

GÓRNICTWO z. 66

EUGENIUSZ POSYŁEK

**STUDIUM OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW  
PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU  
DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI**

(skrót)

**P O L I T E C H N I K A Ś L A Ś K A**  
**ZESZYT NAUKOWY Nr 433 – GLIWICE 1975**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 433



EUGENIUSZ POSYŁEK

**STUDIUM OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW  
PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU  
DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI**

(skrót)

---

GLIWICE 1975

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH  
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Iwo Pollo

REDAKTOR DZIAŁU

Mirosław Chudek

SEKRETARZ REDAKCJI

Anna Błażkiewicz

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
Gliwice, ul. Kujawska 2

---

Nakł. 80+170 Ark. wyd. 3,4 Ark. druk. 4,25 Papler offset. kl. III. 70x100. 80<sup>g</sup>  
Oddano do druku 27.12.1974 Podpis. do druku 10 12 1974 Druk zakończ. w styczniu 1975  
Zam. 247 74/75 H23 Cena zł 5,—

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

## S P I S T R E Ś C I

	Strona
1. WPROWADZENIE	3
2. PRZEGLĄD DOTYCHCZASOWYCH WYNIKÓW BADAŃ I OSIĄGNIĘĆ PRAKTYCZNYCH	4
3. CEL I ZAKRES PRACY ORAZ ZAŁOŻENIA	7
4. BADANIA NAD PRZEBIEGIEM ZAMRAŻANIA GÓROTWORU DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI	9
4.1. Zamrażanie górotworu jako proces nieustalonego przepływu ciepła połączony ze zmianą stanu skupienia	9
4.2. Badania w warunkach Rybnickiego Okręgu Węglowego na przykładzie szybu Z-VII	10
4.3. Analiza wyników badań	25
5. OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI	39
5.1. Wpływ podstawowych parametrów zamrażania na proces powstawania płaszczka mroźniowego	40
5.2. Optymalizacja parametrów otworu i instalacji mroźniowej	43
5.3. Optymalizacja parametrów płaszczka mroźniowego	45
6. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI	57
7. LITERATURA	59
8. STRESZCZENIA	66





## P R Z E D M O W A

Rozwój górnictwa w naszym kraju w XXX-leciu powojennym oparty był w głównej mierze na udostępnianiu złóż zalegających w trudnych warunkach hydrogeologicznych. Efektem tego był gwałtowny rozwój w Polsce metody zamrażania górotworu, która do 1960 roku była stosowana zaledwie w około 10 % głębionych szybów, natomiast w roku 1970 już ponad 40 % szybów było głębionych tą metodą.

W ślad za osiągnięciami praktycznymi nastąpił również rozwój badań nad problemami zamrażania skał ze szczególnym uwzględnieniem Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego i Rybnickiego Okręgu Węglowego, gdzie zastosowano zamrażanie górotworu na dużych głębokościach.

Niniejsza praca obejmuje wyniki badań autora wykonane w Zakładzie Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego oraz Głównym Instytucie Górnictwa przy współpracy z Instytutem Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej i Instytutami AGH.

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowanie Wszystkim, którzy udzielił mi cennych rad i pomocy w realizacji tej pracy, a w szczególności Prof.dr hab.inż.M.Chudkowi, Prof.dr hab.inż.Z.Strzeleckiemu, Doc.dr hab.inż.K.Rutce i Doc.dr inż.Z.Śmietańskiemu.

Dziękuję również Kolegom i Współpracownikom z Zakładu Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego oraz Głównego Instytutu Górnictwa.

Autor



## 1. WPROWADZENIE

Konieczność udostępniania złóż kopalin użytecznych zalegających na coraz większych głębokościach stwarza nowe wymagania i problemy dla nauki i techniki górniczej. Jednym z podstawowych problemów jest drażenie szybów w trudnych warunkach hydrogeologicznych na dużych głębokościach, wymagające zastosowania specjalnych metod drażenia a głównie metody zamrażania górotworu.

Metoda zamrażania górotworu stosowana jest w górnictwie od ponad stu lat, lecz przez wiele lat zakres jej stosowania ograniczał się w zasadzie do głębokości ok. 300 m. W tym zakresie głębokości wystarczała praktyka i pobieżna znajomość przebiegu procesów zamrażania w górotworze, gdyż większość problemów była ukryta w szerokim marginesie współczynników pewności przyjmowanych w obliczeniach. W ostatnich kilkunastu latach głębokość zamrażania bardzo szybko wzrasta i przekroczyła już 500 metrów. Należy przypuszczać, że w niedalekiej przyszłości głębokość zamrażania górotworu przekroczy 1000 metrów. Wraz ze wzrostem głębokości zamrażania pojawiło się szereg zjawisk i trudności nie występujących w sposób tak jaskrawy na mniejszych głębokościach.

Do rozwiązania tych problemów nie wystarcza samo doświadczenie praktyczne, lecz konieczne jest prowadzenie odpowiednich prac badawczych.

Proces zamrażania górotworu polega na wytworzeniu odpowiednio ukształtowanej, najczęściej cylindrycznej przegrody z zamrożonych skał, która umożliwi bezpieczne wykonywanie wyrobisk w warstwach zawodnionych względnie luźnych. Przegroda ta czyli t.zw. płaszcz mroźniowy powstaje w wyniku nieustalonego przepływu ciepła z górotworu do odpowiednio rozmieszczonych otworów mroźniowych, w których przepływa medium chłodzące. Proces nieustalonego przepływu ciepła w górotworze przebiega przy zmiennych warunkach granicznych. Zmienność dotyczy czasu i przestrzennego rozkładu temperatur z uwagi na różne wartości parametrów fizyko-temicznych poszczególnych warstw skalnych oraz zróżnicowane warunki wymiany ciepła zarówno w przekroju poziomym jak i pionowym.



## 2. PRZEGLĄD DOTYCHCZASOWYCH WYNIKÓW BADAŃ I OSIĄGNIĘĆ PRAKTYCZNYCH

Badania nad procesami zamrażania górotworu do mniejszych głębokości na bazie metod analitycznych rozwinął N.G. Trupak [62]. W pracach swych założył on ustalony przepływ ciepła w górotworze oraz stałą temperaturę ścianki rury mroźniowej. Rozważania swe oparł on o analizę pracy pojedynczego otworu mroźniowego stąd proponowane wzory dają prawidłowe wyniki jedynie w początkowym okresie zamrażania, przy niewielkiej /1 + 1,5 m/ grubości płaszczu mroźniowego,

Nowsze badania [6, 22, 35, 42, 55] wykazały, że zamrażanie górotworu należy rozpatrywać jako efekt działania zespołu /kręgu/ otworów mroźniowych, co odpowiada warunkom jakie istnieją przy większych grubościach płaszczu mroźniowego i większych głębokościach zamrażania,

Hakimow [19+22], Ständer [52+55] Bachołodin [6, 7, 8] i autor [42, 43] rozpatrują przebieg zamrażania w dwóch etapach :

- do chwili zamknięcia się poszczególnych walców, powstałych wokół pojedynczych otworów mroźniowych obliczają przebieg zamrażania jak dla pojedynczego otworu mroźniowego,
- od chwili zamknięcia się płaszczu mroźniowego obliczają przebieg zamrażania z uwzględnieniem współdziałania wszystkich otworów,

Wraz ze wzrostem głębokości zamrażania zmieniały się poglądy na pracę płaszczu mroźniowego pod obciążeniem oraz sposoby określania niezbędnej grubości tego płaszczu,

Przy mniejszych głębokościach zamrażania /100 + 200 m/ płaszcz mroźniowy rozpatrywano jako cylinder sztywno-sprężysty a jego grubość wyznaczono w oparciu o teorię sprężystości np. metodą Lamé, Walbrekera, Galanki i Sterkowicza [16, 30, 64, 68]

Dla większych głębokości zamrażany górotwór rozpatruje się jako ośrodek plastyczny, lepkoplastyczny lub sprężysto-lepkoplastyczny. Grubość płaszczu mroźniowego można wyznaczyć w oparciu

o te założenia metodą : Sałustowicza, Zareckiego, Wjałowa lub Libermana [2,31,47,48,49].

Na podstawie badań [26, 35, 63, 65] stwierdzono, że przy zamrażaniu górotworu do dużych głębokości /powyżej 300 m/ najbardziej odpowiednia okazała się metoda Libermana i Wjałowa z tym, że wymagana jest znajomość parametrów reologicznych skał.

1. Liberman określa grubość płaszcza mroźniowego metodą stanów granicznych przyjmując, że granicę stateczności ścian płaszcza mroźniowego wyznacza warunek stałych odkształceń przy stałym obciążeniu zewnętrznym niezależnie od możliwości wzrostu naprężeń w poszczególnych elementach aż do granicy płynności. Płaszcz mroźniowy traci stateczność, gdy cały przejdzie w stan plastyczny, tj. gdy strefa plastyczna dosięgnie jego zewnętrznej granicy [31].

W światowej technice górniczej zamrażanie górotworu do dużych głębokości było do niedawna zjawiskiem niezwykle rzadkim a zrealizowane obiekty stanowiły etapy rozwoju techniki zamrażania górotworu.

W ostatnich latach odkrycia i udostępnianie olbrzymich lecz zalegających w trudnych warunkach hydrogeologicznych na dużych głębokościach złóż cennych kopalin, m.in. soli potasowych w Saskatchewan w Kanadzie, żelaza na terenie Kurskiej Anomalii Magnetycznej w ZSRR, rud miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym spowodowało wzrost zainteresowań i badań nad zamrażaniem górotworu do dużych głębokości [1,2,25,28, 29,31,32,35,38,40,41+46,47+49,51, 52+55,58,65,66].

