Seria: GÓRNICTWO z. 85 Nr kol. 555

Kazimierz PODGÓRSKI
Józef ULIASZ

SPOSÓB USTALANIA STANU NAPRĘŻEŃ W GÓROTWORZE TRAKTOWANYM JAKO OŚRODEK TRANSWERSALNIE IZOTROPOWY

Streszczenie. W pracy opracowano podstawy teoretyczne obliczeń i podano konstrukcję czujnika do pomiarów zmian objętości otworu w górotworze dla ustalenia stanu naprężeń.

1. Podstawy teoretyczne

Większość skał karbońskich posiada budowę uwarstwioną, a ich własności częściowo obiegają od własności ciał izotropowych sprężystych.

Prof. Głuszko z Instytutu Mechaniki A.N.USRR wykazał, że skały mające współczynnik anizotropowości $k = \sqrt{\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}}$ mniejszy od 1,5 traktować można jako ośrodek izotropowy, a popełniany w tym przypadku błąd jest bardzo mały i wynosi 6-8%.

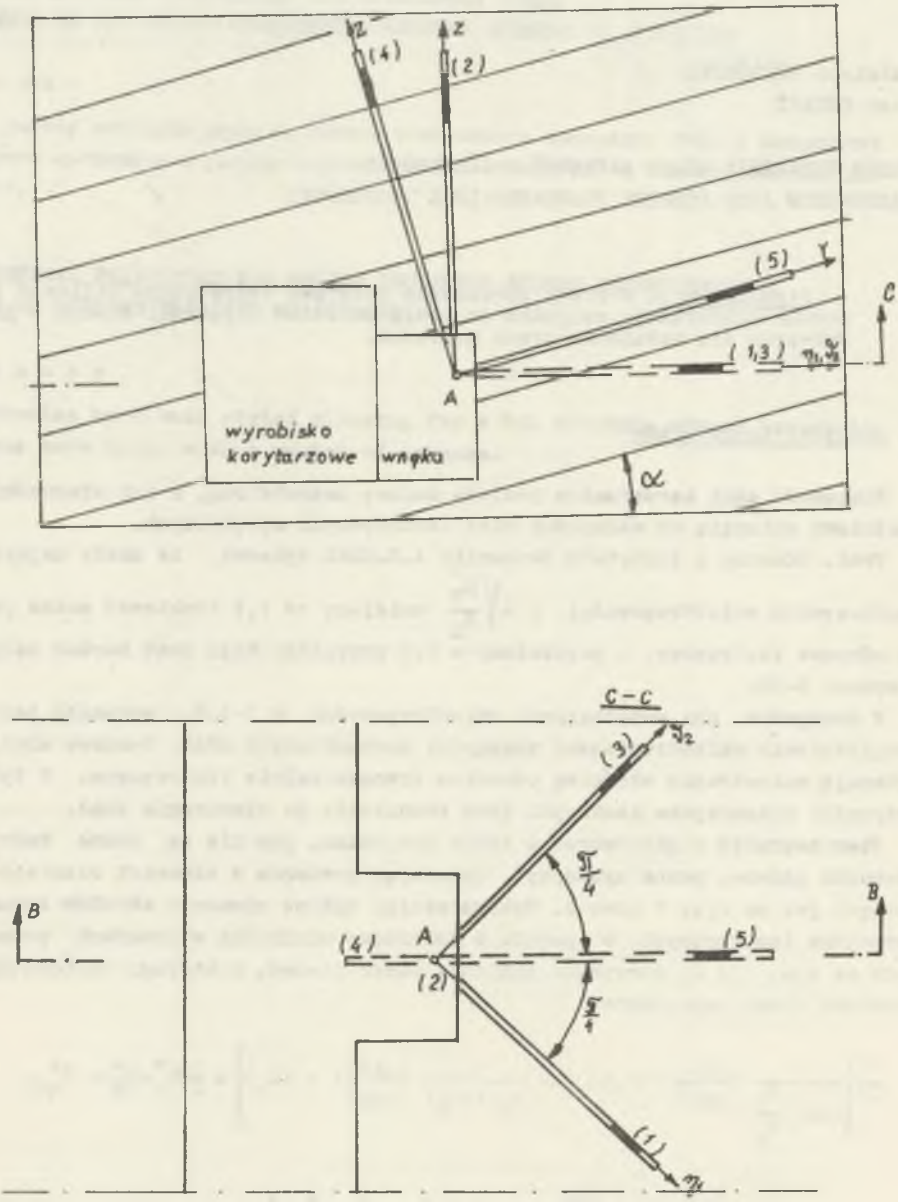
W przypadku, gdy współczynnik anizotropowości $k > 1,5$, wskazane jest uwzględnienie anizotropowości własności mechanicznych skał. Osadowe skały wykazują anizotropię właściwą ośrodkom transwersalnie izotropowym. W tym przypadku płaszczyzna izotropii jest równoległa do uławicenia skał.

