończenia procesu zmian, zachodzących w górotworze wokół wyrobiska. Zakończenie tych zmian wystąpi jedynie wtedy, gdy stosunek półosi elipsy, o której mowa wyżej, będzie większy lub co najwyżej równy stosunkowi wynikającemu ze wzoru (2). W przeciwnym wypadku strefa rozluźnienia będzie się stopniowo powiększać. Będzie to następstwem faktu, iż naprężenia w tych partiach ociosów, które znajdują się bezpośrednio za strefą rozluźnioną i spękaną, nie zmniejszają się. Następuje zatem dalszy proces ich niszczenia, powodujący powiększenie się półosi poziomej b. Powiększa się tym samym również i półoś pionowa a, gdyż stosunek tych półosi jest zdeterminowany wytrzymałością na rozciąganie skał stropowych, tzn. określony równaniem (1). W rezultacie tworzy się nowa, o większym zasięgu, lecz o takim samym jak poprzednia kształcie, strefa rozluźniona, której granice wyznacza elipsa III (rys. 1). Ponieważ nie ulegającemu zmianom kształtowi elipsy strefy rozluźnionej towarzyszą stale te same naprężenia na jej obrysie, stąd proces niszczenia ociosów będzie trwał nadal, powodując w ten sposób stałe powiększanie się obszaru rozluźnionego, spękanego i pokruszonego.

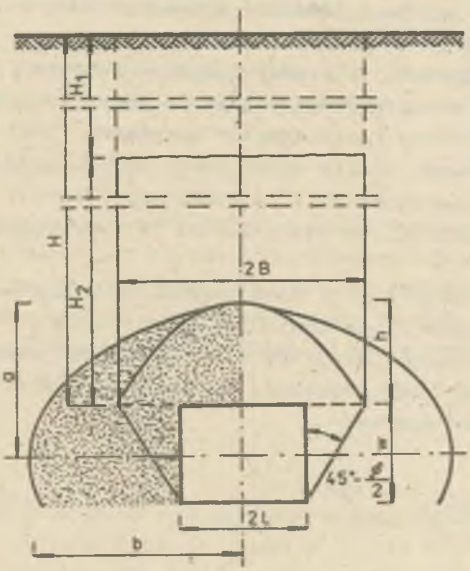
Jest rzeczą oczywistą, że odprężeniu, rozluźnieniu i spękaniom skały towarzyszyć musi wzrost objętości rozdrobnionego w ten sposób masywu. Ten wzrost objętości znajdzie swoje odbicie w przemieszczaniach, które mogą mieć jeden kierunek, mianowicie do wnętrza wyrobiska. Jeśli zatem przyjmiemy, że strefa rozluźniona stale się powiększa, to równocześnie musimy się pogodzić z faktem stopniowego wzrostu przemieszczeń i postępującego zaciskania wyrobiska. Teoretycznie rzecz biorąc oznacza to, że proces tałego rozwoju strefy rozluźnionej zakończy się dopiero z chwilą całkowitego wypełniania wyrobiska rumoszem skalnym.

Opisanym wyżej efektem końcowym zmian, zachodzących wokół wyrobiska, nie ma potrzeby bliżej się zajmować, gdyż z praktycznego punktu widzenia jest on pozbawiony sensu. Wiadomo przecież, że proces, o którym mowa wyżej, zostaje z reguły zakończony przez wprowadzenie do wyrobiska odpowiedniej obudowy. Rzecz jednak w tym, że wprowadzenie do rozpatrywanego uprzednio układu nowego, współdziałającego elementu rodzi nowe problemy o bardzo istotnym znaczeniu. Problemy te można sprowadzić do odpowiedzi na następujące pytania: Czy wprowadzenie obudowy może spowodować wystąpienie stanu równowagi granicznej ośrodka, objętego strefą rozluźnioną? W jakim momencie rozwoju strefy rozluźnionej należy obudowę wprowadzić? Jaka powinna być nośność zastosowanej obudowy i jaką sztywnością lub podatnością winna się ona charakteryzować? Jakie będzie ciśnienie górotworu, działającego na tę obudowę?

Jak widać, wszystkie te pytania mają podstawowe znaczenie w odniesieniu do praktyki górniczej.

3. STAN RÓWNOWAGI UKŁADU OBUDOWA-GÓROTWÓR

Pragnąc odpowiedzieć na postawione wyżej pytania, przeanalizujmy całość zagadnienia na wykorzystanym już uprzednio przykładzie wyrobiska prostokątnego. Załóżmy, że wykonane ono zostało w słabych skałach, a zwłaszcza słabe były skały ociosowe i że wokół tego wyrobiska wytworzyła się strefa rozluźniona, wypełniona spękanym i pokruszonym materiałem skalnym (rys. 2). Załóżmy dalej, że wspomniana strefa rozluźniona jest na tyle duża, by wstawiona do wyrobiska obudowa mogła spowodować utworzenie się nad tym wyrobiskiem sklepienia ciśnień. Jeśli przyjmiemy, że w strefie rozluźnionej mamy do czynienia z ośrodkiem rozdrobnionym, o charakterystyce wytrzymałościowej określonej kątem tarcia wewnętrznego ϕ, wówczas kształt i rozmiary wspomnianego sklepienia odpowiadać będą warunkom sprecyzowanym w ogólnie znanej hipotezie Protodiakonowa. Zgodnie z tą hipotezą sklepienie będzie miało kształt paraboli o strzałce w osi wyrobiska



Rys. 2. Schematy obliczeniowe, oparte na hipotezach Protodiakonowa i Terzaghiego

Fig. 2. Calculation scheme based on Protodiakonow and Terzagny hypotheses

$$h = \frac{B}{f}, \tag{3}$$

gdzie:

$$B = l + w\,tg(45 - \phi/2); \qquad f = tg\phi; \tag{4}$$

oraz:

h - strzałka sklepienia ciśnień,

l - połowa szerokości wyrobiska,

w - wysokość wyrobiska,

ϕ - kąt tarcia wewnętrznego spękanej i pokruszonej skały.