Na szczególną uwagę zasługują badania wykonane w ZSRR przez Instytut Górniczy im. A.A. Skoczyńskiego i WNIOM SzS na obszarze Kurskiej Anomalii Magnetycznej gdzie w warunkach naturalnych przeprowadzono badania na skalę półprzemysłową [32,58].

Badania i obliczenia przeprowadzono w warunkach laminarnego przepływu łągu w przestrzeni międzyrurowej, to jest przy wydatku przepływu łągu z jednego otworu 70 + 100 l/min.

Porównując szybkości zamrażania wokół pojedynczego otworu mroźniowego uzyskane w wyniku badań z szybkościami zamrażania kręgiem otworów w czasie drążenia szybów w Zaporozkim Kombinacie Rud Żelaza stwierdzono, że szybkość zamrażania kręgiem otworów mroźniowych jest wyższa w piaskach 2 krotnie a w glinach 1,5 krotnie w stosunku do szybkości zamrażania pojedynczym otworem. Dane te świadczą o tym, że wyniki badań i obserwacji zamrażania pojedynczym otworem nie mogą być bezpośrednio odnoszone do zamrażania kręgiem otworów.

Podstawowym efektem przeprowadzonych badań było stwierdzenie o konieczności uintensywnienia procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości, gdyż dotychczas stosowane parametry są niewystarczające i nie zapewniają możliwości drążenia szybów metodą zamrażania górotworu poniżej głębokości 600 metrów. Wnioski te znalazły potwierdzenie w praktyce drążenia szybów metodą zamrażania do dużych głębokości zarówno w Kanadzie, jak również w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym.

Rezultaty dotychczasowych badań i doświadczenia praktyczne świadczą o niedostatecznej znajomości zjawisk związanych z procesem zamrażania górotworu do dużych głębokości i w pełni uzasadniają potrzebę podjęcia dalszych badań nad określeniem rzeczywistego przebiegu zamrażania górotworu kręgiem otworów mroźniowych na dużych głębokościach oraz opracowania naukowych kryteriów optymalizacji parametrów tego procesu.



### 3. CEL I ZAKRES PRACY ORAZ ZAŁOŻENIA

Celem niniejszej pracy jest określenie rzeczywistych wartości parametrów przebiegu procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości oraz opracowanie założeń i sposobu optymalizacji parametrów tego procesu na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań.

Badaniami objęto dwa charakterystyczne rejony górnicze, w których stosuje się zamrażanie górotworu do dużych głębokości, a mianowicie Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy oraz Rybnicki Okręg Węglowy. W każdym z tych rejonów wybrano po jednym charakterystycznym obiekcie szybie, na którym przeprowadzono szczegółowe badania.

Ze względu na skomplikowany charakter zachodzących podczas zamrażania procesów termicznych w anizotropowym górotworze, niemożliwe jest dokładne i jednoznaczne określenie ich przebiegu w obecnym stanie wiedzy i techniki.

Dla możliwie dokładnego poznania przebiegu tych procesów posłużono się modelowaniem procesu zamrażania górotworu metodą analogii hydraulicznych oraz uściśleniem wyników tych badań metodą eksperymentu naturalnego za pomocą pomiaru temperatur "in situ" w górotworze. W ten sposób otrzymano bardzo zbliżony do rzeczywistego obraz przebiegu zamrażania górotworu do dużych głębokości. Na podstawie analizy wyników tych badań opracowano założenia do optymalizacji oraz podstawy optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości. Przy rozwiązywaniu postawionych problemów przyjęto dwa zasadnicze założenia :

- w obliczeniach modelowych metodą analogii hydraulicznych przyjęto górotwór wokół rozpatrywanych szybów jako izotropowy w płaszczyźnie poziomej a niejednorodność w płaszczyźnie pionowej uwzględniono jedynie w granicach możliwości i dokładności obliczeniowych,

- zgodnie z wynikami badań Hakimowa [21,22] i Staendera [55] oraz autora [42,43] płaszcz mroźniowy rozpatruje się jako efekt działania zespołu /kręgu/ otworów mroźniowych, jak gdyby cały krąg stanowił jeden otwór mroźniowy o parametrach odpowiadających współpracy wszystkich otworów.

Zgodnie z doświadczeniami praktycznymi i wynikami badań [47+49, 63+65, 28] przyjęto głębokość zamrażania około 300 m jako umowną granicę podziątu :

- do tej głębokości zamrażanie górotworu rozpatruje się jako zwykłe a płaszcz mroźniowy można przyjmować jako ośrodek sztywno-sprężysty lub sprężysto-lepki,
- powyżej tej granicy występuje zamrażanie do dużej głębokości, gdzie zamrożony górotwór rozpatruje się jako ośrodek plastyczny lub lepko-plastyczny. Wówczas też wynika przeważnie konieczność zamrażania dwustopniowego.



#### 4. BADANIA NAD PRZEBIEGIEM ZAMRAŻANIA GÓROTWORU DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI

##### 4.1. Zamrażanie górotworu jako proces nieustalonego przepływu ciepła połączony ze zmianą stanu skupienia

Proces zamrażania górotworu jest szczególnym przypadkiem wymiany ciepła połączonej ze zmianą fazy /stanu skupienia/. Szczególność tego przypadku wynika z właściwości górotworu, który stanowi skomplikowane, wielofazowe środowisko złożone z części stałych, roztworów wodnych oraz gazów. Procesy wymiany ciepła w takim środowisku są bardzo złożone i niedostatecznie zbadane; nie opracowano także dokładnych metod ich obliczania.

W tych warunkach przyjmuje się równanie nieustalonego przewodnictwa cieplnego dla izotropowego ciała stałego za podstawę do określania rozkładu temperatur w górotworze i położenia granicy zamrożenia, przy uwzględnieniu ukrytego ciepła zamrażania wody zawartej w skałach.

Efektywne i dokładne rozwiązanie tego problemu jest bardzo złożone i możliwe jest jedynie rozwiązanie przybliżone po przyjęciu szeregu założeń upraszczających.

Spośród metod przybliżonych można wyróżnić metody graficzne, analogowe i numeryczne.

W niniejszej pracy posłużono się metodą analogii hydraulicznych dla określenia rzeczywistych parametrów i optymalizacji procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości oraz metodami numerycznymi z wykorzystaniem elektronicznej techniki obliczeniowej przy optymalizacji parametrów.

#### 4.2. Badania w warunkach Rybnickiego Okręgu Węglowego na przykładzie szybu Z-VII

Szyb Z-VII /rys.1/ posiada średnicę 6,0 m w świetle obudowy i był głębiniony metodą zamrażania górotworu do głębokości 400 m ze względu na trudne warunki hydrogeologiczne. Zamrażaniem objęto całą serię utworów czwartorzędnych i trzeciorzędnych oraz warstwę piaskowca w stropie karbonu. Zamrażania górotworu dokonano za pomocą jednostopniowych agregatów mroźniowych o łącznej nominalnej wydajności 1.000.000 kcal/godz. = 4186870 kJ/h, rur mroźniowych  $\phi$  141/123 mm i stalowych rurek ługowych  $\phi$  44,5/36mm. Wydatek przepływu ługu wynosił ok. 100 l/min, dla każdego otworu mroźniowego.

##### 4.2.1. Program obliczeń na integratorze hydraulicznym

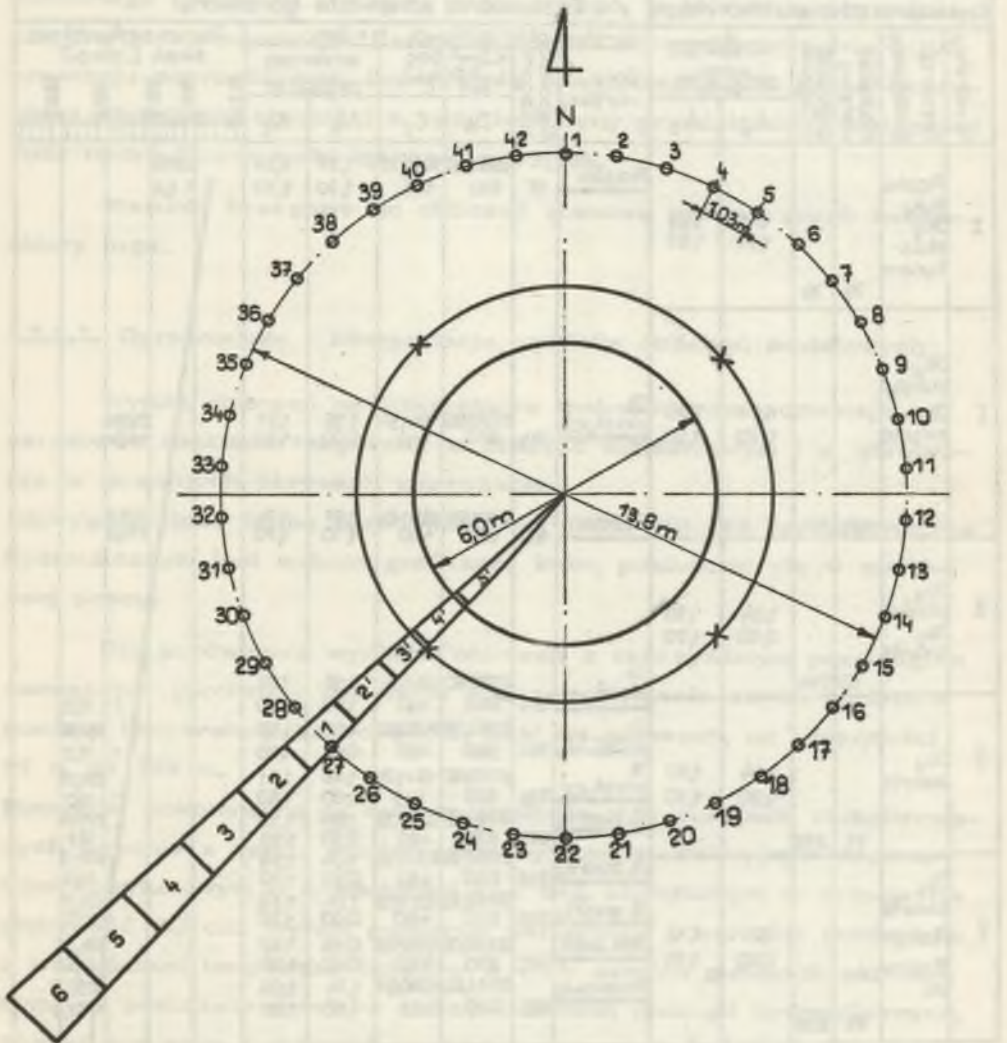
Obszar górotworu podlegający badaniom ograniczono dwiema pionowymi płaszczyznami przecinającymi się w osi szybu i przechodzącymi odpowiednio przez oś otworu mroźniowego oraz przez połowę odległości między sąsiednim otworem. W rzucie poziomym obszar badań przedstawia sektor.

