

Mirosław Chudek
Ryszard Żyliński

ZAGADNIENIE WYTRZYMAŁOŚCI SKAŁ ZAMROŻONYCH
W ASPEKTCIE OPTYMALIZACJI MROŻENIOWEJ METODY
GŁĘBIENIA SZYBÓW

Streszczenie: W pracy dokonano analizy dotychczasowych sposobów obliczeń grubości płaszcza mroźniowego, oceniając ich praktyczną przydatność oraz uzasadniono konieczność laboratoryjnych badań wytrzymałościowych skał zamrożonych. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki prac badawczych oraz możliwości ich wykorzystania dla optymalizacji mroźniowej metody głębienia szybów.

1. Wprowadzenie

Prowadzenie robót górniczych w trudnych warunkach hydrogeologicznych charakteryzujących się występowaniem w górotworze dużej ilości wody oraz skał zawodnionych czy płynnych w postaci kurzawek, wymaga stosowania odpowiednich przedsięwzięć profilaktycznych. Szczególnego znaczenia zagadnienia te nabierają w przypadku głębienia szybów, kiedy napotkanie warstw wodonośnych spowodować może przerwanie procesu głębienia czy uniemożliwić w ogóle jego prowadzenie.

Ze wszystkich dotychczas stosowanych w takich przypadkach metod profilaktycznych, najbardziej skuteczną, aczkolwiek kosztowną okazała się metoda sztucznego zamrażania skał.

W Polsce metodę tę zastosowano do zgłębnienia ok. 20 000 mb szybów przy maksymalnej głębokości jej stosowania sięgającej rzędu 600 m. Perspektywy stosowania tej metody w budowanych i projektowanych rejonach wydobywania kopaliny użytecznej uzasadniają konieczność dokładniejszego określania metod i sposobów obliczania grubości płaszcza skał zamrożonych uwzględniających w pierwszym rzędzie własności wytrzymałościowe skał zamrożonych jako podstawę prawidłowego projektowania robót górniczych w zakresie technicznym i technologicznym.

Rezultaty niniejszej pracy oparte są w głównej mierze o wyniki badań, które w latach 1970-74 zrealizowano w Instytucie Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej.

2. Analiza dotychczasowych metod obliczeniowych stosowanych dla wyznaczania grubości płaszcza skał zamrożonych

Dotychczasowe doświadczenia uzyskane w czasie głębienia szybów metodą mroźniową potwierdziły jej skuteczność i dużą niezawodność stosowania w trudnych warunkach hydrogeologicznych. Równolegle z doświadczeniami prak-

tycznymi prowadzone są prace badawcze zmierzające do ustalenia optymalnych parametrów techniczno-technologicznych stosowania tej metody w budownictwie podziemnym kopalń. Z tego punktu widzenia najbardziej istotnym dla praktyki górniczej jest określenie grubości płaszcza skał zamrożonych, bezpiecznej dla danych warunków hydrogeologiczno-górnich, jak również określenia takiej wysokości odsłonięcia ociosów szybowych (tzw. zabierki szybowej), która umożliwi zachowanie technologicznej stateczności szybu w żądanym okresie czasu.

Analiza dotychczasowych metod obliczeniowych została przedstawiona w pracy [14].

Wszystkie metody obliczeniowe z uwagi na przyjęte do rozważań założenia podzielić można na dwie grupy:

- metody dotyczące pierścienia nieograniczonej wysokości,
- metody zakładające pierścień o wysokości ograniczonej.

2.1. Metody określania grubości cylindra nieograniczonej wysokości

Do najstarszych do tej pory stosowanych wzorów na grubość płaszcza skał zamrożonych, opartych o założenie grubościennych naczyń (rur) nieograniczonej wysokości, są wzory Lamego

$$e = b - a = a \left(\sqrt{\frac{k_c}{k_c - 2p}} - 1 \right) \quad (1)$$

lub, że

$$p = \frac{k_c}{2} \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right), \quad (2)$$

wzory Hubera w postaci:

$$e = b - a = a \left(\sqrt{\frac{k_c}{k_c - \sqrt{3} p}} - 1 \right) \quad (3)$$

lub, że

$$p = \frac{k_c}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right), \quad (4)$$

gdzie:

- e = b - a - grubość płaszcza skał zamrożonych,
- a - promień szybu w wyłomie,
- b - zewnętrzny promień cylindra skał zamrożonych,

$$k_c = \frac{R_c}{n} \quad - \text{dopuszczalne naprężenia na ściskanie skał zamrożonych,}$$

p - ciśnienie poziome skał otaczających,
n - współczynnik bezpieczeństwa przyjmowany $n = 2$ [14].

Wzory (1,2,4,3) zostały wyprowadzone dla modelu ciała idealnie sprężystego spełniającego następujące warunki:

- materiał jest jednorodny, scharakteryzowany stałymi,
- ν , E, σ_{pr} , R_c ,
- własności te nie ulegają zmianom w czasie,
- materiał jest nieściśliwy ($\nu = 0,5$).

Różnice we wzorach wynikają z przyjęcia odmiennych hipotez wytrzymałościowych, tj. hipotezy τ_{max} , i hipotezy energetycznej Hubera-Misesa. Analiza tych wzorów przeprowadzona przez autora pracy [14] wykazała ich ograniczony zakres stosowania z uwagi na wielkość ciśnienia i tak:

- dla wzoru Lamé zakres stosowalności wzoru ogranicza ciśnienie zawarte w granicach:

$$0 \leq p \leq 0,42 \sigma_{pr} \quad (5)$$

- dla wzoru Hubera:

$$0 \leq p \leq 0,485 \sigma_{pr} \quad (6)$$

Wielkości te uzyskano przy założeniu, że stosunek $\frac{b}{a} = 2,5$ podczas, gdy w rzeczywistości dla szybów rejonu ROW-u stosunek ten wynosi ok. 1,5 co jeszcze bardziej ograniczyłoby zakres stosowalności wzorów (1,3)

Metoda O. Domke [14]

Wzory O. Domke wyprowadzone zostały dla ciała idealnie sprężystoplastycznego spełniającego następujące warunki:

- materiał jest jednorodny charakteryzujący się stałymi wielkościami ν , E, Q (granica plastyczności).
- wielkości te nie ulegają zmianom w czasie,
- odkształcenia są wprost proporcjonalne do przyłożonych naprężeń,
- materiał nie wykazuje wzmocnienia powyżej granicy plastyczności,
- materiał jest nieściśliwy ($\nu = 0,5$).