Niestety, Protodiakonow nie precyzuje warunków, jakie muszą zaistnieć, by w rozpatrywanym układzie wystąpił stan równowagi, pozwalający na zastosowanie wzoru (3). Równocześnie stwierdza w sposób jednoznaczy, że obudowa przenosi jedynie ciężar spękanych mas skalnych zawartych poniżej sklepienia ciśnień oraz w obu ociosowych klinach odłamu (rys. 2). Stwierdzenie tego rodzaju jest jednak równoznaczne z przyjęciem, że w strefie rozluźnionej wystąpił pewien stan równowagi granicznej ośrodka rozdrobnionego.

Stwierdzenie Protodiakonowa budzi poważne wątpliwości w świetle rozważań na temat przemieszczeń i ich roli, jaką odgrywają w odniesieniu do zmian, zachodzących w górotworze po wykonaniu wyrobiska. Chodzi w tym przypadku o wpływ obudowy. Zadaniem jej jest przecież zahamowanie narastających przemieszczeń, a zatem współpracuje ona z górotworem. W tego rodzaju sytuacji należy górotwór i obudowę traktować łącznie, a to od razu implikuje przypuszczenie, że w rozpatrywanym przypadku mamy do czynienia nie za stanem równowagi granicznej rozluźnionego górotworu, lecz z ogólności ze stanem równowagi pewnego, ściśle określonego układu obudowa-górotwór. Jeśli zaś tak jest w rzeczywistości, to rodzi się pytanie, czy nie muszą być spełnione pewne warunki, by stwierdzenie Protodiakonowa miało realne uzasadnienie.

W celu wyjaśnienia tej kwestii rozpatrzmy to samo zagadnienie, posługując się inną, analogiczną tematycznie, lecz odmiennie skonstruowaną hipotezą, mianowicie hipotezą Terzeghiego. Przyjęty w tym przypadku układ obliczeniowy przedstawia rys. 2. Ciśnienie górotworu na obudowę, występujące w osi wyrobiska, wyrażone jest wzorem:

$$\sigma_z = \frac{\gamma B - c}{\lambda_0 tg\phi}\left(1 - e^{-\lambda_0 n tg\phi}\right) + \gamma H_1 e^{-\lambda_0 n tg\phi}, \tag{5}$$

gdzie

$$n = \frac{H_2}{B}; \qquad \lambda_0 = \frac{1}{m - 1}$$

oraz:

- B - szerokość obliczeniowa wyrobiska wg wzoru (4),
- γ - ciężar objętościowy rozluźnionego górotworu,
- ϕ - kąt tarcia wewnętrznego,
- c - spójność,
- m - współczynnik Poissona,
- H_1 - grubość nadkładu poza strefą odprężoną,
- H_2 - grubość strefy ulegającej stopniowemu odprężeniu,
- l i w - jak poprzednio.

Dla bardziej wyrazistego przedstawienia mechanizmu działania założonego układu obliczeniowego wprowadźmy pewne uproszczenia do wzoru (5). Przyjmijmy zatem, że: spójność rozpatrywanego ośrodka spękanego $c = 0$, współczynnik Poissona $m \approx 2$, stąd $\lambda_o = 1$, $tg\phi = f$. Po uwzględnieniu powyższych zależności wzór (5) przybierze postać:

$$\sigma_z = \gamma \frac{B}{f}(1 - e^{-nf}) + \gamma H_1 e^{-nf} \tag{6}$$

Terzaghi stwierdza, że wartość H_2, tzn. położenie granicy dwóch stref, nie naruszonej i tej, która ulega stopniowemu odprężeniu, uzależniona jest od przemieszczeń górotworu w głąb wyrobiska. Gdy przemieszczenie to jest równe zero, wówczas $H_2 = 0$, $n = 0$, $H_1 = H$, a stąd

$$\sigma_z = \gamma H, \tag{7}$$

czyli, że obciążenie obudowy jest równe pierwotnemu naprężeniu pionowemu. Jeśli natomiast wspomniane przemieszczenia są na tyle duże, że zarówno H_2, jak i w konsekwencji wykładnik n osiągną odpowiednio wysoką wartość, wówczas możemy, praktycznie rzecz biorąc, oba człony równania (6), ujęte funkcją wykładniczą, pominąć. W takim przypadku równanie to sprowadzi się do postaci:

$$\sigma_z = \gamma \frac{B}{f}, \tag{8}$$

a zatem do wyrażenia zgodnego z pełni z hipotezą Protodiakonowa. Tym razem sytuacja jest jednak o tyle różna od poprzedniej, że obecnie mamy sprecyzowane pewne warunki, które muszą być spełnione, by tego rodzaju ewentualność zaistniała.

4. WARUNKI PRZEMIESZCZENIOWE RÓWNOWAGI UKŁADU OBUDOWA-GÓROTWÓR

Przypatrzmy się kolejno wspomnianym wyżej warunkom. Pierwszy z nich mówi o tym, iż w stropie i ociosach muszą wystąpić pewne przemieszczenia, by wokół wyrobiska mogła powstać rozluźniona strefa mocno spękanych i pokruszonych skał. Z warunku drugiego wynika, że przemieszczenia te muszą być na tyle duże, by uzależniony od nich zasięg tej strefy umożliwiał wytworzenie się w jej obszarze stanu równowagi granicznej układu, określonego hipotezą Protodiakonowa. Trzeci warunek dotyczy obudowy, a konkretnie czasu jej ustawienia i jej nośności. Wynika z niego, że obudowę należy ustawiać w momencie, gdy wielkość przemieszczeń górotworu do wnętrza wyrobiska osiągnie swą optymalną, sprecyzowaną wyżej wartość. Natomiast nośność obudowy powinna być na tyle duża, by mogła ona przenieść ciężar rozdrobnionego materiału skalnego, ograniczonego od góry sklepieniem ciśnień, a z boków klinami odłamu.