Podziału sektora na bloki dokonano płaszczyznami cylindrycznymi o środkach znajdujących się w osi szybu oraz płaszczyznami poziomymi /rys.1/.

W sektorze badawczym wyodrębniono 10 bloków. W przekroju pionowym górotwór strefy zamrożonej podzielono na pięć serii skał, z których wydzielono charakterystyczne warstwy o grubości 1 m, przyjmując własności fizyko-temiczne danej warstwy do obliczeń. W pięciu seriach skał łącznie wydzielono jedenaście warstw /rys.2/.

Dla każdej serii skał ustalono średnio-ważony współczynnik przewodności i pojemności cieplnej.

Przyjęte do obliczeń wartości współczynnika przewodności i pojemności cieplnej dla każdego z odcinków szybu, określono jako średnie ważone z wartości dla poszczególnych warstw skał wchodzących w skład danego odcinka.



Rys.1. Szyb Z-VII. Krąg otworów mroźniowych i sektor obliczeniowy

x - miejsca pomiaru temperatur ociosu



Zestawienie schematu otw. mrożeń					Zestawienie schematu górotworu													
Nr warstwy	Przekrój geologiczny	Miaższość warstwy	Głębokość zalegania	$\frac{m \cdot sek \cdot deg}{m \cdot godz. \cdot ^\circ C}$		Opis warstwy	Głębokość zalegania	Warstwa obliczeniowa h = 1m				Temp. naturalna skat [deg]						
				$\lambda_N$	$\lambda_Z$			$\frac{KJ/m^2 \cdot deg}{m^2 \cdot ^\circ C}$		$\frac{m \cdot sek \cdot deg}{m \cdot godz. \cdot ^\circ C}$		10	15	20	25			
								$C_N$	$C_Z$	$\lambda_N$	$\lambda_Z$							
I	Piaski Pyły Jły plastyczne	73	73	1,45	1,89	Piaszek	15	2637,18	1695,33	1,97	3,36							
				1,25	1,80			630	405	1,70	2,90							2816 + 8,5
II	Jły, plastycz. Jły zwarte	101	174	1,04	1,39	Jły plastycz.	124	2720,90	1841,84	1,16	1,51							
				0,90	1,20			650	440	1,00	1,30							2655 + 12,4
III	Jły, plastycz. Jły zwarte	70	244	1,04	1,39	Mutek	168	2511,60	1841,84	1,27	1,74							
				0,90	1,20			600	440	1,10	1,50							287,5 + 14,0
IV	Jły zwarte	71	315	1,04	1,39	Jły plastycz.	254	2720,90	1841,84	1,16	1,51							
						Jły zwarte	261	2762,76	2009,28	1,04	1,39							+ 17,0
						Jły plastycz.	283	2720,90	1841,84	1,16	1,51							291,5
						Jły zwarte	293	2762,76	2009,28	1,04	1,39							+ 18,0
V	Jły zwarte Dłutypek Piaszczyste	83	398	1,04	1,45	Jły zwarte	338	2762,76	2009,28	1,04	1,39							
						Jły zwarte	366	2762,76	2009,28	1,04	1,39							+ 17,2
						Dłutypek	382	2386,02	1799,98	0,93	1,39							294,5
						Piaszczyste	393	2511,60	1820,91	1,74	2,09							+ 18,3
								600	435	1,50	1,80							20,0

Rys.2. Szyb Z-VII. Zestawienie schematu otworu mroźeniowego i górotworu

Na podstawie tak zestawionego schematu otworu mroźeniowego i górotworu /rys.2./ oraz analogii pomiędzy elementami schematów cieplnych i hydraulicznych wykonano roboczy schemat hydrauliczny zamrażanego górotworu i otworu mroźeniowego, w których pojemności cieplnej bloku odpowiada naczynie modelu o określonej powierzchni przekroju poprzecznego, ilość ciepła odwzorowana jest przez naczynie o określonej objętości a opór termiczny przedstawiony jest przez opór hydrauliczny rurki łączącej naczynia.

Warunki brzegowe do obliczeń stanowił wykres zmian temperatury ługu.

#### 4.2.1.1. Opracowanie i interpretacja wyników obliczeń modelowych

Wyniki obliczeń na integratorze hydraulicznym pozwalają na określenie rozkładu temperatur w otworze mroźeniowym i w górotworze w dowolnych okresach zamrażania.

Najwygodniejszą formą opracowania wyników obliczeń na integratorze hydraulicznym jest metoda graficzna, którą posłużono się w niniejszej pracy.

Dla porównania wyników obliczeń z rzeczywistym przebiegiem zamrażania górotworu wykonano podczas głąbienia szybu kontrolne pomiary temperatury zamrożonych skał na ociosach, od głąbokości 91 m do 392 m.

Pomiarów dokonywano na każdym poziomie w 4 punktach zlokalizowanych zgodnie z rys.1. Pomiary wykonywano laboratoryjnym termometrem spirytusowym o dokładności 0,1 deg zagłąbionym w ociosie na głąbokość 20 cm. Wyniki pomiarów uśredniono i wartości porównano z wartościami temperatur ociosów w tych samych punktach określonymi na podstawie wyników obliczeń metodą analogii hydraulicznych. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawiono w pracy [45] i na rysunku 3.

Z warunków analogii oraz rezultatów prac [13+15] wynika, że skorygowania wyników obliczeń metodą analogii hydraulicznych można dokonać przez zmianę skali czasu w modelu.

Na podstawie analizy porównawczej metodą relaksacji określono wartość współczynnika zmiany skali czasu w modelu. Zmiana



skali czasu w wynikach obliczeń pozwoliła sprowadzić je do wartości bardzo zbliżonych do rzeczywistych co obrazuje rys.3.

#### 4.2.1.2. Określenie parametrów zamrażania górotworu w warunkach szybu Z-VII

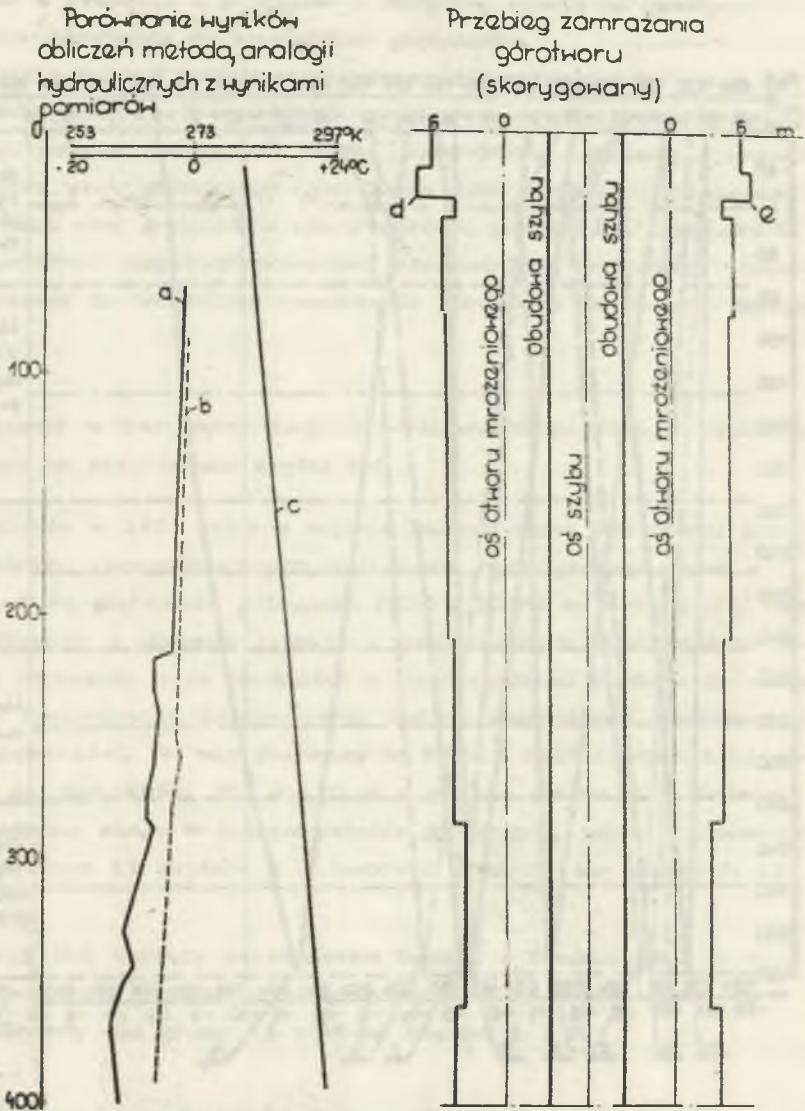
Na podstawie skorygowanych wyników obliczeń opracowano rozkład temperatur w otworze mroźniowym z głębokością /rys.4/ oraz przemieszczanie się w górotworze granicy zamrażania /płaszcza mroźniowego/ przedstawionego w postaci dwóch izoterm  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $-2^{\circ}\text{C}$ , które obrazują minimalny i maksymalny zasięg zamrażania, gdyż dla większości skał w rejonie ROW temperatura zamrażania waha się w tych granicach, zgodnie z wynikami badań Z.Strzeleckiego i Drzewieckiego wykonanymi w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [61].