Przy tych założeniach wzory podane przez O. Domkego przedstawiają się następująco:

$$p'_{kr} = \frac{\sigma_{sc}}{2} \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right), \quad (7)$$

$$p_{kr}'' = \sigma_{sc} \ln \frac{a}{b}, \quad (8)$$

$$p = \frac{\sigma_{sc}}{2} \left(2 \ln \frac{a}{b} + 1 - \frac{a^2}{b^2} \right), \quad (9)$$

gdzie:

- p_{kr}' - pierwsze ciśnienie krytyczne tj. ciśnienie przy którym na wewnętrznej powierzchni cylindra ($r=a$) materiał przechodzi w stan plastyczny,
- p_{kr}'' - drugie ciśnienie krytyczne tj. ciśnienie przy którym na zewnętrznej powierzchni cylindra ($r=b$) wystąpią również deformacje plastyczne,
- p - dowolne ciśnienie, dla którego położenie granicy oddzielającej strefę sprężystą od plastycznej zawiera się w granicach;

$$a < p < b$$

i

$$p_{kr}' < p < p_{kr}''$$

Te same wzory stosuje się w chwili obecnej [14] dla obliczeń wytrzymałościowych rur grubościennych podstawiając jedynie w miejsce σ_{sc} (wytrzymałość na ściskanie) granicę plastyczności Q . Inną formą wzoru (7) O. Domke jest wzór podany przez W.W. Sokołowskiego [14] w postaci:

$$e = a \left[e^{\frac{(\gamma H)}{\sigma_{sc}}} - 1 \right] s, \quad (10)$$

gdzie:

s - oznacza współczynnik bezpieczeństwa $s = 1.1 - 1.2$.

Inny sposób określania grubości płaszcza mroźniowego nieograniczonej wysokości podał w 1965 roku A. Sakustowicz w pracy [12]. Przy założeniu hydrostatycznego stanu naprężeń panujących w górotworze ($p = \gamma \cdot H$) reakcji obudowy tymczasowej p_0 , Autor pracy podał sposoby określania grubości płaszcza i jego deformacji dla dwóch przypadków, a mianowicie ośrodka sprężysto-lepkiego wg modelu Maxwella i plastyczno-lepkiego wg modelu Binghama.

Dla przyjętego modelu Maxwella wzór określający grubość pierścienia skał zamrożonych przedstawia się w postaci:

$$e = a \left(\sqrt[2n]{\frac{p_1}{\sigma_{p1-n} \sqrt[3]{(p-p_0)}}} - 1 \right), \quad (11)$$

a dla modelu Bingham

$$e = a \left[e^{\left(\frac{p - p_0}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{pl}} \right) - 1} \right], \quad (12)$$

gdzie:

σ_{pl} - granica plastyczności przy ściskaniu,
 n - stała materiałowa.

Analiza wzorów 11 i 12 wskazuje, że stanowią one uogólnienie wzorów Hubera (3) czy wzorów (7-9) stosowanych dla obliczeń rur grubościennych uwzględniających dodatkowo oddziaływanie obudowy tymczasowej.

Zakres stosowania tych wzorów określony w pracy [14] wynosi (0,92-1,06) Q (granica plastyczności) co jest dwukrotnie większą wartością tego zakresu w stosunku do wzorów Lamé czy Hubera.

2.2. Metody określania grubości cylindra ograniczonej wysokości

Jedną z metod dotyczących obliczania grubości cylindra skał zamrożonych podał w 1958 roku J. Galanka.

Wyzaczył on mianowicie bezpieczną wysokość zabierki szybowej z warunki równowagi naprężeń ściskających w osi symetrii i ciężaru własnego odcinka płaszczka zamrożonych skał.

Wyprowadzony wzór posiada postać:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\pi^2 E}{256 \gamma} \cdot \frac{(2b)^4 - (2a)^4}{(2s + a) e}}, \quad (13)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości podłużnej skał zamrożonych,
 γ - ciężar objętościowy zamrożonego górotworu.

Innymi wzorami z metod tej grupy są wzory podane w pracach radzieckich (4,5,6,14).

Przy założeniu idealnej plastyczności skał zamrożonych, w zależności od stopnia zamrożenia, wielkości kąta tarcia wewnętrznego i stopnia umocowania obu końców płaszczka zaproponowano do stosowania następujące wzory:

$$e = \sqrt[3]{\frac{\gamma \cdot h}{\sigma_B (T)}} \quad (14)$$

oraz

$$e = \frac{\sqrt[3]{\gamma \cdot h}}{5 \sigma_B (T)} \quad (15)$$

Wzór 12 zaleca się stosować w przypadkach małej wielkości kąta tarcia wewnętrznego i słabym powiązaniu dolnego końca płaszczka mroźniowego z warstwami zalegającymi niżej.

W przypadku dużej wielkości kąta tarcia wewnętrznego i sztywnym zamocowaniem obydwu końców odsłoniętej zabierki zalecany jest wzór 13. Podobną postać posiada wzór podany przez M.J. Libermana [4,10,14,15].

$$e = h \cdot \frac{\gamma \cdot H}{G_{sc}(T)} \quad (16)$$

Wzór ten został wyprowadzony przy przyjęciu pewnych założeń, a mianowicie:

- w górotworze panuje stan hydrostatyczny, ta że ciśnienie skał otaczających na płaszcz mroźniowy jest równe ciśnieniu pionowemu,
- obydwu końce (górnny i dolny) zabierki szybowej są sztywno umocowane i przemieszczenia tych końców są równe zero,
- skały zamrożone są ośrodkiem sprężysto-plastycznym, dla którego granica plastyczności odkształcenia postaciowego równe jest połowie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $G_{sc}(t)$ wyznaczonej dla danego rodzaju skały, temperatury jej zamrożenia itd.,
- z uwagi na występujące między górotworem, a płaszczem mroźniowym siły tarcia tylko połowa ciężaru płaszczka przenosi się na płaszczyzny pęknięcia, które przechodzą przez krańce zabierki.

Przedstawione metody wyznaczania parametrów płaszczka mroźniowego jak to wynika ze wzorów od 1 do 16 różnią się i to niekiedy w znaczny sposób. Różnice pomiędzy rezultatami obliczeń wykonywanych tymi metodami, są wynikiem bądź to przyjętych do rozważań odmiennych hipotez wytrzymałościowych, bądź też z przyjęcia różnych modeli fizycznych skał zamrożonych.

Nie oceniając szczegółowo słuszności poszczególnych metod obliczeniowych, co zresztą wykazano w pracy [14], generalnie stwierdzić należy, że podstawowym parametrem niezbędnym do ich stosowania jest dokładna znajomość własności wytrzymałościowych skał zamrożonych, własności reologicznych oraz zmiany tych własności dla różnych stadiów obciążenia. Dotychczasowe rezultaty prac badawczych w tym zakresie [1,4,5,8,15,16] wykazały, że specyficzne środowisko jakie tworzą skały zamrożone na skutek samej technologii ich zamrażania, charakteryzują się dużą zmiennością własności wytrzymałościowych reologicznych itp.

Stąd też słusznym wydaje się dokładne określenie tych własności jako podstawy dalszych prac projektowych w zakresie technicznym i technologicznym.

3. Prace badawcze związane z optymalizacją grubości płaszczka skał zamrożonych

Dotychczasowe doświadczenia stosowania metody sztucznego zamrażania skał w warunkach polskich zagłębi węglowych potwierdziły całkowicie

jej skuteczność i stosunkowo dużą niezawodność stosowania.

Równocześnie z coraz powszechniejszym stosowaniem tej metody, prowadzone są prace badawcze mające na celu określenie optymalnych parametrów techniczno-technologicznych, które mają zapewnić uzyskanie nie tylko odpowiednich efektów technicznych lecz także ekonomicznych.