Spełnienie powyższych postulatów spowoduje odprężenie nie naruszonego masywu górotworu, zalegającego nad wyrobiskiem powyżej elipsy ograniczającej strefę rozluźnioną. Pozwoli to tym samym na przyjęcie odpowiednio dużej wartości H_2, eliminującej wpływ głębokości zalegania wyrobiska - o czym była mowa uprzednio. Jednocześnie brak możliwości dalszych przemieszczeń ociosów ku środkowi wyrobiska wywoła w ich częściach niespękanych, znajdujących się bezpośrednio poza elipsą strefy rozluźnionej, trójosiowy stan naprężenia. Ten trójosiowy stan naprężenia zahamuje w sposób skuteczny dalsze niszczenie i kruszenie się tych partii ociosów, a zatem ustabilizuje zasięg strefy rozluźnionej. Jest to równoznaczne ze statecznością całego układu i możemy wówczas ciśnienie górotworu na obudowę określić jako tzw. wtórne lub statyczne.

Jeśli natomiast opisane warunki nie zostaną zachowane, tzn. gdy przemieszczenia nie będą dostatecznie duże, wówczas wytworzy się strefa o zbyt małym zasięgu. Ponieważ górotwór dążyć będzie w sposób naturalny do powiększenia tej strefy, stąd wstawiona do wyrobiska obudowa, hamująca proces narastania przemieszczeń, poddana zostanie ciśnieniom deformacyjnym, dynamicznym. Ciśnienia te, z reguły wysokie, zwłaszcza na dużych głębokościach, bo są związane z naprężeniami pierwotnymi, powodują zwykle zniszczenie tej obudowy.

Z analizy całości powyższych rozważań wynika dość jednoznaczny wniosek. Sprowadza się on do stwierdzenia, że w rozpatrywanym problemie decydującą rolę odgrywa sprawa przemieszczeń. Mielibyśmy zatem do czynienia w zasadzie z jednym tylko warunkiem, mianowicie warunkiem typu przemieszczeniowego. Trzeba sobie wyraźnie powiedzieć, że należało się tego spodziewać, gdyż nie jest to nic nowego. Wpływ odprężenia i rozluźnienia górotworu i jego przemieszczenia się do wyrobiska na wielkość ciśnienia działającego na obudowę jest od dawna znany praktyce górniczej i był wielokrotnie rozpatrywany teoretycznie. Praktyka górnicza radzi sobie z tym problemem, stosując obudowy podatne, a gdy to zawiedzie, przeprowadza się prosty zabieg techniczny. Polega on na wymianie zaciśniętej obudowy przy jednoczesnej przybierce ścian i stropu wyrobiska. Bywa i tak, że zabieg ten trzeba wykonać kilka razy, by wyrobisko się ustabilizowało. Jeśli natomiast chodzi o rozważania teoretyczne to, niestety, ograniczają się one z reguły do strony jakościowej problemu, nie przedstawiając żadnych danych ilościowych, dotyczących związków pomiędzy przemieszczeniem i ciśnieniem.

Nakreślona wyżej sytuacja wskazuje dość jasno na trudności, z którymi musi się uporać konstruktor, projektujący obudowę wyrobiska. Jego zadaniem jest przecież zaprojektowanie obudowy zarówno dostatecznie mocnej, jak też wystarczająco podatnej, gdyż obie te właściwości obudowy, jak wynika z uprzednich rozważań, są ze sobą integralnie związane i wzajemnie się uzupełniają. Im obudowa sztywniejsza, tym jej nośność musi być większa i odwrotnie. By konstruktor mógł postawione przed nim zadanie rozwiązać, musi znać ilościowe, a nie tylko jakościowe, związki wiążące wielkość ciśnienia górotworu na obudowę z przemieszczeniami tegoż górotworu do wnętrza wyrobiska. W każdym razie, powinien on przynajmniej znać wartość tych, określonych jako optymalne, przemieszczeń, które umożliwiają uzyskanie ciśnień typu statycznego. Powstaje zatem pytanie, w jaki sposób można wspomniane wartości wyznaczyć.

Wśród wielu hipotez, operujących pojęciem sklepienia ciśnień, jest tylko jedna wiążąca zasięg tego sklepienia z przemieszczeniami górotworu. Autorem jej jest Kommerell. Zaproponowane przez niego wyrażenie, określające strzałkę sklepienia ciśnień jest bardzo proste i ma postać:

$$h = \frac{100\ s}{\delta}, \tag{9}$$

gdzie:

h - strzałka sklepienia ciśnień,

s - przemieszczenie w osi stropu,

δ - współczynnik rozluźnienia górotworu wyrażony w procentach.

Wzór (9) możemy wyrazić względem przemieszczenia s, mianowicie [2]:

$$s = \frac{h\delta}{100} \tag{10}$$

Oznacza to, że jesteśmy w stanie wyznaczyć wartość przemieszczeń, związaną z zasięgiem pewnej, konkretnej strefy rozluźnienia - a przecież o to chodziło.