Rozszerzając interpretację wyników poprzez interpolację i ekstrapolację na całą strefę zamrażania w szybie Z-VII opracowano orientacyjny profil płaszcza mroźniowego w różnych okresach zamrażania /rys.3/

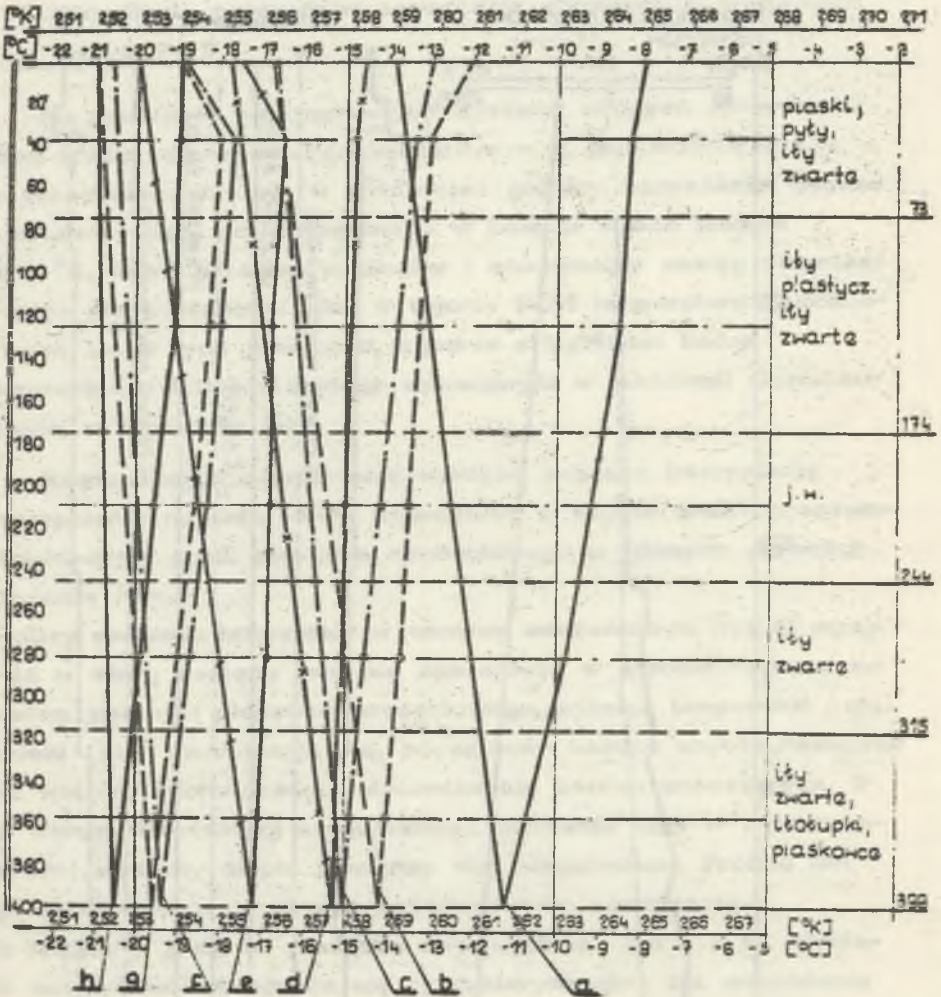
Z analizy rozkładu temperatur w otworze mroźniowym /rys.4/ wynika, że w miarę postępu procesu zamrażania w górotworze, wraz ze wzrostem grubości płaszcza mroźniowego, różnice temperatur, obu strumieni ługu zmniejszają się, początkowo bardzo szybko, następnie coraz wolniej. Równocześnie stwierdza się bardzo znaczny /ok. 3 deg./ wzrost temperatury wewnętrznego strumienia ługu w wyniku intensywnej wymiany ciepła pomiędzy obu strumieniami. Proces ten ulega zahamowaniu dopiero w końcowej fazie zamrażania.

Przy większej grubości płaszcza mroźniowego /po 4 ÷ 12 miesiącach zamrażania/ obserwuje się charakterystyczne dla zamrażania do dużych głębokości zjawisko obniżania się /1 ÷ 2 deg./ temperatury ługu w przestrzeni międzyrurowej w górnym odcinku otworu mroźniowego. Zjawisko to powoduje sztuczne zmniejszanie różnic temperatur obu strumieni ługu przy pomiarach na powierzchni i może być przyczyną błędnej oceny przebiegu zamrażania jedynie na podstawie wyników tych pomiarów, co dotychczas jest powszechnie

## Szyb Z VII



- a - wyniki pomiarów temperatur ośsiów szybu
  - b - wyniki obliczeń temperatury ośsiów szybu metodą analogii hydraulicznych
  - c - naturalna temperatura skał
- dę-grubość płaszcza mroźniowego po 14 miesiącach



Rys 4, Szyb Z-VII. Zmiany temperatur łągu w otworze mroźniowym

- a - temperatura łągu po 12 dniach zamrażania
- b - temperatura łągu po 24 dniach zamrażania
- c - temperatura łągu po 36 dniach zamrażania
- d - temperatura łągu po 72 dniach zamrażania
- e - temperatura łągu po 110 dniach zamrażania
- f - temperatura łągu po 5 + 7 miesiącach zamrażania
- g - temperatura łągu po 10 + 12 miesiącach zamrażania
- h - temperatura łągu po 14 miesiącach zamrażania



stosowane w praktyce i związane z tradycją, opartą na praktyce zamrażania górotworu do niewielkich głębokości.

Rozpatrując przebieg powstawania płaszcz mroźniowego rys. 3, można stwierdzić, że w warunkach monotonnego wykształcenia litologicznego warstw budujących strefę zamrożoną złożoną z utworów ilastych, przy głębokości zamrażania 400 m płaszcz mroźniowy zmniejsza swą grubość w miarę wzrostu głębokości. Zjawisko to można tłumaczyć nieprzystosowaniem parametrów i technologii procesu zamrażania do warunków zamrażania górotworu do dużych głębokości.

#### 4.2.2. Badania w warunkach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego na przykładzie szybu P-I

Odkryte w 1957 roku w rejonie Lubina złoża rud miedzi zalegają w bardzo skomplikowanych warunkach hydrogeologicznych z uwagi na dużą głębokość zalegania /600 + 1000 m/ oraz gruby nadkład zbudowany z utworów luźnych i zawodnionych. Rozpoznanie geologiczne wykazało duże trudności w udostępnieniu złoża w tych warunkach i konieczność zastosowania metody zamrażania górotworu do dużych głębokości. Po raz pierwszy w Polsce zastosowano tutaj zamrażanie do głębokości 365 ± 470 m a po raz pierwszy w świecie na tak szeroką skalę w jednym rejonie górniczym, gdyż w pierwszym etapie zgłębiono 11 szybów a w budowie znajduje się dalszych 12 szybów.

Szyb P-I, będący przedmiotem badań, o średnicy 6,0 m w świetle obudowy i głębokości zamrażania 430 m można uznać za reprezentatywny dla grupy 11 szybów kopalni L i P.

##### 4.2.2.1. Badania modelowe metodą analogii hydraulicznych w szybie P-I

W szybie P-I strefa zamrażana obejmowała utwory czwartorzędowe, trzeciorzędowe i triasowe /pstry piaskowiec/. Otwory mroźniowe w ilości 37 zlokalizowano na pojedynczym kręgu o średnicy 13 m, odległość pomiędzy otworami mroźniowymi wynosiła 1,1 m.

Układ otworów wokół szybu P-I przedstawiono na rys.5. Otwory uzbrojono rurami mrozeniowymi o średnicy zewnętrznej 141 mm oraz stalowymi rurami wlotowymi /ługowymi/ o średnicy zewnętrznej 48,25 mm i grubości ścianki 4,25 mm. Współczynnik przewodności cieplnej mrozeniowych rur wynosi 50 kcal/m godz. °C to jest 58 W/m deg. Czynnikiem chłodzącym był roztwór chlorku wapnia /CaCl<sub>2</sub>/ tak zwany ług o gęstości 1260 kg/m<sup>3</sup> i właściwej pojemności cieplnej wynoszącej 0,657 kcal/kg °C to jest 2,746 kJ/kg deg. Wydatek przepływu ługu w instalacji mrozeniowej wynosił 100 l/min. w każdym otworze.

Podziału obszaru badań w przekroju pionowym dokonano na podstawie profilu geologicznego szybu. W oparciu o powyższy profil, górotwór w partii mrożonej podzielono na pięć stref.