Problemy te są rozwiązywane za pomocą ściśle uzupełniających się metod, a mianowicie:

- analizy rezultatów uzyskanych przy głębieniu szybów, ze szczególnym uwzględnieniem technologii ich drażenia,
- badań eksperymentalnych zmierzających do określenia przebiegu procesu zamrażania w górotworze i jego wpływu na własności wytrzymałościowe skał,
- doskonalenie matematycznych metod obliczeniowych w oparciu o przyjęte schematy obliczeniowe i wyniki dwóch poprzednich rodzajów badań,

Zgodnie z przedstawioną metodyką postępowania w Instytucie projektowania, Budowy Kopalń podjęto prace badawcze realizowane dwuetapowo.

Pierwszy etap obejmował analizę rezultatów uzyskanych podczas głębienia 10 szybów w rejonie Rybnickiego Okręgu Węglowego. Analiza ta objęła swym zakresem tylko te parametry techniczno-technologiczne procesu głębienia, które w górnej mierze decydują o uzyskanych efektach technicznych i ekonomicznych.

Zasadniczą przyczyną zastosowania mroźniowej metody głębienia były trudne, a nawet bardzo trudne warunki hydrogeologiczne w postaci mało związanych zawodnionych skał czwartorzędowych z lokalnymi kurzawkami oraz duża ilość horyzontów wodnych.

Mrożone skały czwartorzędowe i trzeciorzędowe składały się w przeważającej ilości (ok. 80%) z zawodnionych warstw gliny, pyłu, iłu i piasku, tj. skał luźnych i plastycznych. Warstwy te zalegały średnio do głębokości ok. 300 m, dlatego też we wszystkich przypadkach zastosowano metodę mrożenia z powierzchni. Maksymalny dopływ wody wahał się w granicach 1,3-3 m³/min. a obliczone wielkości ciśnień poziomych skał i wody wynosiły w granicach $32 \cdot 10^5$ N/m².

Ze względów techniczno-ruchowych średnice zgłębnionych szybów wynosiły:

- dla szybów wentylacyjno-materiałowych - 5,5 mm,
- dla szybów wydobywczych 7,2 - 7,5 m.

Grubości płaszczka skał zamrożonych dla szybów przyjęto:

- 1,5 m dla szybów o średnicy 5,5 m,
- 2,0 - 2,5 m dla szybów o średnicy 7,2 m,
- 3,0 - 3,5 m dla szybów o średnicy 7,5 m.

Z uwagi na możliwość przzerwiania się horyzontów wodonośnych, zaleca się prowadzić mrożenie do głębokości 5-10 m poniżej warstwy, które mają być zamrożone.

Warunek ten nie został spełniony we wszystkich analizowanych szybach - mrożenie kończyło się bowiem około 30 m powyżej warstw karbońskich, które w

tej partii górotworu na kontakcie z nadkładem są zwietrzałe i spękane. Prawdopodobnie jedną z przyczyn awarii w szybie nr 4 i nr 9 było - właśnie zbyt płytkie zamrożenie górotworu do gł. 80 i 90 m, co przy występujących warstwach plastycznych, pęczniejących spowodowało wypiętrzanie dna szybu z prędkością szacowaną na ok. 4,5 m/dobę. Konsekwencją tego było całkowite wyłączenie z eksploatacji szybu nr 9.

W głębionych w latach 1967-71 szybach nr 8 i 10 głębokość mrożenia warstw nadkładowych powiększono o 30 m. Przebieg głębienia tych szybów jak i warunki głębienia, potwierdziły słuszność wcześniejszego stwierdzenia o konieczności zamrażania znacznie poniżej warstw zawodnionych.

Bezpośredni wpływ na czas aktywnego mrożenia górotworu, nie uwzględniając wydajności agregatów, mają grubość płaszcza mrożeniowego i głębokość prowadzonego mrożenia.

W analizowanych przypadkach szybu o mniejszej grubości płaszcza mrozono około dwa razy krócej (szyb nr 5 i 6 - 50 dni) od szybów o grubości płaszcza 3 - 3,5 m i głębokość zamrażania 300 m (ok. 124 dni).

Niewątpliwie aspekt ten jest ważny ze względów ekonomicznych, krótszy okres mrożenia zezwala bowiem na wcześniejsze przystąpienie do zgłębnienia szybu.

Jak jednak wykazują doświadczenia ruchowe przy mniejszej grubości płaszcza istnieje niebezpieczeństwo uszkodzenia rur mrożeniowych robotami strażakowymi, czy zniszczenia rur na skutek odkształcania się skał do środka szybu, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie się uzyskiwanych postępów, przestoje i zagrożenie warunków bezpieczeństwa pracy.

Biorąc pod uwagę tylko średnie postępy uzyskane w szybach nr 8 i 10 w porównaniu z pozostałymi szybami widać różnicę rzędu ok. 100% na korzyść szybów o głębszym mrożeniu i grubszym płaszczu. Tablica nr 1.

Odsunięcie bowiem otworów mrożeniowych od wyłomu pozwoliło uniknąć wspomnianych uprzednio konsekwencji, uszkodzeń rur i awarii.

Pozwoliło to również na znaczne zmniejszenie pracochłonności głębienia wykonywanego ręcznie i mechanicznie w partii mrożonej i równocześnie umożliwiała stosowanie większych zabiorów w granicach nawet do 3,0 m.

Z konieczności przedstawiono poniżej tylko niektóre czynniki decydujące o efektach techniczno-ekonomicznych głębienia szybów metodą mrożeniową.

Zestawienie maksymalnych i średnich postępów miesięcznych osiągniętych w głębieniu analizowanych szybów w warstwach zamrożonych

TABLICA 1

Szyb	Okres głębienia	Maksymalny postęp mb/mies.	Średni postęp mg/mies.
1	2	3	4
Nr 1	1964 - 1965	35,9	23,59
Nr 2	1964 - 1966	36,5	25,98
Nr 3	1964 - 1966	35,5	20,4

od. tablicy 1

1	2	3	4
Nr 4	1963	45,1	33,72
Nr 5	1963 - 1964	29,48	17,50
Nr 6	1963 - 1964	40,95	23,05
Nr 7	1962 - 1963	30,6	18,26
Nr 8	1967 - 1968	50,2	34,93
Nr 9	1962	20,4	16,15
Nr 10	1970 - 1971	53,5	46,20

Prace badawcze i analityczne prowadzone w znacznie szerszym zakresie pozwoliły na zaprogramowanie kompleksowych badań laboratoryjnych, które sukcesywnie realizowane są w Instytucie, zgodnie z drugim etapem prac. Ten etap prac badawczych dotyczył określenie własności fizyko-mechanicznych skał zamrożonych.

Na podstawie dotychczasowych prac badawczych zrealizowanych zarówno w kraju i za granicą stwierdzono, że wytrzymałość skał zamrożonych jest funkcją takich czynników jak: temperatura, porowatość skał, wilgotność, uziarnienie, czas działania obciążenia oraz warunki w jakich zachodzi zamrażanie.

W Polsce badanie wytrzymałościowe skał zamrożonych objęty swym zakresem jedynie piaski kwarcowe, których skład granulometrycznych jak i wilgotność czy porowatość były ustalone w sposób sztuczny w zależności od toku badań zaprogramowanych przez Autorów.

Brak było natomiast opracowań dotyczących konkretnych rzeczywistych przypadków warstw skalnych występujących w warunkach polskich.