Wzór (10) możemy wykorzystać w stosunkowo prosty sposób, pod warunkiem jednak, że będziemy znali charakterystykę geotechniczną górotworu otaczającego wyrobisko. Musimy zatem znać jego wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przed zniszczeniem, natomiast po zniszczeniu - ciężar objętościowy rozkruszonej, spękanej i rozluźnionej skały, jej kąt tarcia wewnętrznego oraz współczynnik rozluźniania. Mając ta dane oraz rozmiary wyrobiska, możemy łatwo ustalić kształt i wymiary układu obudowa-górotwór, wynikającego z hipotezy Protodiakonowa. To z kolei pozwoli nam na wyliczenie za pomocą wzoru (1) obu półosi elipsy, ograniczającej na tyle obszerną strefę rozluźnioną, by objemowała ona swym zasięgiem wspomniany uprzednio układ obliczeniowy. Znając rozmiary obu półosi, możemy wyliczyć szukane wielkości przemieszczeń, posługując się w tym celu bardzo prostymi wzorami:

$$s_z = \frac{(a - w/2)\delta}{100} \tag{11}$$

$$s_x = \frac{(b - l)\delta}{100}, \tag{12}$$

gdzie:

s_z - przemieszczenie pionowe,

s_x - przemieszczenie poziome, pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

Ze wzorów (11) i (12) wynika, że wielkości przemieszczeń są w dużym stopniu zależne od rozmiarów półosi elipsy. Wiadomo jednak również, że na te rozmiary ma wpływ geometria i wielkość protodiakonowskiego układu obliczeniowego. Wypływa stąd wniosek, że przemieszczenia pionowe i poziome powinny zależeć od kształtu i rozmiarów wyrobiska. Bardzo łatwo można wykazać, że tak jest istotnie. Przyjmijmy np., że półoś pionowa a musi zawierać w sobie strzałkę sklepienia ciśnień oraz połowę wysokości wyrobiska, tzn.:

$$a = h + w/2 \tag{13}$$

Wykorzystując wzór (3) i zależności (4), możemy długość półosi pionowej wyrazić wzorem:

$$a = \frac{B}{f} + \frac{w}{2} = \frac{l + w\ \mathrm{tg}(45 - \phi/2)}{\mathrm{tg}\phi} + \frac{w}{2} \tag{14}$$

Jeśli wyrażenie (14) wstawimy do (11), to otrzymamy:

$$s_z = \frac{\left[l + w\ \mathrm{tg}(45 - \phi/2)\right]}{100\ \mathrm{tg}\phi} \tag{15}$$

Wyrażenie (15) wykazuje dostatecznie jasno, że przemieszczenie pionowe w wypadku ośrodka o określonym kącie tarcia wewnętrznego oraz współczynniku rozluźnienia zależy wyłącznie od rozmiarów wyrobiska. Nie ma natomiast żadnego wpływu głębokość zlokalizowania tego wyrobiska.

Inaczej przedstawia się sprawa przemieszczeń poziomych. Półoś poziomą elipsy b możemy wyrazić poprzez półoś pionową a za pomocą wyrażenia (1). Wówczas:

$$b = \frac{2ap_x}{R_r + p_z - p_x}, \tag{16}$$

a gdy uwzględnimy liczbę Poissona m

$$b = \frac{2a}{\frac{R_r}{p_z}(m - 1) + m - 2} \tag{17}$$

Po wstawieniu do (17) zależności (13) i po przeprowadzeniu prostych operacji matematycznych wartość b wyrazi się wzorem:

$$b = \frac{2l\cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{\left[\frac{R_r}{p_z}(m - 1) + m - 2\right]\sin\phi} \tag{18}$$

Jeśli zaś wyrażenie (18) wstawimy do (11), to wówczas przemieszczenie poziome określać będzie wzór:

$$s_x = \left\{\frac{2l\cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{[\alpha(m - 1) + m - 2]\sin\phi} - 1\right\}\frac{\delta}{100}, \tag{19}$$

gdzie:

$$\alpha = R_r : p_z$$

Z powyższego widać, że na przemieszczenia poziome mają wpływ nie tylko rozmiary wyrobiska, lecz również głębokość, na jakiej ono przebiega. Można również stwierdzić, że przemieszczenia poziome będą z reguły większe niż pionowe, a zwłaszcza wystąpi to w sposób wyraźny na dużych głębokościach, gdyż współczynnik Poissona m ma zwykle niskie wartości. Trzeba jednocześnie wziąć pod uwagę, że przemieszczenia poziome występują z dwóch stron wyrobiska i ich sumaryczna wartość może się okazać większa od połowy szerokości tego wyrobiska. Na szczęście jest pewien czynnik, który wyraźnie poprawie tę trudną sytuację. Rzecz w tym, że przemieszczenia te mają kierunek poziomy, a zatem ich wzrost nie odbywa się swobodnie, lecz przy jednoczesnym pokonywaniu oporów tarcia wewnętrznego. Efektem tego jest pewien określony stan naprężeń wewnętrznych, dość skutecznie redukujących rozluźnienie spękanych i pokruszonych mas skalnych. Z tego też względu współczynnik rozluźnienia, charakterystyczny dla danej skały, można z dużą pewnością zmniejszyć nawet o połowę. Mimo tego jednak wszystko w dalszym ciągu wskazuje na to, że o stateczności wyrobiska, zlokalizowanego na dużej głębokości, decydują ociosy i zmiany w nich zachodzące.

Rozpatrując związki, łączące przemieszczenia z ciśnieniem górotworu, braliśmy pod uwagę wyłącznie stan końcowy, tzn. warunki przemieszczeniowe, związane z ciśnieniem statycznym. Powstaje więc pytanie, jak te związki będą się przedstawiać wówczas, gdy przemieszczenia nie osiągną odpowiedniej wielkości. Chcąc na to pytanie odpowiedzieć, posłużmy się hipotezą Terzaghiego, a mianowicie wykorzystajmy wzór (5). Była już mowa o tym, że ciśnienie statyczne wystąpi wówczas, gdy człony tego równania, ujęte funkcją wykładniczą, osiągną wartość, praktycznie biorąc, równą zero. Możemy to sprecyzować inaczej, mianowicie założyć, że wartość drugiego ze wspomnianych członów równania (5) powinna być równa jakiejś dowolnie małej części, np. 1% lub też 1‰ ciśnienia statycznego. Przyjmując pewne uproszczenia, z których wynika, że $c = 0$ oraz $\lambda_0 = 1$, otrzymamy:

$$\gamma H_1 e^{-n\operatorname{tg}\phi} = \gamma \beta \frac{B}{\operatorname{tg}\phi}, \tag{20}$$

gdzie:

β - dowolnie mały procent.