W schemacie obliczeniowym górotworu dla poszczególnych stref ustalono po jednej reprezentatywnej warstwie o grubości 1 m. Wyodrębniono następujące warstwy skał :

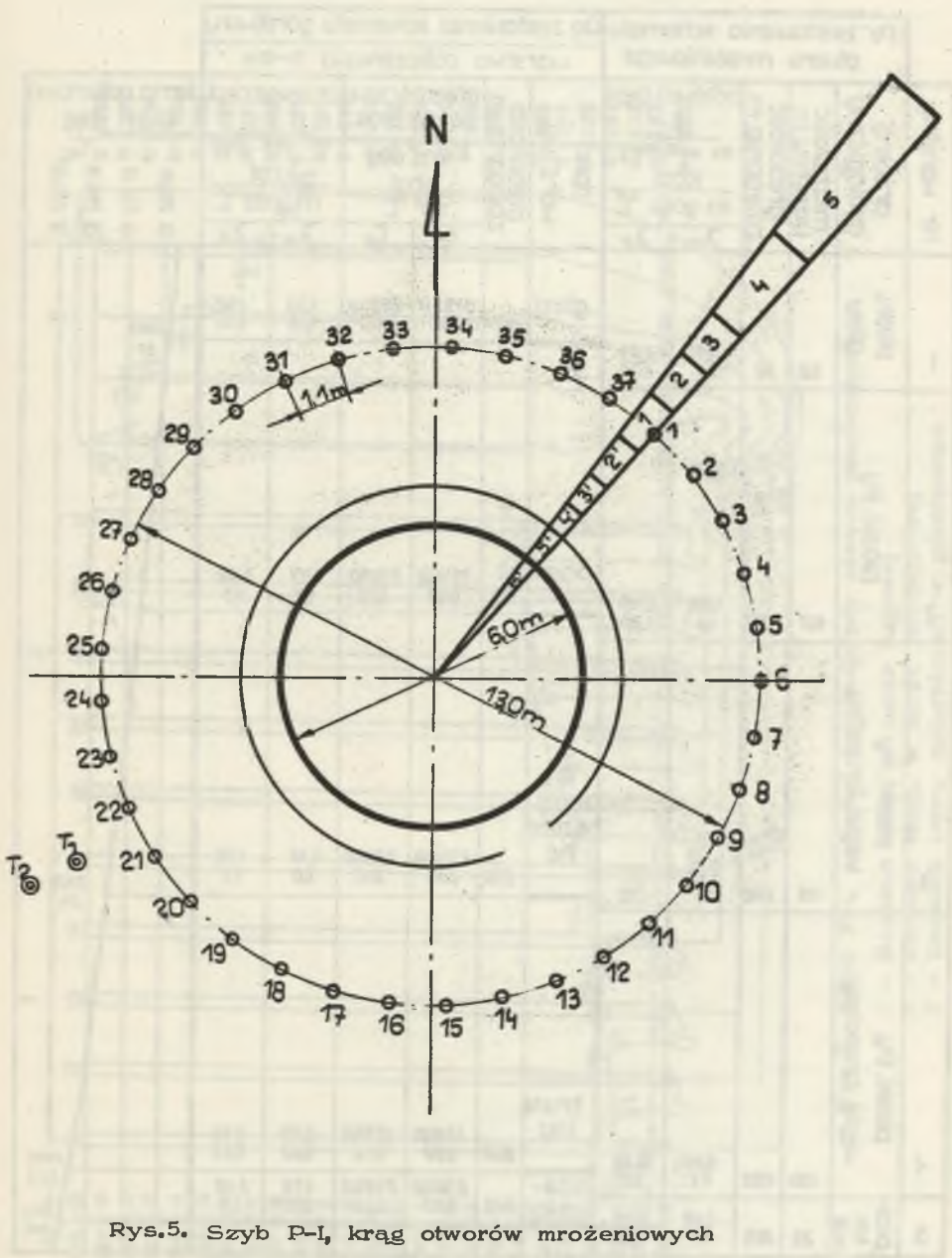
- glina na głębokości 40 m,
- piasek na głębokości 155 m,
- il zapiaszczony na głębokości 273 m,
- węgiel brunatny na głębokości 388 m,
- piaskowiec na głębokości 410 m.

Parametry termiczne i temperaturę naturalną wyodrębnionych warstw oraz średnie ważone parametry poszczególnych stref podano w schemacie obliczeniowym otworu mrozeniowego i górotworu /rys.6/, a następnie sporządzono robocze schematy hydrauliczne otworu /rys.7/.

#### 4.2.2.2. Opracowanie wyników badań modelowych

Wyniki badań modelowych przed szczegółowym opracowaniem porównano z pomiarami temperatur zamrażanych skał na ociosach głębionego szybu, wykonanymi podobnie jak w szybie Z-VII. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie /rys.8/, gdzie podano minimalne i maksymalne temperatury ociosów na każdym poziomie pomiarowym. Ponadto wykonano pomiary temperatur termometrem elektrooporowym w otworze kontrolnym zlokalizowanym na zewnątrz

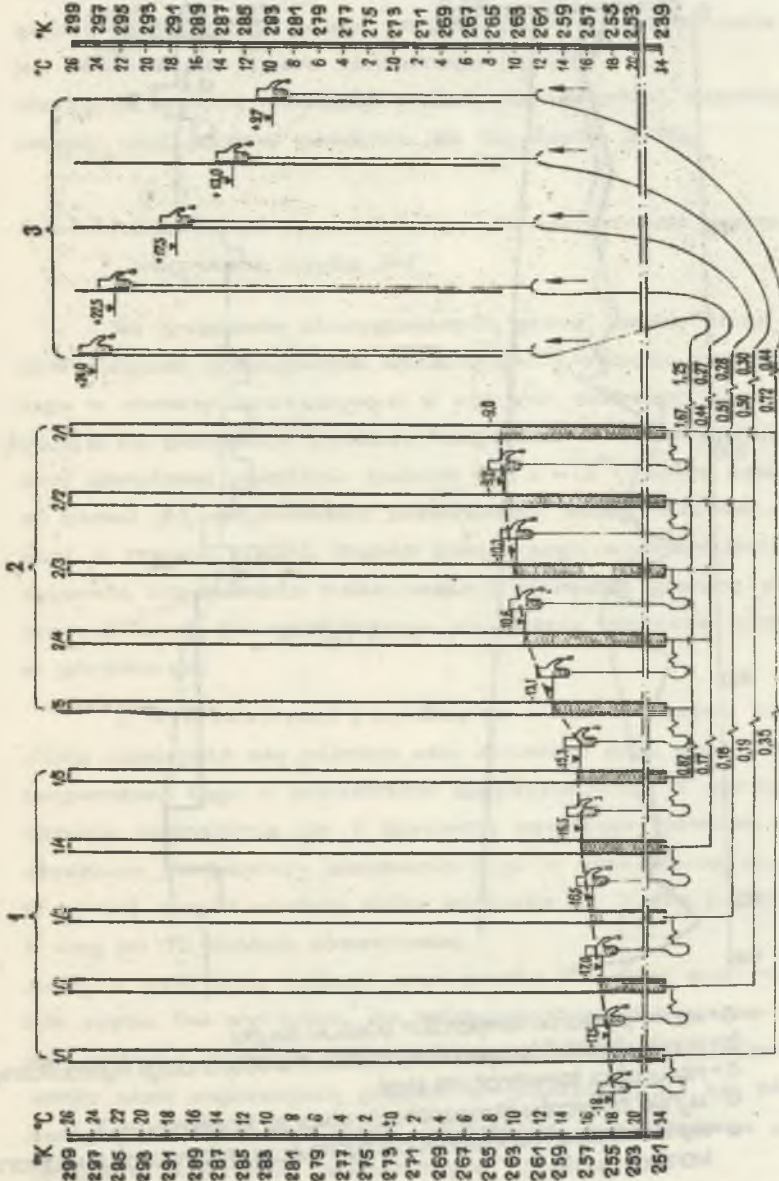




Rys.5. Szyb P-I, krąg otworów mroźniowych

Nr warstwy	Do zestawienia schematu otworu mroźniowego				Do zestawienia schematu górotworu				temp. naturalna skał, deg °C							
	przekrój geologiczny	mierzszość warstwy, m	głębokość zalegania, m	przewod. ciepł.		opis warstwy	głębokość zalegania, m	objętościowa poj. cieplna					przewod. ciepł.			
				$\frac{J}{m \cdot sek \cdot deg}$	$\frac{kcal}{m \cdot godz \cdot ^\circ C}$			$\frac{kJ}{m^3 \cdot deg}$	$\frac{kcal}{m^3 \cdot ^\circ C}$	$\frac{J}{m \cdot sek \cdot deg}$	$\frac{kcal}{m \cdot godz \cdot ^\circ C}$					
	$\lambda_N$	$\lambda_C$	$C_N$	$C_Z$	$\lambda_N$	$\lambda_Z$	10	15	20	25						
1	piaski, gliny	58	58	1,62 1,4	2,66 2,30	glina	40	3135,0 750	29200 700	1,33 1,15	1,62 1,40	2829 9,7				
2	piaski, iły	107	165	1,28 1,1	2,40 1,80	piasek	155	26400 630	21800 520	1,97 1,7	3,48 3,0		2862 13			
3	piaski, iły węgiel brunatny	115	280	1,16 1,0	1,97 1,70	ił zapia- szczo- ny	273	27600 660	23000 550	1,16 1,0	1,85 1,6			2907 17,5		
4	piaski, iły, węgiel brunatny	120	400	1,28 1,1	2,40 1,8	węgiel brunat- ny	388	13400 320	12550 300	0,25 0,22	0,29 0,25					2957 22,5
							410	23000 550	22200 530	1,74 1,50	2,10 1,8			2972 24,0		
5	pias- kowce	25	425	1,62 1,4	2,20 1,9	pias- kowce	410	23000 550	22200 530	1,74 1,50	2,10 1,8					