Dlatego też uznano, że celowe przeprowadzenie takich badań dla dwóch rodzajów warstw nakładowych, a mianowicie: piasek drobnoziarnisty szary z ilonami oraz ił zielonoszary z laminami i przerostami pyłu.

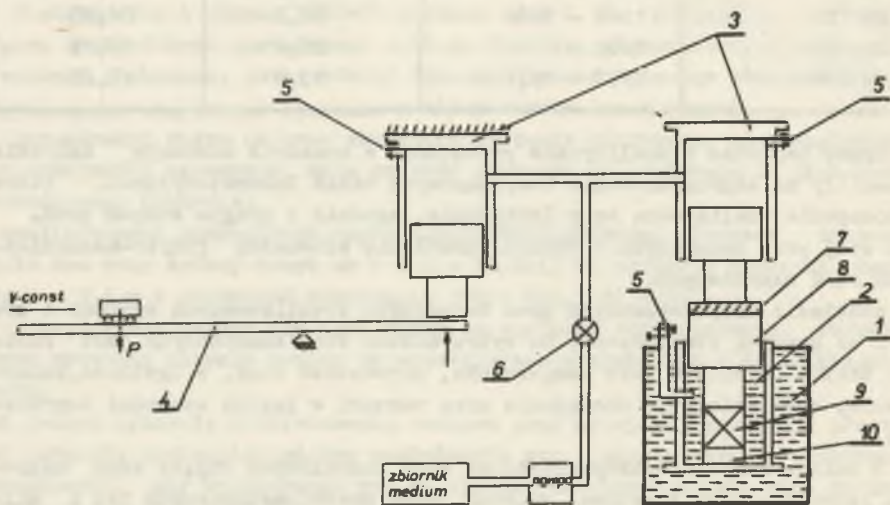
Próbki do badań pobrano w czasie głębieńszy Pniówek IV, skąd w hermetycznych pojemnikach dostarczone zostały do laboratorium. W całym przebiegu procesu deformacji w czasie, wyróżnia się dwa rodzaje deformacji, a mianowicie deformacje natychmiastowe występujące w chwili przyłożenia obciążenia oraz deformacje następujące wraz z upływem czasu.

Pierwszy rodzaj deformacji decydował będzie o ilościowym przebiegu zjawisk reologicznych, a znajomość wielkości niszczących obciążeń będzie podstawą programowania reologicznych badań laboratoryjnych.

Zatem w badaniach ograniczono się do określenia doraźnej wytrzymałości skał poddanych wszechstronnemu działaniu obciążenia, przy czym przyrost wielkości naprężeń głównych $\dot{\sigma}_1$, regulowany był w trzech zakresach prędkości:

$$\dot{\sigma}_1 = \frac{d\sigma}{dt} = \text{const}, \dot{\sigma}_2, \dot{\sigma}_3$$

Badania przeprowadzono dla ilościowo różnych stanów naprężeń oraz dla określonych temperatur zamrażania najczęściej stosowanych w praktyce budownictwa podziemnego kopalń.



Rys. 1. Schemat ideowy stoiska badawczego

Dla zrealizowania prac badawczych skonstruowano specjalne stoisko. Stoisko badawcze, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 1 składa się z czterech zasadniczych części, a mianowicie:

- 1 - komory w osłonie adiabaticznej, wypełnionej płynem "Borygo",
- 2 - komory do badań wytrzymałościowych,
- 3 - układu siłowników hydraulicznych,
- 4 - dźwigniowego układu obciążającego.

Funkcjonalność układu zapewniają urządzenia dodatkowe takie, jak:

- 5 - zawody odpowietrzające,
- 6 - zawór odcinający,
- 7 - izolator termiczny.

Przygotowaną zamrożoną próbkę (9) rys. 1 wkłada się do komory (2) rys. 1 wypełnionej płynem "Borygo" oziębionym do żądanej temperatury, przy otwartym zaworze (5). Następnie po wstawieniu próbki do komory blokuje się ruch tłoka (8) i zamykając zawór (5) ustala żądaną wielkość ciśnienia w komorze. Następnie za pomocą pompy poprzez zawór (6) napełnia się układ siłowników (3), przy otwartych zaworach (5). Po napełnieniu układu odcina się zaworem (6) dopływ medium i ustala połączenie wózka

Teraz po zwolnieniu tłoka (8) uruchamia się wózek i wywiera obciążenie pionowe na badaną próbkę.

Ciśnienie poziome w komorze ciśnieniowej (2) utrzymywane jest na stałym poziomie dzięki specjalnemu zaworowi regulacyjnemu UZPR-10 o zakresie regulacji do $63 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.

W czasie próbki za pomocą specjalnego układu pomiarowego. Szczegółowy opis stoiska i układu pomiarowego przedstawiono w pracy (16). Na rysunkach 2-6 przedstawiono przykładowe graficzne rezultaty wykonanych prac badawczych.

Bezpośrednie wyniki badań laboratoryjnych stanowiły wykresy w układzie pionowe naprężenia główne σ_1 oraz odpowiadające im jednostkowe odkształcenia ϵ , przy stałych naprężeniach poziomych σ_3 i stałej prędkości przyrostu obciążenia.

Przedstawione na rysunkach nr 2 do 6 - zależności $\epsilon = f(\sigma_1)$ przy $\sigma_3 = \text{const}$. wskazują, że w wszystkich przypadkach we krzywe zwrócone są wypukłością w kierunku osi naprężeń.

Charakter przebiegu danej funkcji zależy jest od trzech czynników, a mianowicie:

- temperatury zamrażania,
- wielkości naprężeń poziomych σ_3 ,
- prędkości obciążenia próbki.

Obniżenie temperatury zamrażania, czy wzrost naprężeń poziomych powoduje we wszystkich przypadkach wzrost kąta nachylenia krzywej do osi. Inny charakter zmian jakościowych zaobserwowano natomiast w przypadku zmian prędkości przyrostu obciążenia pionowego σ_1 .