Stan naprężeń w górotworze w takim przypadku, gdy nie są znane żadne kierunki główne, można wyznaczyć, dokonując pomiarów w otworach rozmieszczonych jak na rys. 1 oraz 2. Wykorzystując ogólne równania ośrodków transwersalnie izotropowych, w oparciu o zmierzone wielkości w otworach podanych na rys. 1 i 2, otrzymano poniższy układ równań, z którego oblicza się składowe stanu naprężenia:

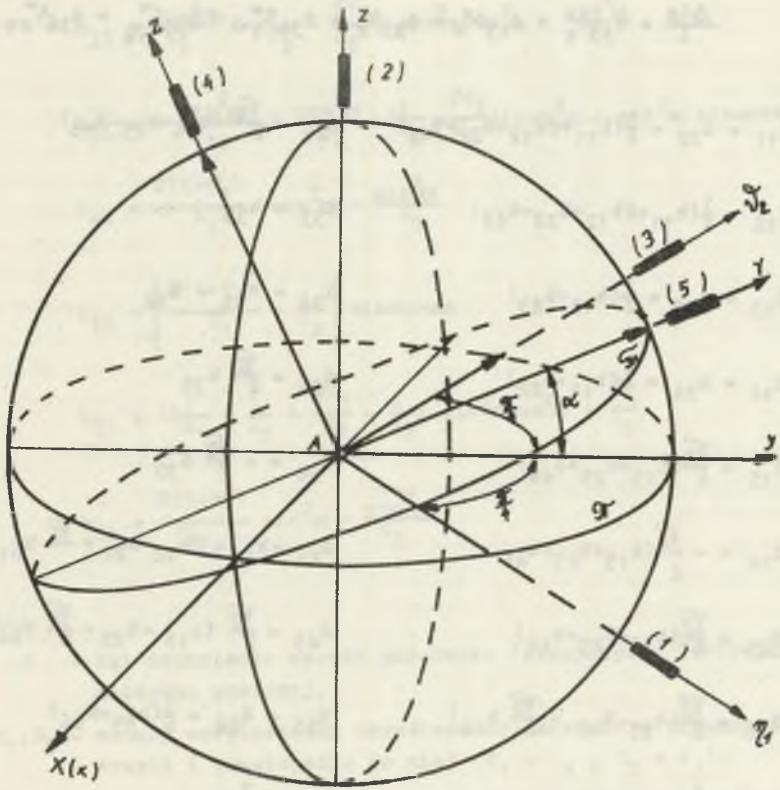
$$\frac{E_1}{E}\left[\frac{1}{1-\nu_2^2\frac{E_1}{E_2}}\left(\frac{\Delta V_z}{2\pi a^2}+\nu_2\Delta L_z\right)+\frac{1}{\nu_2(1+\nu_1)}\left(\frac{\Delta V_z}{2\pi a^2}+\Delta L_y\right)\right]=\frac{1}{2}(\sigma_\eta^*+\sigma_\nu^*)-\tau_{\eta\nu}^*$$

$$\frac{E_1}{E}\frac{1}{1+\nu_1}\left(\frac{\Delta V_z}{2\pi a^2}-\Delta L_r\right)=\frac{1}{2}\cos^2\alpha(\sigma_\eta^*+\sigma_\nu^*)+$$

$$+\sigma_z^*\sin^2\alpha+\tau_{\eta\nu}^*\cos^2\alpha-\frac{1}{\sqrt{2}}\sin 2\alpha(\tau_{\nu z}^*+\tau_{z\eta}^*)$$



Rys. 1. Plan rozmieszczenia otworów pomiarowych w ociosie wyrobiska korytarzowego