Jeśli uwzględnimy, że:

$$n = H_2 : B; \quad B : \operatorname{tg}\phi = h; \quad H_1 = H - H_2,$$

to wówczas

$$(H - H_2)e^{-H_2/h} = \beta h \tag{21}$$

Wyrażając wzór (21) względem H_2, otrzymamy, że:

$$H_2 = - h \ln\beta \frac{h}{H - H_2} \tag{22}$$

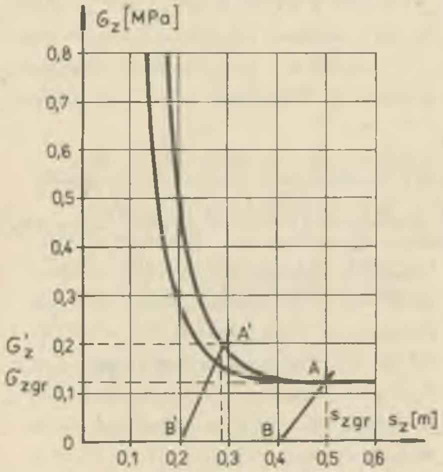
Ponieważ czynnik $h : (H - H_2)$ jest bardzo mały, a logarytm naturalny jest stosunkowo mało czuły na nieduże wartości, stąd możemy przyjąć, że:

$$H - H_2 = \sim H,$$

a zatem

$$H_2 = - h \ln\beta \frac{h}{H} \tag{23}$$

Tak określoną wartość obliczeniową strefy odprężonej - nie należy jej mylić ze strefą rozluźnioną - możemy uznać za związaną z ciśnieniem statycznym na obudowę i opisać jako H_{2gr}. Wiemy skądinąd, że tej granicznej wartości H_2 odpowiada optymalne przemieszczenie pionowe, wyrażone wzorem (14). Gdybyśmy zatem chcieli wyznaczyć krzywą zależności ciśnienia na obudowę, to jeden punkt tej krzywej już mamy. Drugi punkt, również graniczny, wynika z faktu, że przy zerowych przemieszczeniach ciśnienie na obudowę będzie równe pierwotnemu naprężeniu pionowemu. Jeśli z kolei przyjmiemy liniową zależność pomiędzy wartością H_2 i wielkością przemieszczeń, to bardzo łatwo możemy ustalić wspomnianą krzywą dla danego konkretnego przypadku. Krzywa ta będzie miała kształt mniej więcej taki, jaki pokazany został na rys. 3.



Rys. 3. Krzywa zależności ciśnienia na obudowę od przemieszczeń górotworu

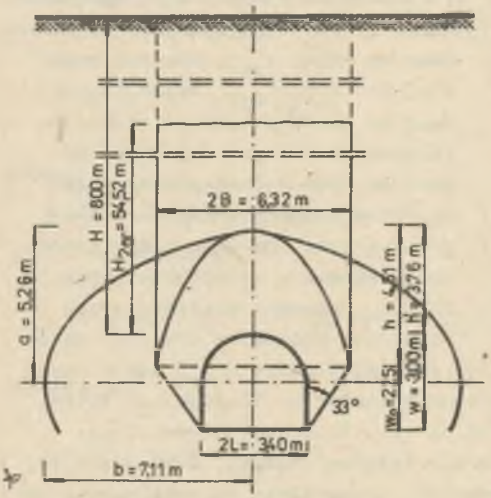
Fig. 3. Curve of dependences of pressure on the support on rock movement

Z rysunku wynika, iż przy przemieszczeniach optymalnych, oznaczonych jako s_{zgr}, obudowa musi mieć nośność σ_{zgr}. Jeśli ta obudowa ma pewną podatność, scharakteryzowaną na rys. 3 prostą AB, wówczas może być wstawiona przed dojściem przemieszczeń do stanu granicznego. Gdybyśmy zaś dysponowali obudową o nośności większej, np. σ'_z, wówczas wielkość przemieszczeń zostałaby znacznie ograniczona. Przy określonej podatności tej obudowy (prosta A'B') można nawet ustawiać ją we wczesnym etapie rozwoju przemieszczeń. Okazuje się zatem, że dysponując tego rodzaju krzywą, jak na rys. 3, możemy w dowlolnym, rozpatrywanym przez nas przypadku dobrać właściwą obudowę. Uzyskujemy to, manewrując odpowiednio trzema podstawowymi, integralnie ze sobą związanymi parametrami: nośnością obudowy, jej podatnością oraz wielkością przemieszczeń górotworu. Postępując w ten sposób, spełniamy podstawowy warunek stanu równowagi układu, mianowicie warunek przemieszczeniowy.

Przy tym wszystkim nie wolno jednak zapominać o dwóch sprawach. Po pierwsze, że opisane wyżej operacje z nośnością i podatnością obudowy mają sens jedynie w ograniczonym zakresie przemieszczeń. Z rys. 3 widać wyraźnie, że dążenie do zmniejszenia przemieszczeń o wartość większą od 40 do 50 procent mija się z celem, gdyż ciśnienia na obudowę gwałtownie wzrastają. Musimy się zatem liczyć z faktem, że w każdym przypadku wystąpią pewne, niekiedy nawet znaczne, przemieszczenia pionowe, które należy uwzględnić, projektując przekrój wyrobiska. Po drugie, projektując, pamiętać trzeba również o tym, że na wielkość przemieszczeń poziomych wpływu mieć nie możemy. Wyznaczając ich wielkość, już i tak wprowadziliśmy ograniczenia, uwzględniając siły tarcia i zmniejszając współczynnik rozluźnienia. Muszą zatem one wystąpić w swej obliczeniowej wartości. Wypływa stąd niezwykle istotny wniosek, że obudowy wyrobisk, przebiegających na dużych głębokościach w słabych skałach, muszą być zwykle bardziej podatne w kierunku poziomym niż pionowym.