Rys.6. Szyb P-1, zestawienie schematu otworu mroźniowego górotworu



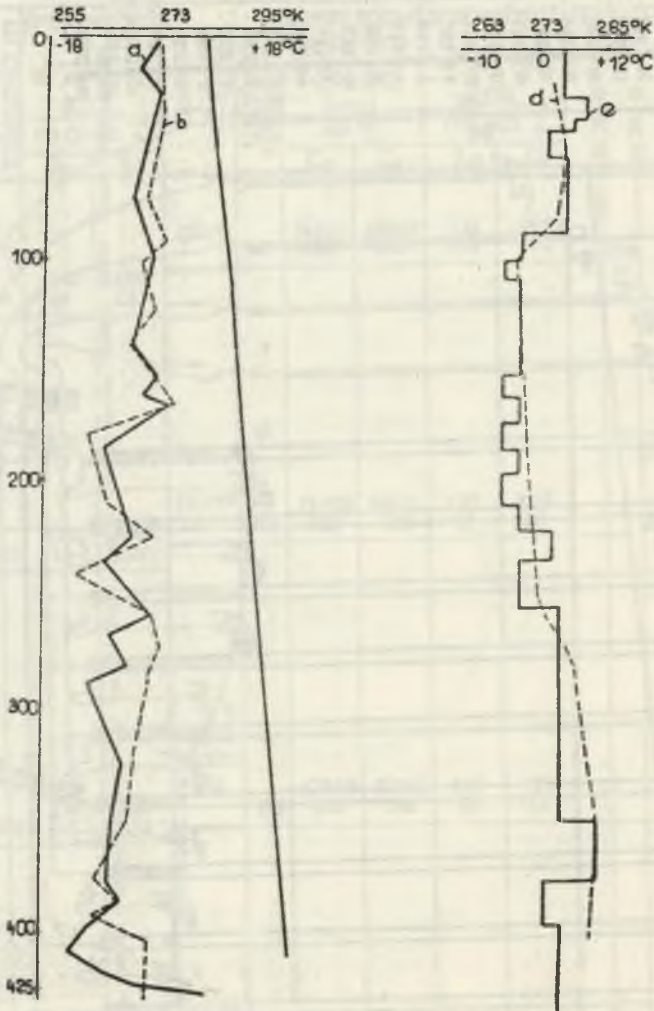
Rys.7. Szyb P-I, schemat hydrauliczny otworu mroźeniowego

- 1 - Rozkład temp. w rurze łęgowej
- 2 - Rozkład temp. w rurze mroźeniowej
- 3 - Rozkład temp. naturalnych w górotworze



## Szyb P-1

Porównanie wyników pomiarów temperatur z wynikami obliczeń analogicznych



- a - wyniki pomiarów temperatur otworze szybu
- b - wyniki obliczeń temperatury otworze metodą analogii hydraulicznych
- c - naturalna temperatura skał
- d - wyniki pomiarów temperatur w otworze kontrolnym  $T_2$
- e - wyniki obliczeń na integratorze hydraulicznym temperatur w otworze kontrolnym  $T_2$

kręgu otworów mroźniowych w odległości ok. 2,5 m, pomiary te wykonano w interwale co 50 m do głębokości 400 m.

Na podstawie wyników obliczeń modelowych określono temperatury skał w miejscu i w czasie pomiaru zarówno dla ociosów szybu jak również dla otworu kontrolnego /rys.8/.

Następnie metodą rekalkulacji wyznaczono wartość współczynnika zmiany skały czasu, podobnie jak dla szybu Z-VII.

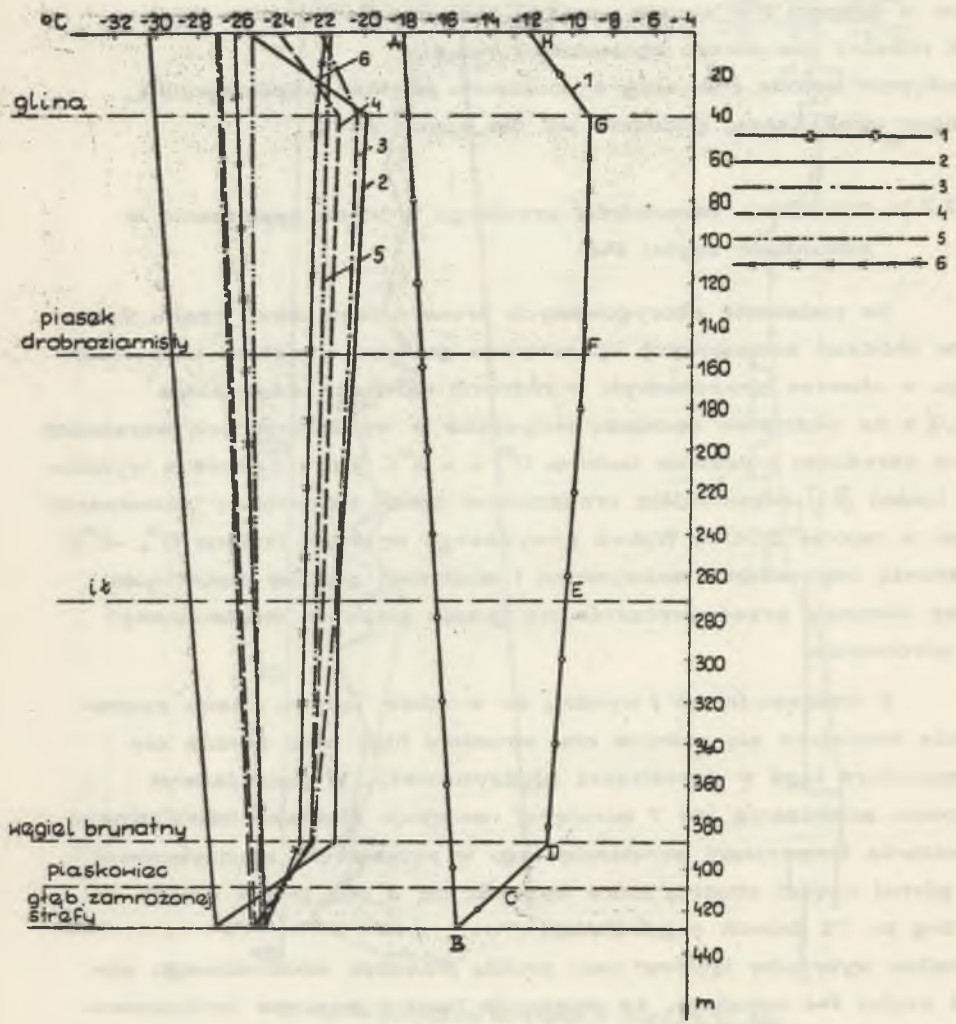
#### 4.2.2.3. Określenie parametrów przebiegu procesu zamrażania w warunkach szybu P-I

Na podstawie skorygowanych przez zmianę skały czasu wyników obliczeń analogowych opracowano graficznie rozkład temperatur ługu w otworze mroźniowym w różnych okresach zamrażania /rys.9/, a na podstawie rozkładu temperatur w wyodrębnionych warstwach skał określono położenie izoterm  $0^{\circ}$  i  $-2^{\circ}\text{C}$  które zgodnie z wynikami badań [61] odpowiadają przedziałowi zmian temperatury zamrażania skał w rejonie LGOM. Wobec powyższego wykresy izoterm  $0^{\circ}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}$  stanowią odpowiednio maksymalną i minimalną granicę zamrażania oraz obrazują przemieszczanie się granic płaszcza mroźniowego w górotworze.

Z wykresu /rys.9 / wynika, że w miarę upływu czasu zamrażania zmniejsza się różnica obu strumieni ługu oraz obniża się temperatura ługu w przestrzeni międzyrurowej. W początkowym okresie zamrażania /do 7 miesięcy/ następuje zjawisko intensywne obniżania temperatury strumienia ługu w przestrzeni międzyrurowej w górnej części otworu, które wynosiło od 3 deg po 24 dniach do 6 deg po 72 dniach zamrażania.

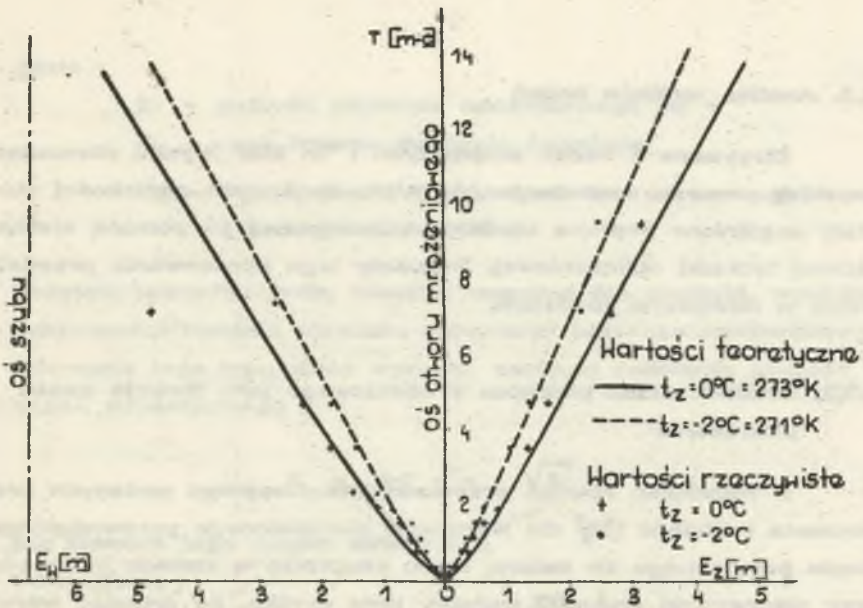
Analiza wykresów izoterm oraz profilu płaszcza mroźniowego wokół szybu P-I wykazuje, że występuje bardzo znaczne zróżnicowanie grubości ścianek płaszcza mroźniowego w zależności od rodzaju skał; najmniejszą grubością charakteryzuje się płaszczyz mroźniowy w warstwach węgla brunatnego, a największa grubość osiąga w warstwach zawodnionych piasków.