Rys. 2. Układ współrzędnych z zaznaczeniem kierunków otworów pomiarowych

$$\frac{E_2}{L}\frac{1}{1-\nu_2^2\frac{E_1}{E_2}}\left(\Delta L_z+\nu_2\frac{E_1}{E_2}\frac{\Delta V_z}{2\pi a^2}\right)=\frac{1}{2}\sin^2\alpha(\sigma_\eta^*+\sigma_\nu^*)+$$

$$+\sigma_z^*\sin^2\alpha+\tau_\eta^*{}_\nu\sin^2\alpha-\frac{1}{\sqrt{2}}\sin 2\alpha(\tau_{\nu z}^*+\tau_{z\eta}^*)$$

$$\frac{\Delta L_\eta}{L}=d_{11}\sigma_\eta^*+d_{12}\sigma_\nu^*+d_{13}\sigma_z^*+d_{14}\tau_{\eta\nu}^*+d_{15}\tau_{\nu z}^*+d_{16}\tau_{z\eta}^*$$

$$\frac{\Delta L}{L}=d_{12}\sigma_\eta^*+d_{11}\sigma_\nu^*+d_{13}\sigma_z^*+d_{14}\tau_{\eta\nu}^*+d_{25}\tau_{\nu z}^*+d_{26}\tau_{z\eta}^*$$

$$\frac{\Delta L_z}{L} = d_{13}\sigma^*_\eta + d_{13}\sigma^*_\vartheta + d_{33}\sigma^*_z + d_{34}\tau^*_{\eta\vartheta} + d_{35}\tau^*_{\vartheta z} + d_{36}\tau^*_{z\eta}$$

$$d_{11} = d_{22} = \frac{1}{4}(b_{11}+2b_{12}+b_{22}+b_{44}) \qquad d_{26} = \frac{\sqrt{2}}{2}(b_{46}-b_{25}-b_{15})$$

$$d_{12} = \frac{1}{4}(b_{11}+2b_{12}+b_{22}-b_{44}) \qquad d_{33} = b_{33}$$

$$d_{13} = d_{23} = \frac{1}{2}(b_{13}+b_{23}) \qquad d_{34} = b_{31} - b_{32}$$

$$d_{14} = d_{24} = \frac{1}{2}(b_{11}+b_{22}) \qquad d_{35} = \frac{\sqrt{2}}{2} b_{35}$$

$$d_{15} = \frac{\sqrt{2}}{4}(b_{15}+b_{25}+b_{46}) \qquad d_{36} = -\frac{\sqrt{2}}{2} b_{35}$$

$$d_{16} = -\frac{\sqrt{2}}{2}(b_{15}+b_{25}-b_{46} \qquad d_{44} = b_{11} - 2b_{12}+b_{22} + \frac{\sqrt{2}}{2} b_{61} + \frac{1}{2} b_{66}$$

$$d_{25} = \frac{\sqrt{2}}{4}(b_{15}+b_{25}+b_{46}) \qquad d_{45} = \frac{\sqrt{2}}{2}(b_{15} - b_{25} + \frac{\sqrt{2}}{2} b_{66})$$

$$d_{46} = \frac{\sqrt{2}}{2}(b_{25}-b_{15} + \frac{\sqrt{2}}{2} b_{66}) \qquad d_{55} = d_{66} = \frac{1}{6}(b_{55}+b_{66})$$

$$d_{56} = \frac{1}{2}(b_{66}-b_{55}) \qquad b_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$b_{12} = -\frac{\nu_1}{E_1}\cos^2\alpha + \frac{\nu_2}{E_2}\sin^2\alpha \qquad b_{15} = (\frac{\nu_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1})\sin 2\alpha$$

$$b_{13} = -\frac{\nu_1}{E_1}\sin^2\alpha - \frac{\nu_2}{E_2}\cos^2\alpha$$

$$b_{22} = \frac{\cos^4\alpha}{E_1} + (\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2})\sin^2\alpha\cos^2\alpha + \frac{\sin^4\alpha}{E_2}$$

$$b_{23} = (\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_2}{E_2} - \frac{1}{G_2})\sin^2\alpha\cos^2\alpha - \frac{\nu_2}{E_2}$$