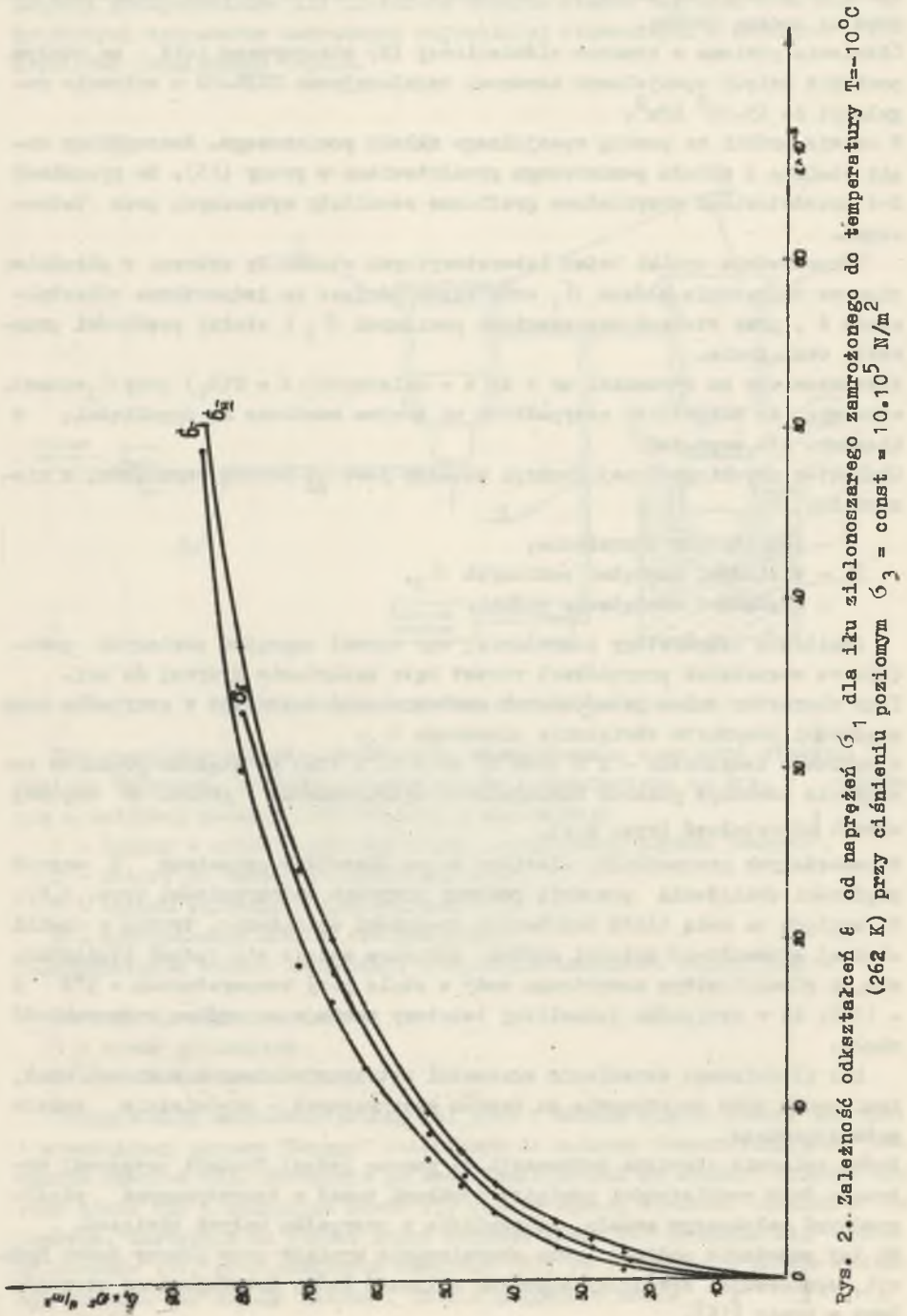
W zakresie temperatur - 5°C (268°K) do - 10°C (263°K) większa prędkość obciążenia powoduje pozorne zmniejszenie wytrzymałości próbki - szybszy wzrost odkształceń (rys. 2,4).

W pozostałych przypadkach, zjawisko to ma charakter przeciwny i wzrost prędkości obciążenia powoduje pozorny przyrost wytrzymałości (rys. 3,6). Ze względu na małą ilość założonych prędkości obciążenia, trudno w chwili obecnej sformułować wnioski ogólne, słusznym wydaje się jednak stwierdzenie, o niecałkowitym zamrożeniu wody w skale przy temperaturach - 5°C i - 10°C , co w przypadku jednolitej tekstury rsutuje na ogólną wytrzymałość skały.

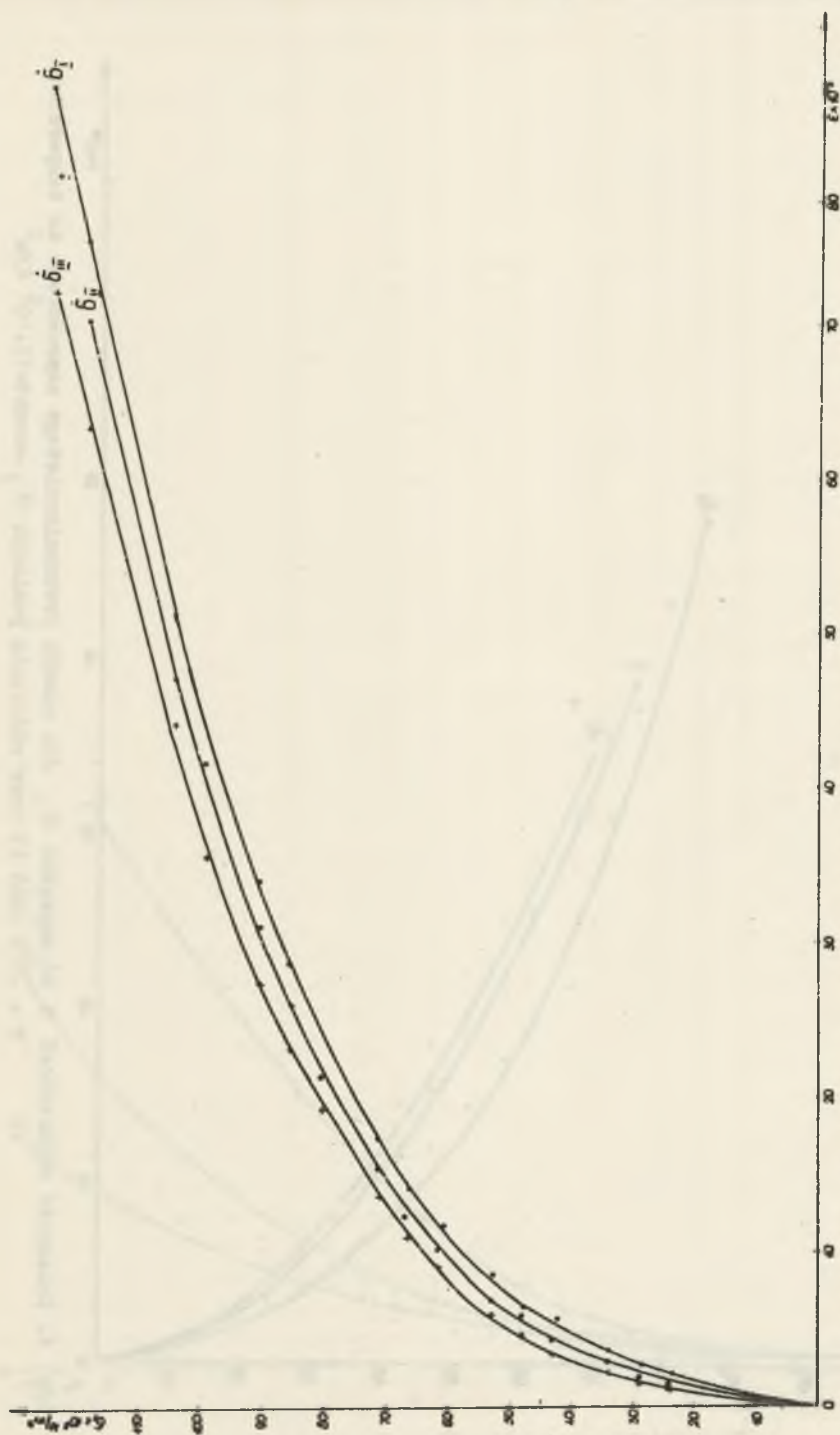
Dla ilościowego określenia własności wytrzymałościowych badanych skał, koniecznym było dopasowanie do danych empirycznych - odpowiednio modelu matematycznego.