5. PRZYKŁAD LICZBOWY

Rozpatrzmy wyrobisko chodnikowe, wykonane w obudowie stalowej z łuków podatnych, zlokalizowane na głębokości $H = 800$ m. Rozmiary wyrobiska (rys. 4) wynoszą: wysokość $w = 3$ m, szerokość $2l = 3{,}4$ m. W stropie wyrobiska zalega piaskowiec gruboziarnisty o parametrach: wytrzymałość na rozciąganie $R_r = -3{,}5$ MPa, kąt tarcia wewnętrznego $\emptyset = 35^o$, ciężar objętościowy $\delta = 0{,}025$ MN, liczba Poissona $m = 4$, współczynnik rozluźnienia $\delta = 10\%$. Ociosy wyrobiska tworzy węgiel kamienny o następującej charakterystyce: wytrzymałość na ściskanie $R_c = 30$ MPa, kąt tarcia wewnętrznego $\emptyset = 24^o$, liczba Poissona $m = 4$, współczynnik rozluźnienia $\delta = 8\%$.



Rys. 4. Schemat obliczeniowy zastosowany w przykładzie liczbowym

Fig. 4. Calculation scheme used in the example

Naprężenia pierwotne na poziomie posadowienia wyrobiska wyniosą: naprężenie pionowe $p_z = 800 \times 0{,}025 = 20$ MPa, naprężenie poziome $p_x = p_z : (m - 1) = 20 : (4 - 1) = 6{,}67$ MPa.

Dla zorientowania się, jakie naprężenia mogą wystąpić w ociosach wyrobiska, przyjmijmy, że ma ono kształt elipsy o półosiach: pionowej $a = 0{,}5\ w = 1{,}5$ m, poziomej $b = l = 1{,}7$ m. Wykorzystując znany wzór, odnoszący się do wyrobisk tego kształtu, obliczymy, że

$$\sigma_z = 20(1 + 2\ \frac{1{,}7}{1{,}5}) - 6{,}67 = 58{,}65 \text{ MPa}$$

Okazuje się zatem, że istnieją realne szanse na zniszczenie ociosów i wytworzenie się wokół wyrobiska strefy rozluźnionej, mającej kształt elipsy o stosunku półosi, wyznaczonym wzorem (1):

$$\frac{a}{b} = \frac{-3,5 + 20 - 6,67}{2 \cdot 6,67} = 0,74$$

Będzie to zatem elipsa o większej półosi poziomej. Wielkość półosi pionowej można wyliczyć, posługując się wzorem (13). Ze względu jednak na kształt podkowiasty wyrobiska do obliczeń przyjęto nie rzeczywistą jego wysokość, lecz wysokość obliczeniową (rys. 4) o wielkości

$$w_o = \frac{3w}{4} = 0,75 \times 3 = 2,25 \text{ m}$$

Długość półosi pionowej wyniesie zatem:

$$a = \frac{1,7 + 2,25 \operatorname{tg}(45^\circ - 12^\circ)}{\operatorname{tg} 35} + \frac{2,25}{3} = 5,26 \text{ m},$$

stąd półoś pozioma

$$b = 5,26 : 0,74 = 7,11 \text{ m}$$

Ze względu na to, że w obliczeniach bierzemy pod uwagę wysokość obliczeniową w_o, musimy wyznaczyć rzeczywistą strzałkę sklepienia ciśnień, występującą powyżej stropu wyrobiska. Ponieważ według wzorów (3) i (4)

$$h = \frac{1,7 + 2,25 \operatorname{tg}(45^\circ - 12^\circ)}{\operatorname{tg} 35} = 4,51 \text{ m},$$

stąd strzałka rzeczywista

$$h' = h - w + w_o = 4,51 - 3 + 2,25 = 3,76 \text{ m}.$$

Ciśnienie górotworu działające na strop obudowy wyniesie zatm

$$\sigma_z = 0,025 \times 3,76 = 0,094 \text{ MPa}$$

Po to, by miało ono rzeczywiście tę minimalną wartość, musi wystąpić przemieszczenie pionowe

$$s_{zgr} = 0,01 \times 3,76 \times 10 = \sim 0,38 \text{ m}$$

Jednocześnie w ociosach wystąpią przemieszczenia poziome. Zakładając, że wskutek działania sił tarcia ich rozluźnienie będzie o 40% mniejsze od rozluźnienia swobodnego, możemy zgodnie ze wzorem (11) wyliczyć, że:

$$s_{xgr} = 0,01 \times (7,11 - 1,7) \times 8 \times 0,6 = \sim 0,26 \text{ m.}$$

Wszystkie wyliczone wyżej wielkości odnoszą się do stanu, który określiliśmy jako ciśnienie statyczne. Ze stanem tym związana jest pewna obliczeniowa strefa odprężona, sięgająca wysokości H_2 nad wyrobiskiem, którą możemy wyznaczyć wzorem (23), zakładając, że np. $\beta = 0,001$.

$$H_{2gr} = -4,51 \ln 0,001 \frac{4,51}{800} = 54,52 \text{ m}$$

Ponieważ H_{2gr} związane jest z przemieszczeniem pionowym s_{zgr}, stąd możemy przyjąć, że przy liniowej zależności pomiędzy H_2 i s_z

$$H_2 = \frac{54,52}{0,38} s_z = 143,47 s_z$$

Grubość strefy odprężonej H_2 występuje we wzorze (6), wynikającym z hipotezy Terzaghiego, w wykładniku potęgowym funkcji exponencjalnej. Wykładnik ten ma postać:

$$nf = \frac{H_2}{B} \operatorname{tg}\phi = \frac{H_2}{h},$$

a zatem w rozpatrywanym przez nas przykładzie

$$nf = \frac{143,47 s_z}{4,51} = 31,81 s_z$$

Jeśli ten wykładnik uwzględnimy we wzorze (6), to otrzymamy:

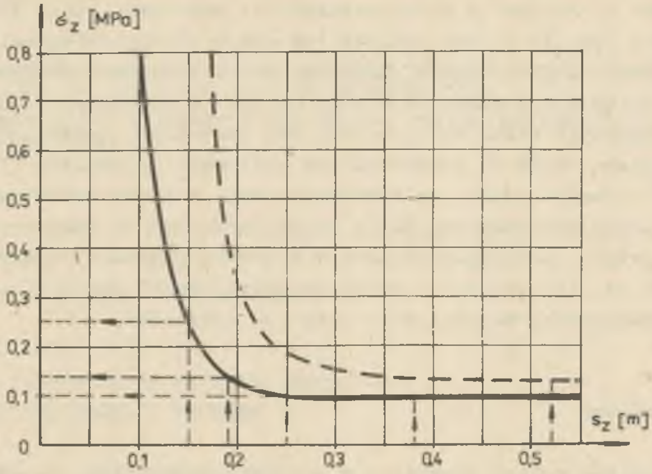
$$\sigma_z = 0,094(1 - e^{-31,81s_z}) + 0,025(800 - 143,47 s_z)e^{-31,81s_z}$$

Będzie to równanie krzywej (rys. 5), ilustrującej związek ciśnienia górotworu na obudowę z wielkością przemieszczeń, ważny dla rozpatrywanego przez nas przypadku. Dla przykładu, gdy przemieszczenie pionowe, zamiast obliczonej granicznej wartości 0,38 m, osiągnie tylko 0,25 m, to wówczas

$$e^{-31,81 \times 0,25} = 0,00035,$$

a ciśnienie na obudowę wyniesie:

$$\sigma_z = 0,094(1 - 0,00035) + 0,025(800 - 143,47 \times 0,25) \times 0,00035 = \\ = \sim 0,1 \text{ MPa},$$



Rys. 5. Krzywa zależności ciśnienia - przemieszczenie wynikające z obliczeń przedstawionych w przykładzie liczbowym

Fig. 5. Curve of dependences pressure-movement resulting from the calculations presented in the example

a zatem obserwujemy wzrost stosunkowo nieduży. Gdybyśmy jednak przemieszczenia zmniejszyli o połowę, tzn. $s_z = \sim 0,19$ m, to wówczas σ_z = = 0,139 MPa, a przy $s_z = 0,15$ m już $\sigma_z = 0,25$ MPa. Jak widać, poczynając mniej więcej od połowy wartości przemieszczeń granicznych, następuje gwałtowny wzrost ciśnienia na obudowę. Potwierdza to wyraźnie przebieg krzywej, przedstawionej na rysunku 5.

Na zakończenie należy zwrócić uwagę na dwie sprawy. Pierwsza dotyczy kształtu wyrobiska. Gdybyśmy wykonali podobne obliczenia, jak przedstawione wyżej dla wyrobiska prostokątnego, przy zachowaniu tych samych rozmiarów i tych samych warunków geologiczno-górniczych, to wówczas ciśnienie statyczne na strop osiągnęłoby wartość

$$\sigma_{zgr} = 0,13 \text{ MPa}$$

przemieszczenia pionowe

$$s_{zgr} = 0,52 \text{ m}$$

oraz poziome

$$s_{xgr} = 0,35 \text{ m.}$$

Wszystkie te wartości są większe od poprzednio wyliczonych. Inaczej też przebiegać będzie krzywa pokazana na rys. 5 linią kreskowaną, charakteryzująca związek ciśnienie-przemieszczenie. Jak widać, uzyskaliśmy tym samym potwierdzenie ogólnie znanych korzyści, jakie daje podkowiasty kształt wyrobiska.

Druga sprawa ma związek z przemieszczeniami poziomymi. Była już uprzednio już mowa o tym, że na ich wielkość ma wpływ liczba Poissona, związana w dużym stopniu z głębokością. Gdybyśmy w przeprowadzonych wyżej obliczeniach w miejsce $m = 4$ wstawili $m = 3$, co np. w odniesieniu do węgli kamiennych, poddanych dużym naprężeniom, nie jest czymś nadzwyczajnym, to wówczas sumaryczna wielkość przemieszczeń poziomych wyniosłaby 1,4 m. Jednocześnie trzeba pamiętać, że przemieszczenia poziome muszą wystąpić i obudowa nie może ich hamować. Jeśli zatem, wracając do rozpatrywanego przez nas przykładu, podatność obudowy w kierunku pionowym mogłaby być w granicach 20 cm, to w kierunku poziomym musi osiągać ponad 50 cm. Jest to warunek podstawowy i bezwzględnie musi być spełniony.

6. UWAGI KOŃCOWE

Przede wszystkim należy jeszcze raz wyraźnie podkreślić, że całość zaprezentowanych wyżej rozważań dotyczy wyłącznie wyrobisk zlokalizowanych w słabym, a nawet w bardzo słabym górotworze, przy czym głównie chodzi tu o słabość skał budujących ociosy tych wyrobisk. Tego rodzaju warunki geologiczno-geotechniczne są bowiem źródłem takich właśnie zjawisk i procesów zmian w górotworze w sąsiedztwie wyrobiska, jakie poddane zostały dość szczegółowej analizie. Analiza ta z kolei stanowiła podstawę szeregu wniosków i stwierdzeń, które dotyczą bezpośrednio ciśnienia górotworu na obudowy, lecz mają, siłą rzeczy, sens jedynie w odniesieniu do wspomnianych warunków geotechnicznych.