$$b_{25} = \frac{2\cos^2\alpha}{E_1} - \frac{2\sin^2\alpha}{E_2} + (\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2})(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha)\sin\alpha\cos\alpha$$

$$b_{33} = \frac{\sin^4\alpha}{E_1} + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2}\right)\sin^2\alpha\cos^2\alpha + \frac{\cos^4\alpha}{E_2}$$

$$b_{35} = 2\,\frac{\sin^2\alpha}{E_1} - 2\,\frac{\cos^2\alpha}{E_2} + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_2}{E_2}\right)(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha)\sin\alpha\cos\alpha$$

$$b_{44} = \frac{2(1+\nu_1)}{E_1}\cos^2\alpha + \frac{\sin^2\alpha}{G_2}$$

$$b_{46} = \left[\frac{2(1+\nu_1)}{E_1} - \frac{1}{G_2}\right]\sin\alpha\cos\alpha$$

$$b_{55} = 4\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_2}{E_2} - \frac{1}{G_2}\right)\sin^2\alpha\cos^2\alpha + \frac{1}{G_2}$$

$$b_{66} = \frac{2(1+\nu_1)}{E_1}\sin^2\alpha + \frac{\cos^2\alpha}{G_2}$$

gdzie:

α - kąt nachylenia warstw górotworu (płaszczyzny izotropii) do płaszczyzny poziomej,

E_1, E_2 - moduły sprężystości określane odpowiednio w płaszczyźnie izotropii i prostopadle do niej ($E_1 = E_{\parallel}$, $E_2 = E_{\perp}$),

ν_1, ν_2 - wsp. Poissona w płaszczyźnie izotropii i prostopadle do niej $\nu_1 = \nu_{\parallel}$ $\nu_2 = \nu_{\perp}$,

c_{ij}, d_{ij} - współczynniki transformacji dla układu (η, ν, z) podane są one układami równań,

L - długość pomiarowa czujnika,

a - promień otworu wiertniczego,

ΔV - zmiana objętości odcinka otworu mierzona czujnikiem,

ΔL - zmiana długości otworu określana czujnikiem,

$\sigma^*_z, \sigma^*_\eta, \sigma^*_\nu, \tau^*_{\eta\nu}, \tau^*_{\nu z}, \tau^*_{z\eta}$ - ustalane składowe tensora naprężeń w górotworze.

Podane wzory ulegną znacznemu uproszczeniu, jeżeli znane będą jeden lub trzy kierunki główne. W takim przypadku tok postępowania jest podobny jak dla ośrodka izotropowego.

Powyższe rozważania obejmowały zagadnienie określania stanu naprężeń w górotworze bez uwzględnienia czynnika czasu. Podkreślić tutaj należy, że w przypadku określenia stanu naprężeń w skałach kruchych błąd popełniany

przez nieuwzględnienie odkształceń pełzania jest mały i wynosi 10% natychmiastowych odkształceń sprężystych.

Z podanych wzorów wynika, że gdyby górotwór był ciałem idealnie sprężystym, to zaraz po wykonaniu otworu wystąpiłoby jego odkształcenie. W praktyce górotwór wykazuje własności reologiczne. Na podstawie badań i rozważań teoretycznych [2] stwierdzono, że zmiany odkształceń otworu w czasie do 1 godziny są małe i można je pominąć. A zatem jeśli pierwszy pomiar przeprowadzony zostanie w czasie krótszym niż 1 godzina od momentu wykonania otworu, wówczas można przyjąć, że mierzone wielkości odpowiadają pierwotnemu stanowi naprężeń, jaki istniał przed wykonaniem otworu.

2. Konstrukcja aparatury pomiarowej i sposób pomiaru deformacji rozpatrywanego odcinka otworu

Wielkości naprężeń w górotworze można wyliczyć, jak wyżej wykazano, w oparciu o zmiany objętości i długości rozpatrywanego odcinka otworu. Do tego celu opracowano czujnik hydrauliczny, ze wskazaniami zmian objętości i długości badanego odcinka, na drodze hydraulicznej lub elektrycznej.

Przewiduje się szersze stosowanie czujnika z pomiarem potrzebnych wielkości na drodze elektrycznej. Czujnik taki przedstawiono na rys. 3.