Próba opisanie zjawiska deformacji za pomocą jednej funkcji potęgowej wykazała duże rozbieżności pomiędzy wynikami badań a teoretycznymi współrzędnymi założonego modelu, szczególnie w przypadku małych obciążeń.

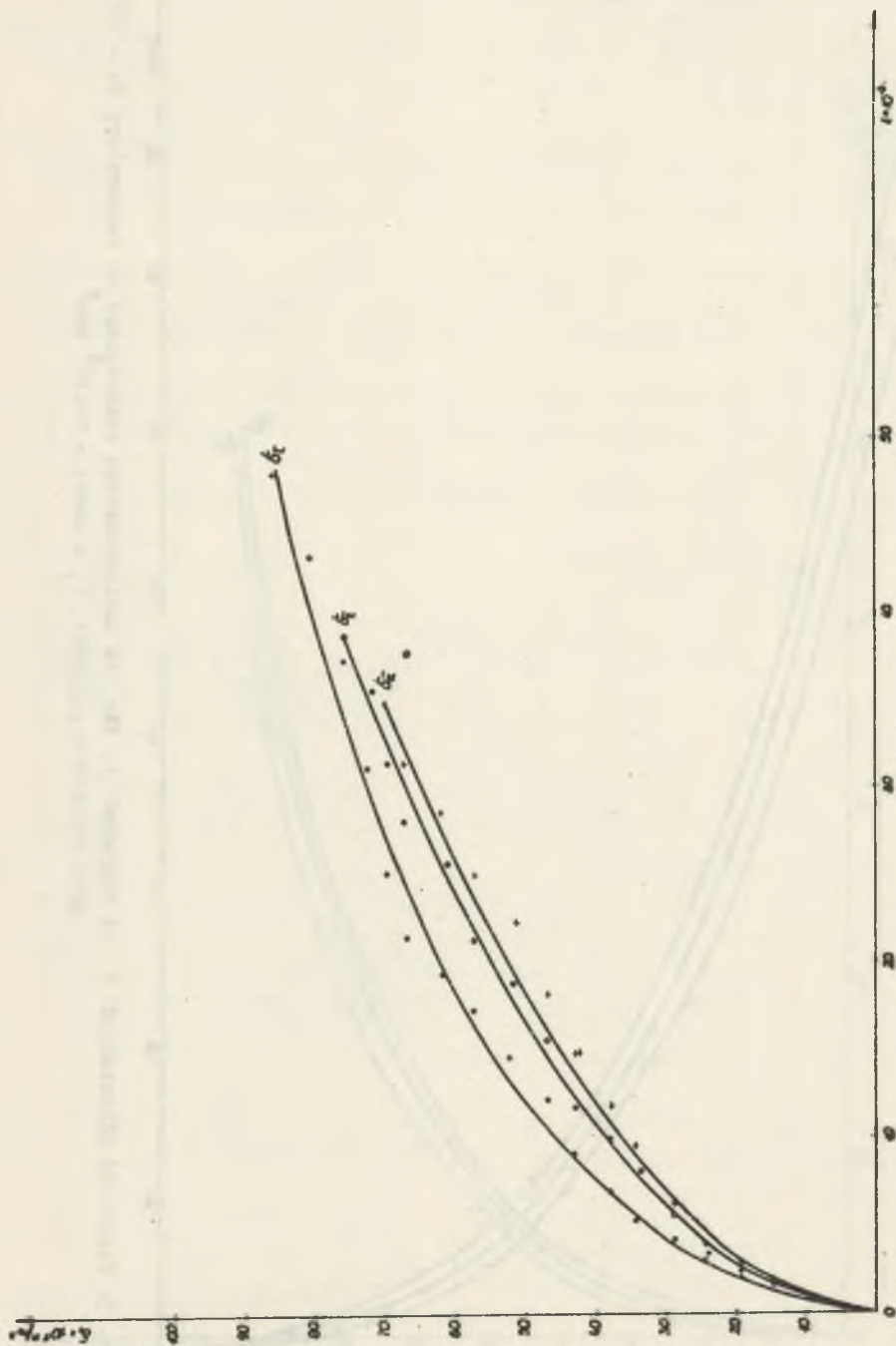
Na tej podstawie podjęto próbę skorelowania wyników przy pomocy dwóch funkcji, opracowując specjalny algorytm obliczeń który przedstawiono szczegółowo w pracy [16].



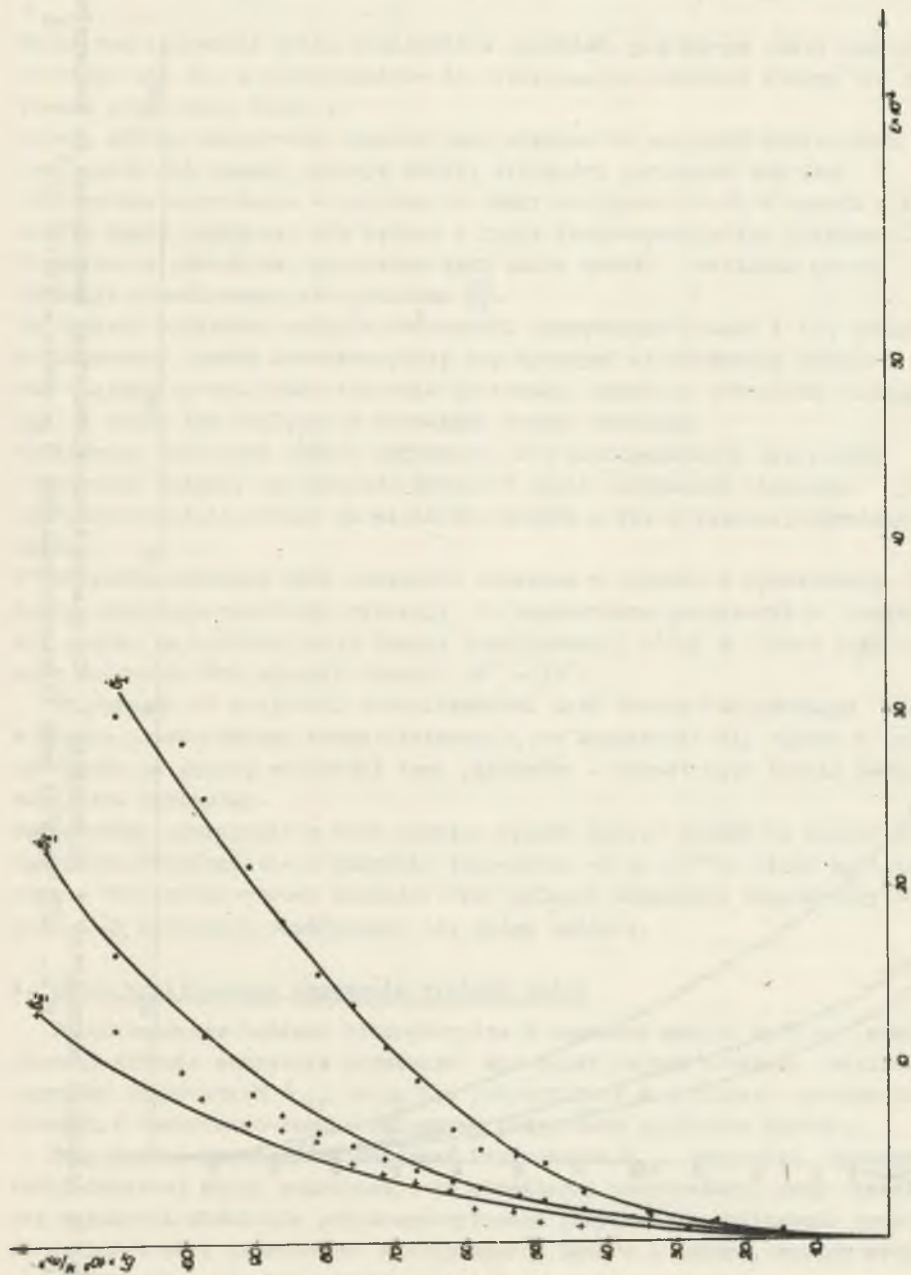
Rys. 2. Zależność odkształceń ϵ od naprężeń σ_1 dla 100 zielonoszarego zamrożonego do temperatury $T = -10^\circ\text{C}$ (262 K) przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = \text{const} = 10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$