Nie ma potrzeby przytaczać kolejno tych wszystkich wniosków, gdyż zostały one dostatecznie wyraźnie wypunktowane w tekście. Warto jedynie zwrócić uwagę na podstawowy warunek stanu równowagi układu, tzn. na ten, który określono jako warunek przemieszczeniowy. Znany doskonale, jak już o tym była mowa, zarówno praktykom, jak i teoretykom, został on tym razem przedstawiony w formie ilościowej. Nic zatem nie stoi na przeszkodzie, by mógł on być brany pod uwagę przy projektowaniu obudów wyrobisk chodnikowych. Nie jest wykluczone, rzecz jasna, że spowoduje to pewne trudności, jak np. konieczność wyznaczenia realnego współczynnika rozluźnienia, lecz przecież z takimi samymi trudnościami i z taką samą dokładnością są zwykle określane wszystkie, potrzebne nam do obliczeń właściwości fizyczne i mechaniczne rozpatrywanego w danym przypadku górotworu. Dlatego wydaje się, że nawet przy wspomnianych trudnościach przedstawiona propozycja warta jest uwzględnienia.

LITERATURA

[1] Gergowicz Z.: Skrzyżowania wyrobisk korytarzowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Górnictwo z. 128, Gliwice 1983.

[2] Gergowicz Z.: Geotechnika górnicza. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1974.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław Chudek

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1985 r.

ДАВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД НА КРЕПЬ ВЫРАБОТОК
ЗАЛОЖЕННЫХ НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ

Р е з ю м е

Расмотривается горные выработки заложенные в неустойчивых горных породах на больших глубинах. Особое внимание уделяется этим случаям, когда в стенах выработок имеются слабые или очень слабые горные породы. Приводится анализ изменений, какие выступают в горных породах вокруг выработки и определяется зону их разрушения. Рассмотривается возможность возникновения состояния предельного равновесия в системе: крепь-горные породы. Определяется величину необходимых перемещений обусловливающих возникновение зоны переделього равновесия горных пород. Используя известные гипотезы принимается такая схема расчета, которая разрешает получение величины горного давления в зависимости от перемещения крепи. Обоснованием этой схемы является предположение, что несущий свод, возникший над горной выработкой, должен заключаться в разрыхленной зоне. Принимая, согласно Салустовичу, элиптическую форму этой зоны, определяется величину вертикальной оси элипса по формуле:

$$a = h + w/2$$

при чем согласно гипотезе Протодяконова:

$$h = \frac{+\ w\ tg(45 - \phi/2)}{tg\phi}$$

где: w - высота выработки, l - шолова ширины выработки, ϕ - угол внутреннего трения разрыхленной горной породы.

Половину горизонтальной оси элипса определяющего разрыхленную зону определяется формулой:

$$b = \frac{2\ l\ \cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{[\alpha(m - 1) + m - 2]\sin\phi}$$

где: $\alpha = R_c : p_z$, R_c – сопротивление горных пород на растяжение, p_z – бытовое вертикальное напряжение, m – коэффициент Пуассона. Условием возиикновения несущего свода является вертикальное перемещение горных пород в сторону выработки. Эго величину определяется согласно гипотезе Коммерелла, используя формулу

$$s_z = \frac{[1 + w\ tg(45 - \Phi/2)]\delta}{100\ tg\phi}$$

где: δ – коэффициент разрыхления [%].
Перемещению будет сопутствовать горизонтальное перемещение

$$s_x = \left\{\frac{2\ l\ \cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{[\alpha(m - 1) + m - 2]\sin\phi} - 1\right\} \frac{\delta}{100}$$

Когда выполняются выше упомянутые условия, на крепь будет воздействовать статическое давление согласно гипотезе Протодяконова.

В случае, когда перемещения горных пород не достигнут необходимых величин, давление на крепь будет большие. Можно его определить, используя формулу Тецаги, вводя линейную зависимость между действительными перемещениями а величиной разуплотнённой зоны.

ROCK MASS PRESSURE ON THE LINING OF HEADINGS LOCALIZED AT GREAT DEPTHS

S u m m a r y

Dog headings are considered running in weak grounds at great depths. A special attention is given to those cases in which rocks building side walls are weak or very weak. Changes occurring in rock mass round the heading are analyzed and the shape and development of the loose zone are discussed. A possibility is considered of occurring of the limit equilibrium state of the system: lining-rock mass. As a basis the displacement condition is taken. An attempt is made at determining the values

of displacements conditioning the formation of the loose zone of such a range that would enable the occurrence of the linit equilibrium state within its region. On the basis of the analysis of known hypotheses such a computational scheme considering the effect of displacements is assumed that would allow the determination of pressures acting on the lining. The scheme was based on the assumption that the pressure arch formed above the underground room must be contained in the llosened zone. By assuming according to Sałustowicz the elliptical shope of this zone, the ellipse vertical axis was given by

$$a = h + w/2$$

and, according to Protodiakonov's hypothesis

$$h = \frac{+ w\ tg(45 - \phi/2)}{tg\phi}$$

where:

w - the underground room height,

l - the underground room half-width,

ϕ - the internal friction angle of the loosened rock mass.

The horizontal semi-axis of the loosened zone allipse is given by

$$b = \frac{2\ l\ \cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{\left[\alpha(m-1) + m - 2\right]\sin\phi}$$

where:

$\alpha = R_c : p_c$, R_c - the rock mass tensile strenght,

p_z - primary vertical stress,

m - Poisson's ratio.

The condition for the pressure arch to occur are the vertical displacements of the rock mass toward the underground room interior. Their value can be calculated on the basis of Kommerell's hypothesis as

$$s_z = \frac{l + wtg(45 - \phi/2)\delta}{100\ tg\phi}$$

where:

δ - the coefficient of loosening [%].

They will be accompanied by horizontal displacements

$$s_x = \left\{ \frac{2\,l\,\cos\phi + w(2 - \sin\phi)}{[\alpha(m-1) + m - 2]\sin\phi} - l \right\} \frac{\delta}{100}$$

When the above conditions are fulfilled the lining will be subject to static pressure in agreement with Protodiakonov's hypothesis.

When the rock mass displacement do not reach the required value, the pressure on the lining will be greater. It can be calculated by applying Terzaghi's formula on the assumption of a linear dependence between the real displacement and the destressed zone range.