Rys. 3. Widok czujnika elektrohydraulicznego

a - głowica czujnika, b - tłok, c - przepona, d - rura prowadząca, e - elektryczny miernik zmian objętości, f - korpus, g - koszulka elastyczna, h - końcówka do napełniania elektrycznego miernika zmian objętości, i - końcówka do zasilania czujnika w czasie montażu w otworze, j - przewód hydrauliczny, k - przewody elektryczne

Dla określania wielkości odkształceń i naprężeń w górotworze opracowano dwa sposoby pomiaru. Sposób pierwszy sprowadza się do pomiarów zmian objętości i długości odcinka otworu w poszczególnych odcinkach czasu oraz do laboratoryjnego określania własności skały na rdzeniu wiertniczym uprzed-

nio pobranym z miejsca usytuowania czujnika. Drogą tą określić można przyrosty naprężeń w czasie. Można również wnioskować co do bezwzględnego stanu naprężeń badając pełzanie skał.

Drugi sposób, tj. sposób określania naprężeń absolutnych, jest bardziej złożony, ale dzięki niemu wielkości naprężeń in situ otrzymuje się z pominięciem stałych materiałowych skały. Tok postępowania w tej metodzie jest następujący; po założeniu czujnika do otworu dokonuje się pomiarów początkowych, następnie obwierca się skałę wokół zabudowanego czujnika, a po wyjęciu z wyrobiska obcina się powierzchnie czołowe rdzenia i umieszcza się go w komorze trójosiowego ściskania.

Poprzez odpowiednie obciążenie rdzenia wywołuje w nim się taki stan naprężeń, przy którym wielkości wskazań czujnika równe są co do wielkości wskazaniom przed rdzeniowaniem.

Etapy związane z realizacją badań przy tej metodzie przedstawiono na rys. 4.

W wyniku sprowadzenia stanu odkształceń badanego rdzenia do stanu odkształceń, jaki wystąpił w górotworze, wylicza się bezpośrednio wielkości naprężeń bez konieczności uprzedniego wyznaczania stałych materiałowych badanego odcinka górotworu. Wielkość naprężenia w osi próbki odpowiada wielkości oddziaływania tłoka, natomiast suma naprężeń prostopadłych do osi rdzenia jest określona ze wzoru:

$$\sigma_x^* = p_x$$

$$\sigma_y^* + \sigma_z^* = \frac{b^2}{b^2 - a^2}\, 2\, p_b$$

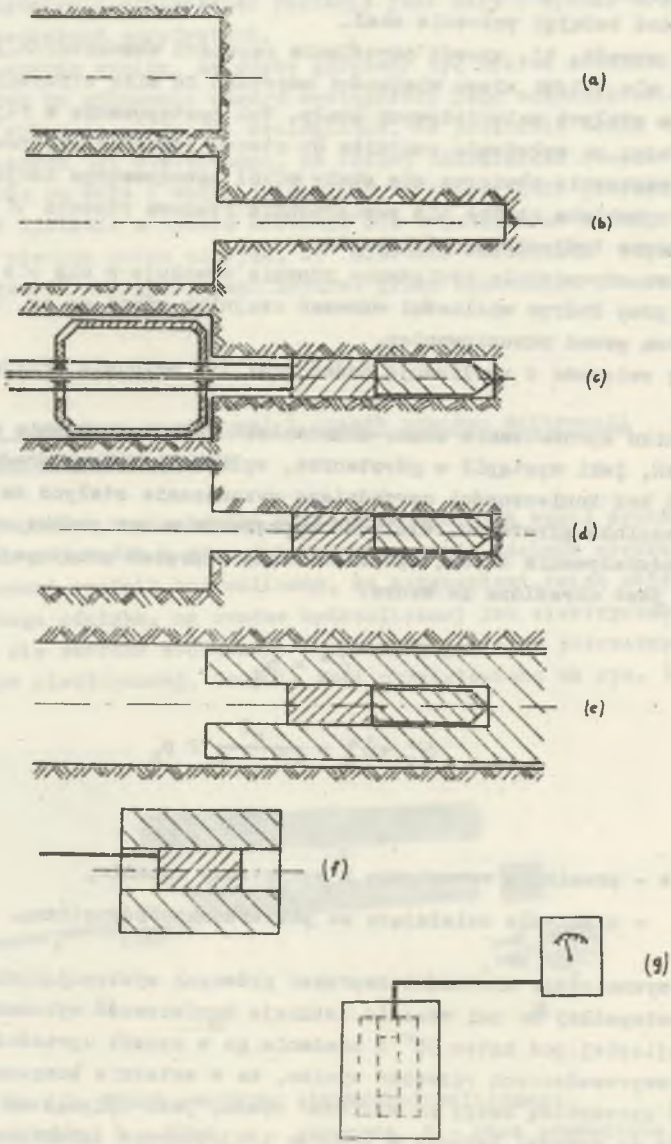
gdzie:

a i b - promienie wewnętrzny i zewnętrzny rdzenia,

p_b - ciśnienie działające na powierzchnię zewnętrzną.

Dla wyznaczenia wielkości naprężeń głównych występujących w płaszczyźnie prostopadłej do osi rdzenia istnieje konieczność wykonania drugiego otworu najlepiej pod kątem 90° i zbadania go w sposób uprzednio podany.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że w metodzie kompensacji należy zwrócić szczególną uwagę na wielkość czasu, jaki upłynął od momentu rdzeniowania do momentu badania w komorze trójosiowego ściskania. Jeżeli ten czas będzie stosunkowo krótki (2 godz.), wówczas pomijalny jest wpływ pełzania odwrotnego na mierzone wielkości, a wyznaczane wielkości naprężeń odpowiadają wielkościom rzeczywistym występującym przed badaniami w górotworze nienaruszonym. Przy dłuższych okresach czasu między pobraniem rdzenia a jego zbadaniem w komorze należy spowodować obciążenie wywołujące zmianę objętości równą co do wielkości zmierzonej czujnikiem na skutek odpręże-



Rys. 4. Etapy wykonania otworów i prowadzenia prac pomiarowych

a - otwór o średnicy 114 mm, b - pogłębienie otworu mniejszą średnicą odpowiadającą średnicy czujnika pomiarowego, c - wprowadzenie do otworu kolejno pojemnika z masą wiążącą oraz czujnika z elementem odstępowym, a po związaniu masy chemoutwardzalnej wykonanie początkowych pomiarów, d - otwór przygotowany do rdzeniowania, e - rdzeniowanie otworu koronką o Ø 114 mm i Ø wewn. 96 mm, f - obcięcie próbki na wymiar i podłączenie przewodów elektrycznych, d - umieszczenie próbki w komorze trójosiowego ściskania i obciążenie próbki zerujące wskazania czujnika

nia, a następnie pozostawić pod tym obciążeniem na okres czasu pozostawania próbki bez obciążenia.

W wyniku tego występuje pełzanie zbliżone wartością do pełzania odwrotnego.

LITERATURA

[1] Chudek M.: Mechanika Górotworu, Skrypt nr 589/20 Wyd.Politechnika Śląska, Gliwice 1976.

[2] Serata S., Sakurai S., Adachi T.: Theory of aggregate rock behavior based on absolute three-dimensional testing (ATT) of rock salt. Proc. of the 10th Symp.-on rock mech. Univ. of Texas at Austin "Basic and Applied Rock Mechanics" (ed by K.E.Gray). AIME, N.YORK 431,1972,s.156.

[3] Praca zbiorowa: Metody pomiarów odkształceń i naprężeń w materiałach i konstrukcjach budowlanych. PAN - Ossolineum, Warszawa-Wrocław-Kraków-Gdańsk, 1971.

[4] Uliasz J.: Ustalenie stanu naprężenia skał in situ metodą pomiaru zmian objętości otworu wiertniczego. Praca doktorska Gliwice 1977 nie publikowana.

СПОСОБ УСТАНАВЛИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПОНИМАЕМОМ КАК ТРАНСВЕРСАЛЬНАЯ ИЗОТОПНАЯ СРЕДА

Р е з ю м е

В работе разработаны теоретические основы расчёта, а также даётся конструкция датчика для измерений объёма отверстия в горном массиве с целью установления состояний напряжений.

STRESS STATE DETERMINATIONS IN OROGEN AS A TRANSVERSALLY ISOTROPIC MEDIUM

S u m m a r y

A theoretical basis for calculations and the construction of a sensor reacting to orogen volume changes has been given.