Rys. 3. Zależność odkształceń δ od naprężeń σ_1 dla iku zielonoszarego zamrożonego do temperatury $T = -20^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = \text{const} = 10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$



Rys. 4. Zależność odkształceń ϵ od naprężeń σ_1 dla piasku drobnoziarnistego zamrożonego do temperatury $T = -5^\circ\text{C}$ (268 K) przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = \text{const} = 15 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$



Rys. 5. Zależność odkształceń ϵ od naprężeń σ_1 dla piasku drobnoziarnistego zamrożonego do temperatury $T = -25^\circ\text{C}$ (248 K) przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = \text{const} = 15 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$



Rys. 6. Zależność odkształceń ϵ od naprężeń σ_1 dla piasku drobnoziarnistego zamrożonego do temperatury $T = -30^\circ\text{C}$ (243°K) przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = \text{const} = 15 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Przy założeniu współczynnika regresji równego 0,95 wyniki badań opisano przy pomocy dwóch funkcji, określając praktyczny punkt przegięcia krzywych odpowiadający zmianie charakteru deformacji skały, oznaczony jako ϵ_{kr} .

Punkt ten odpowiada takim wielkościom naprężeń, przy których skały zamrożone odkształcają się proporcjonalnie do działających naprężeń i mogą być traktowane jak ciało Hooke'a,

Jeżeli główne naprężenia pionowe będą większe od naprężeń krytycznych określonych dla danego rodzaju skały, wielkości poziomych naprężeń σ_3 i temperatury zamrażania - deformacje skały następować będą w sposób nieliniowy: skała znajdować się będzie w fazie lepko-sprężystego pęknięcia.

Ilościowy i jakościowy charakter tych zmian wyraża wielkość modułu deformacji określonego jako pochodna $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$.

Porównanie wielkości modułów deformacji zamrożonego piasku i łu wskazuje, że zamrożony piasek charakteryzuje się wyższymi wielkościami modułu i to bez względu na wielkość ciśnienia poziomego, szybkość przyrostu obciążenia, a także bez względu na rozważany zakres obciążeń.

Analizując wielkości modułu deformacji dla poszczególnych przypadków stwierdzić należy, że wielkość modułu w fazie deformacji liniowych jest kilkunastokrotnie wyższa od wielkości modułu w fazie lepko-sprężystego pęknięcia.

W przypadku obliczeń tych wielkości uzyskano w oparciu o konstrukcję kół Mohra. Uzyskane rezultaty wykazują, że temperatura zamrażania w zasadzie nie wpływa na wielkość kąta tarcia wewnętrznego, który w obydwu przypadkach badanych skał wynosił średnio $32^\circ - 33^\circ$.

Porównując te wielkości z wielkościami kąta tarcia wewnętrznego skały w stanie niezamrożonym można stwierdzić, że zamrażanie się wpływa w istotny sposób na zmianę wielkości tego parametru - wzrost kąta tarcia wewnętrznego jest minimalny.

Temperatura zamrażania w dość istotny sposób wpływa jednak na wzrost siły spójności, szczególnie w zakresie temperatur -5 do -15°C , kiedy następuje prawie trzykrotny wzrost kohezji. Przy dalszym obniżaniu temperatury wielkość siły spójności, praktycznie nie ulega zmianie.

4. Ocena praktycznego znaczenia wyników badań

Przeprowadzone badania laboratoryjne i uzyskane wyniki mają w chwili obecnej głównie znaczenie poznawcze. Nie mniej jednak ustalone wielkości naprężeń krytycznych σ_{kr} mogą być wykorzystane do obliczeń wytrzymałościowych w techniczno-technologicznych projektach głębinienia szybów.

Przyjmując, że wielkość naprężeń krytycznych σ_{kr} odpowiada wytrzymałości doraźnej skały zamrożonej, do określonej temperatury, przy określonej wielkości ciśnienia poziomego-wykonano przykładowo obliczenia grubości cylindra skał zamrożonych według wzorów Lamé'a i Hubera, wzorów stosowanych obecnie w praktyce obliczeniowej.

Obliczeń dokonano dla średniej temperatury zamrażania równej -10°C (263°K), przy ciśnieniu poziomym $\sigma_3 = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ dla trzech typowych średnic szybów w wyłomie 6,0 m, 7,8 m, 8,2 m oraz porównano wyliczone teoretycznie wielkości z grubością cylindrów stosowaną praktycznie dla rejonu ROW-u.

TABLICA 2

Rodzaj skał	Grubość płaszczka [m]	Według Lamé'a			Hubera		
		$e = a \left(\sqrt{\frac{R_c}{R_c - 2p}} - 1 \right)$			$e = a \left(\sqrt{\frac{R_c}{R_c - 3p}} - 1 \right)$		
		a=3 m	a = 3,9 m	a = 4,1 m	a = 3 m	a = 3,9 m	a=4,1m
piasek drobnoziarnisty	obliczona	0,6	0,78	0,82	0,35	0,46	0,48
	stosowana	1,5	2,5	3,5	1,5	2,5	3,5
ił zielonoszary	obliczona	0,42	0,55	0,58	0,33	0,43	0,46
	stosowana	1,5	2,5	3,5	1,5	2,5	3,5

Porównanie wyników obliczeń teoretycznych grubości płaszczka skał zamrożonych z wielkościami obecnie stosowanymi wskazuje, że stosowane obecnie grubości zawierają w sobie współczynniki bezpieczeństwa wynoszące w granicach od 2,5 do 7,5.

Zaznaczyć należy, że obliczenie wykonano biorąc pod uwagę równomierny rozkład temperatury w poprzecznym przekroju cylindra skał zamrożonych, co nie odpowiada warunkom rzeczywistym.

Jak to stwierdzono w pracy [1] nierównomierny rozkład temperatury w przekroju powoduje około 30% wzrost jego wytrzymałości w stosunku do cylindra o jednakowej stałej temperaturze.

Rzeczywiste wielkości tych współczynników będą zatem jeszcze większe.