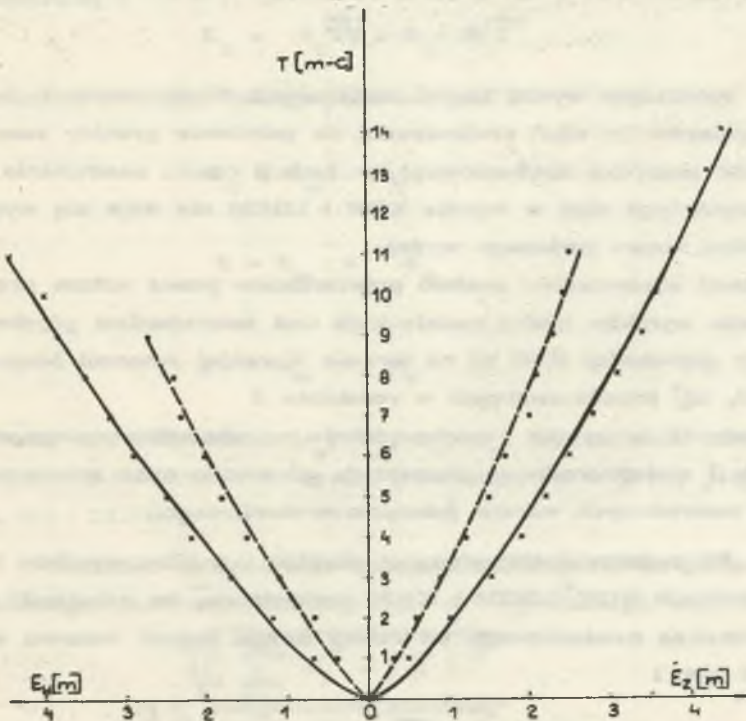


Rys.9 Rozkład temperatur ługu w otworze mroźniowym w szybie P-1

- 1 - temperatura ługu po 24 dniach zamrażania
- 2 - temperatura ługu po 2,5 miesiąca zamrażania
- 3 - temperatura ługu po 4,8 miesiąca zamrażania
- 4 - temperatura ługu po 7,2 miesiąca zamrażania
- 5 - temperatura ługu po 9,6 miesiąca zamrażania
- 6 - temperatura ługu po 14,4 miesiąca zamrażania



Rys.10. Szyb Z-VII, Grubość płaszcza mroźniowego jako funkcja czasu w piaskowcu na głębokości 393 m



Rys.11. Szyb P-I, Grubość płaszcza mroźniowego jako funkcja czasu zamrażania w warstwie węgla brunatnego na głębokości 388 m

#### 4.3. Analiza wyników badań

Otrzymane z badań modelowych i "in situ" wyniki obrazujące przebieg procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości zostały uogólnione poprzez obróbkę matematyczną za pomocą elektronicznej techniki obliczeniowej. Rezultaty tego opracowania przedstawiono w niniejszym rozdziale.

##### 4.3.1. Grubość ścian płaszczka mroźniowego jako funkcja czasu zamrażania

Z rozwiązań równań przewodnictwa cieplnego podanych przez Neumana i Stefana [56] dla warunków nieustalonego przewodnictwa ciepła połączonego ze zmianą stanu skupienia w ciałach jednorodnych przy nieznacznej grubości warstwy lodu wynika, że grubość warstwy lodu jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z czasu zamrażania :

$$E = b \cdot \sqrt{T}$$

Analizując wyniki badań modelowych skorygowanych na podstawie pomiarów "in situ" stwierdzono, że położenie granicy zamrożenia /grubość płaszczka mroźniowego/ w funkcji czasu zamrażania dla rozpatrywanych skał w rejonie ROW i LGOM nie daje się wyrazić w postaci wzoru podanego wyżej.

Powyższe stwierdzenie zostało potwierdzone przez autora przy analizowaniu wyników badań radzieckich nad zamrażaniem górotworu do dużych głębokości /650 m/ na terenie Kurskiej Anomali Magnetycznej [58, 32] przedstawionych w rozdziale 2

Niezgodność ta wynika prawdopodobnie ze skomplikowanego, wielofazowego i niejednorodnego charakteru górotworu oraz znacznych grubości zamrożonych warstw /płaszczka mroźniowego/.

Na podstawie statystycznej obróbki i analizy wyników badań, w warunkach ROW, LGOM i KAM stwierdzono, że zależność grubości płaszczka mroźniowego od czasu można opisać wzorem empirycznym typu :

$$E = b T + c \cdot \sqrt{T}$$



gdzie :

E - grubość płaszczka mroźeniowego /m/

T - czas trwania mrożenia /miesiące/

b, c - współczynniki liczbowe, zależne od parametrów skały i procesu zamrażania.

Przyjęte jednostki /metr, miesiąc/ dogodnie dla praktyki, wynikają z dokładności badania zjawiska narastania płaszczka mroźeniowego, Równanie tego typu może wyrażać zarówno całkowitą grubość płaszczka mroźeniowego :

$$E_c = bT + c \cdot \sqrt{T} \quad / 2 /$$

jak również jego części składowe :

wewnętrzną :

$$E_w = b_w T + c_w \cdot \sqrt{T} \quad / 3 /$$

zewnątrzną :

$$E_z = b_z T + c_z \cdot \sqrt{T} \quad / 4 /$$

Zachodzą wówczas następujące związki :

$$E_c = E_w + E_z$$

$$b = b_w + b_z$$

$$c = c_w + c_z$$

wartość współczynników  $b_w$ ,  $b_z$ ,  $c_w$ ,  $c_z$  wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów a wyniki przedstawiono w pracy [45] oraz na rys. 10 i 11.

Ścisłość otrzymanego związku sprawdzono za pomocą parabolicznego współczynnika regresji " $\eta$ " wyrażonego wzorem :

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 - |\bar{y}|^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - |\bar{y}|^2}}$$



gdzie :

$Y_i$  - wartość obliczona z wzorów

$y_i$  - wartości doświadczalne

$\bar{y}$  - średnie wartości wyników doświadczalnych

$n$  - ilość wyników

Dokonano także oceny współzależności zmiennych  $T$  i  $E$ . Miarą współzależności tych zmiennych jest współczynnik korelacji "r" wyrażony wzorem :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n /E_i - \bar{E} / /T_i - \bar{T}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n /E_i - \bar{E}/^2 \cdot \sum_{i=1}^n /T_i - \bar{T}/^2}}$$

gdzie :

$E_i$  - poszczególne grubości płaszczka mroźniowego

$\bar{E}$  - wartość średnia grubości

$T_i$  - wartości czasu odpowiadające poszczególnym grubościom płaszczka mroźniowego

$\bar{T}$  - wartość średnia czasu

Obliczenia wykonano za pomocą elektronicznych maszyn cyfrowych EMC Odra 1204.

Współczynnik korelacji wyników badań modelowych z równaniami analitycznymi był bardzo wysoki i wynosił 0,98 ÷ 0,99; [45].

Z porównania grubości płaszczka mroźniowego /odległości izoterm / przy temperaturze zamrażania 0°C i -2°C wynika, że grubość płaszczka przy temperaturze zamrażania skał -2°C wynosi dla szybu Z-VII około 0,8 oraz dla szybu P-I 0,7 grubości płaszczka przy temperaturze zamrażania skał 0°C [45] a stosunek ten nie ulega zmianie w czasie trwania procesu zamrażania.

#### 4.3.2. Prędkość narastania płaszczka mroźeniowego jako funkcja czasu zamrażania

Znając równanie określające grubość płaszczka mroźeniowego można wyznaczyć prędkość zamrażania, która może być wyrażona jako prędkość chwilowa -  $V_T$  w danym momencie zamrażania, względnie prędkość średnia -  $V_S$  - liczona od początku zamrażania.

Prędkość chwilową ze względu na możliwą i wymaganą dokładność można wyznaczyć metodą różnic skończonych przy założeniu minimalnego przedziału czasu  $\Delta T = 1$  miesiąc, wówczas :

$$V_T = \lim_{\Delta T \rightarrow 1} \frac{\Delta E}{\Delta T} \approx \frac{dE}{dT}$$

Różniczkując równanie 1 otrzymano :

$$V_T = b + \frac{c}{2\sqrt{T}} \quad \text{/m/mies./} \quad | 5 |$$

Wzór ten podaje prędkość chwilową /w danym miesiącu/ zamrażania i w zależności od wartości parametrów b i c może wyrażać prędkość chwilową narastania całego płaszczka mroźeniowego lub :

- prędkość chwilową narastania wewnętrznej części płaszczka mroźeniowego :

$$V_{T_w} = b_w + \frac{c_w}{2\sqrt{T}} \quad | 6 |$$

względnie :

- prędkość chwilową narastania zewnętrznej części płaszczka mroźeniowego :

$$V_{T_z} = b_z + \frac{c_z}{2\sqrt{T}} \quad | 7 |$$

Wartość parametrów b i c dla szybów Z-VII i P-I i poszczególnych warstw skalnych oraz temperaturę zamrożenia 0 i  $-2^\circ\text{C}$  przedstawiono w pracy [45] a zmianę wartości  $V_T$  = w czasie na rysunku 12.

Zachodzą tutaj związki :

$$V_T = V_{T_w} + V_{T_z} = b_w + b_z + \frac{c_w + c_z}{2\sqrt{T}}$$

$$b = b_w + b_z$$

$$c = c_w + c_z$$

Dla skał występujących kilkakrotnie na różnych głębokościach w schemacie obliczeniowym szybu Z-VII, to jest dla iłów plastycznych i iłów zwartych określono zależność szybkości zamrażania od głębokości zalegania danej warstwy. Zagadnienie to przedstawiono w rozdziale 4.3.3.