Wyniki stąd wnioski o istnieniu możliwości skrócenia czasu zamrażania i zmniejszenie kosztów stosowania tej metody poprzez zmniejszenie grubości cylindra skał zamrożonych wytwarzanego w procesie zamrażania górotworu. Niewątpliwą przeszkodą stanowią tu trudności technologiczne związane z wierceniem otworów mroźniowych, ich pionowością i zdolnością do odkształceń w czasie odsłonięcia odciosów szybowych.

Problem ten niestety w chwili obecnej nie jest rozwiązany i wymaga odpowiednich prac teoretyczno-badawczych, jak i konstrukcyjnych.

Oceniając perspektywy stosowania metod mroźniowej dla potrzeb budownictwa podziemnego stwierdzić należy, że wszelkie prace dotyczące własności wytrzymałościowych skał zamrożonych jako podstawy do oceny warunków geotechnicznych wyrobisk drążonych tą metodą są uzasadnione i celowe.

5. Wnioski końcowe

W oparciu o przedstawione rozważania w zakresie optymalizacji mroźniowej metody głębinienia szybów można postawić następujące wnioski końcowe:

1. Stosowane w praktyce metody obliczeniowe grubości płaszcza skał zamrożonych ograniczają się do teoretycznych wzorów Lamé'go i Hubera, które ze względu na swoje założenia posiadają ograniczony zakres stosowania. Pozostałe wzory uwzględniające także plastyczność skał zamrożonych ze względu na stosowane empiryczne współczynniki są trudne do zastosowania w praktyce.
2. Istotnym elementem wszystkich metod obliczeniowych jest wytrzymałość skał zamrożonych, której wielkość uzależniona jest od szeregu czynników naturalno-geologicznych i hydrogeologicznych panujących w górotworze nienaruszonym. Przeprowadzone badania laboratoryjne pozwoliły na wyznaczenie pewnych wielkości charakterystycznych, które mogą być podstawą do uciślenia obliczeń grubości cylindra skał zamrożonych.
3. Porównanie teoretycznych wyników grubości płaszcza skał zamrożonych z wielkościami stosowanymi w praktyce wskazuje, że w przypadku stosowania do obliczeń wzorów Lamé'go i Hubera powoduje zawyżenie wskaźników bezpieczeństwa, które wynoszą nawet w niektórych przypadkach ok. 7. W świetle przeprowadzonych badań grubość płaszcza mroźniowego mogłaby być mniejsza.
4. Stosowanie mniejszych grubości płaszcza zamrożonego wymagałoby jednak opracowania specjalnej technologii wiercenia otworów mroźniowych oraz głębinienia szybu, żeby uniknąć uszkodzeń rur mroźniowych w czasie prowadzenia robót strzałowych.
5. Przeprowadzone badania laboratoryjne z uwagi na ich pracochłonność objęły tylko dwa rodzaje warstw skalnych występujących w rejonie ROW.

Celowym wydaje się prowadzenie dalszych prac badawczych w tym zakresie, uwzględniających nie tylko wytrzymałość doraźną, lecz także reologiczne własności skał zamrożonych, co pozwoli na odpowiednie określenie kryteriów obliczeniowo-projektowych metody głębinienia szybów z zastosowaniem sztucznego zamrażania skał.

LITERATURA

- [1] Bakłasow J.W., -Kartozija B.A. - Rasczot ledoporodnogo oğređđzenija z uczoTom pieremiennogo pola temperatury. Naucznyje trudy Moskiewskiego Instytutu Górniczego. Moskwa 1974 nr 7.
- [2] Borecki M., Chudek M. - Mechanika górotworu. Wydawnictwo Śląsk Katowice 1972 r.
- [3] Chudek M. - Rozkład naprężeń w kołowej murowej obudowie pionowych wyrobisk górniczych. Przegląd Górniczy 1964 r. nr 2.
- [4] Chudek M., Żyliński - Opracowanie metodyki obliczania obnażonych ościsów w szybach gębinowych metodą zamrażania skał.

- Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni, Gliwice 1973. (praca niepublikowana).
- [5] Chudek M., Żyliński R. - Zagadnienie wytrzymałości skał zamrożonych w świetle badań laboratoryjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Górnictwo z. 51 Gliwice 1974 r.
- [6] Cytowicz N.A. - Mechanika mierzłych gruntów Izd. "Wyższa Szkoła", Moskwa 1973 r.
- [7] Kacaurov J.Z., Tiutiunnik R.M., Kartoziya B.A. - Issledowanije požuczestni zamoroziennych piaskow w usłowijach objemnego napriazennogo sostojani. CNJEJ Ugol 1970 nr 5.
- [8] Kłeczek B. - Własności reologiczne skał płynnych mrożonych podczas głębienia szybów. Praca doktorska AGH, Kraków 1972 r.
- [9] Kłeczek B., Kłeczek Z. - Reologiczne ściskanie lodu w stałej temperaturze. Prace Komisji Górnictwo-Geodezyjnej PAN Górnictwo 1972 r. nr 11.
- [10] Liberman J.M. - Metod rasczota tołszczyzny zamrożennych porod. Akademia Nauk ZSRR. Moskwa 1971 r.
- [11] Posyłek E. - Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości. YZBiD-BG Mysłowice 1974 r.
- [12] Sałustowicz A. - Obliczanie grubości płaszcza mrożeniowego przy głębieniu szybów. Przegląd Górniczy 1965 r. nr 12.
- [13] Strzelecki Z. - Parametry wytrzymałościowe zawodnionych piasków kwarcowych. Przegląd Górniczy 1962 r. nr 7-8.
- [14] Waszewski W. - Analiza stosowanych metod obliczeniowych wyznaczania wytrzymałości oi odształceń pierścienia zamrożonego górotworu. Przegląd Górniczy 1963 nr 5.
- [15] Żyliński R. - Zagadnienie stateczności ociosów w szybach głębionych metodą zamrażania skał. Przegląd Górniczy 1973 r. nr 5.
- [16] Żyliński R. - Własności wytrzymałościowe skał zamrożonych w warunkach złożonego stanu naprężen. Praca doktorska Politechnika Śląska Gliwice 1975 r.

ПРОБЛЕМА ПРОЧНОСТИ ЗАМОРОЖЕННЫХ ПОРОД СО СТОРОНЫ
ОПТИМИЗАЦИИ ЗАМОРАЖИВАЮЩЕГО МЕТОДА ПРОХОДКИ СТВОЛОВ

Р е з ю м е:

В работе проводится анализ существующих до сих пор способов расчёта толщины замораживающего покрова, оценивая его практическую пригодность, а также обусловлена необходимость лабораторных испытаний на прочность замороженных пород. Дальше даются результаты исследовательских работ, а тоже возможности их использования для оптимизации замораживающего метода проходки стволов.

THE PROBLEM OF FROZEN ROCKS STRENGTH WITHIN THE ASPECT OF OPTIMIZATION OF SINKING SHAFTS BY MEANS OF FREEZING METHODS

S u m m a r y

In the paper an analysis of up till now used ways of calculations concerned with the thickness of freezing coat, has been presented. Their practical adaptability was evaluated, and the necessity of strength laboratory investigations of frozen rocks was motivated. In the further part of the results of research work devoted to this problem and the possibilities of their utilization for the optimization of sinking shafts by means of a freezing method, were presented.