Średnią prędkość zamrażania, rozumianą jako iloraz sumarycznej grubości ścianki płaszczka mroźniowego przez sumaryczny czas zamrażania, możemy wyrazić wzorem :

$$V_S = \frac{E/T}{T}$$

Podstawiając wartość  $E$  ze wzoru 1 otrzymuje się :

$$V_S = b + \frac{c}{\sqrt{T}} \quad \text{/m/mies./} \quad \text{/8/}$$

Wzór ten wyraża średnią prędkość /od początku zamrażania/ narastania całego płaszczka mroźniowego; lub jego części wewnętrznej:

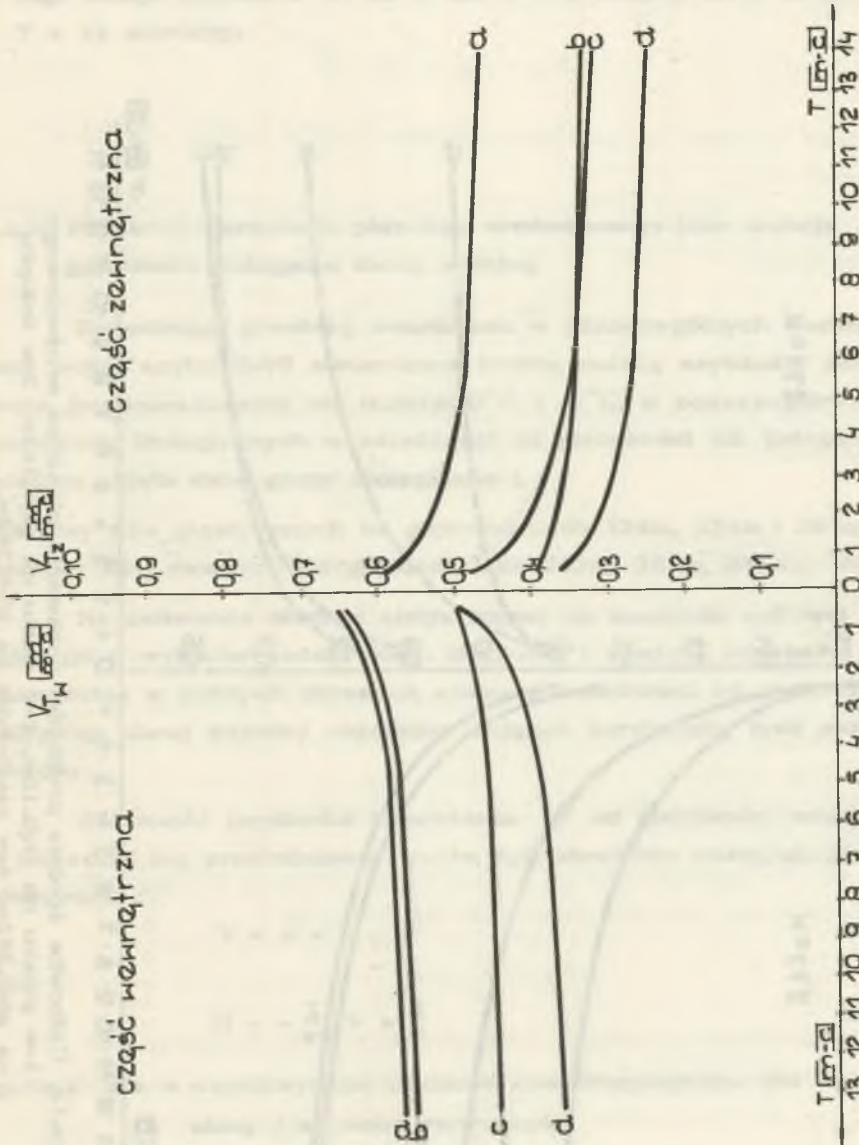
$$V_{S_w} = b_w + \frac{c_w}{\sqrt{T}} \quad \text{/9/}$$

względnie części zewnętrznej :

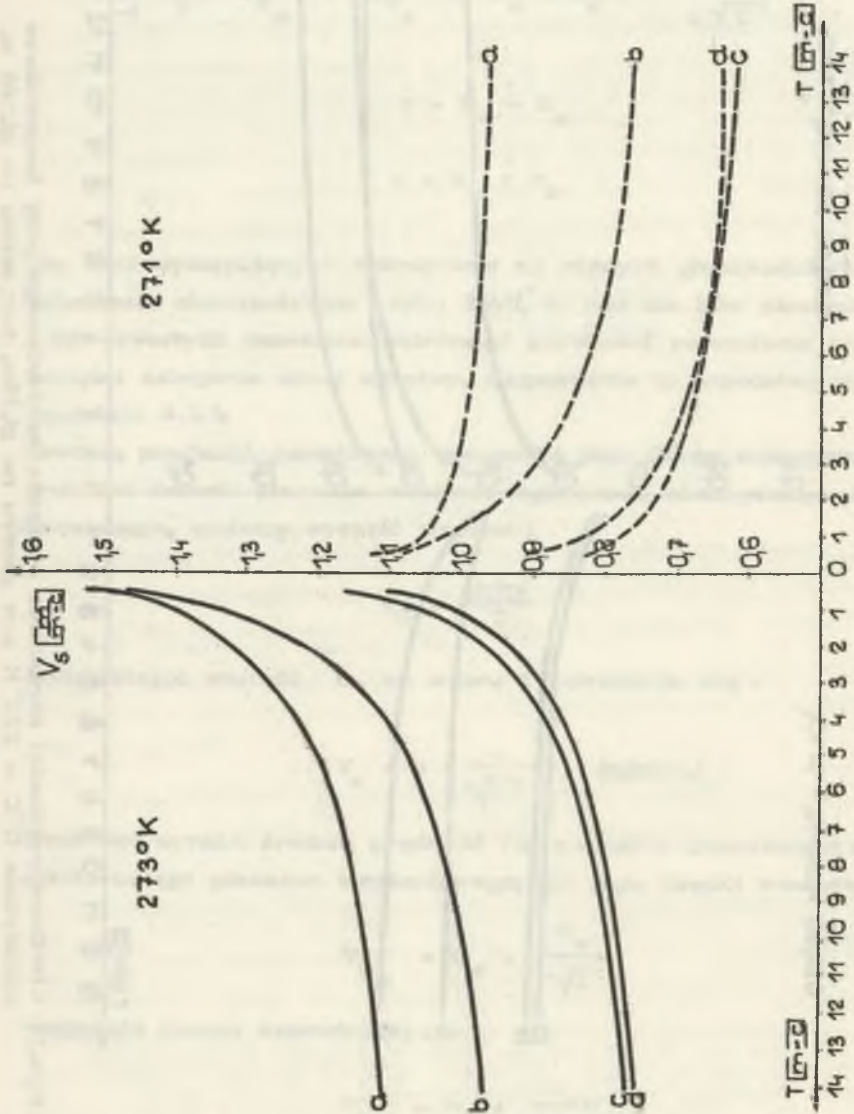
$$V_{S_z} = b_z + \frac{c_z}{\sqrt{T}} \quad \text{/10/}$$

Wartości średniej prędkości dla poszczególnych warstw skalnych przedstawiono na rys.13, oraz w pracy [45].





Rys.12. Chwilowe prędkości narastania płaszczka mroźniowego przy temperaturze zamarzania  $0^{\circ}C = 273^{\circ}K$  a-w piasku na gł.15m, b-w mułku na gł.168 m, c-w łożupku na gł.382 m, d-w piaskowcu na gł.393m.



Rys.13. Całkowite średnie prędkości narastania płaszczu mroźniowego  
 1-w płasku na głęb.15m, 2-w mulku na głęb.168m, 3-w itotupku  
 na głęb.382m, 4-w płaskowcu na głęb.393m.

W celu określenia dokładności przyjętej metody różnic skończonych dokonano obliczeń [praca 45] z których wynika, że popełniony błąd maleje stopniowo od 12 % dla  $T = 1$  miesiąc do 2 % dla  $T = 14$  miesięcy.

#### 4.3.3. Prędkość narastania płaszczu mroźniowego jako funkcja głębokości zalegania danej warstwy

Rozpatrując przebieg zamrażania w poszczególnych warstwach skał wokół szybu Z-VII stwierdzono istotną zmianę szybkości zamrażania /przemieszczania się izoterm  $0^{\circ}\text{C}$  i  $-2^{\circ}\text{C}$ / w poszczególnych warstwach litologicznych w zależności od głębokości ich zalegania. Analizą objęto dwie grupy litologiczne :

Warstwy iłów plastycznych na głębokościach 124m, 254m i 283m, warstwy iłów zwartych na głębokościach 261m, 293m, 338m i 366m.

Na podstawie obróbki statystycznej na maszynie cyfrowej Odra 1204 wyników badań zmian chwilowej i średniej szybkości zamrażania w różnych okresach czasu w zależności od głębokości zalegania danej warstwy określono związek korelacyjny tych parametrów.

Zależność prędkości zamrażania  $V$  od głębokości zalegania  $H$  okazała się prostoliniowa i może być określona następującym równaniem :

$$V = d - e \cdot H \quad /11/$$

lub

$$H = -\frac{1}{e} V + \frac{d}{e} \quad /11a/$$

gdzie  $d, e$  - współczynniki liczbowe charakterystyczne dla danej skały i sposobu zamrażania.



Zależność chwilowej prędkości narastania płaszczu mroźeniowego  $V_T$  od głębokości określa równanie :

$$V_T = d_T - e_T \cdot H \quad /11b/$$

Równanie to może opisywać proces zmniejszania się ze wzrostem głębokości :

- chwilowej prędkości narastania wewnętrznej części płaszczu mroźeniowego

$$V_{Tw} = d_{Tw} - e_{Tw} \cdot H \quad /11c/$$

lub

- chwilowej prędkości narastania zewnętrznej części płaszczu mroźeniowego

$$V_{Tz} = d_{Tz} - e_{Tz} \cdot H \quad /11d/$$

Między współczynnikami liczbowymi we wzorach /11b,c,d/ zachodzą następujące związki :

$$d_T = d_{Tw} + d_{Tz}$$

$$e_T = e_{Tw} + e_{Tz}$$

Liczbowe wartości współczynników ze wzorów 11c,d podano w pracy [45]

Analogicznie średnia prędkość narastania płaszczu mroźeniowego zanika w miarę wzrostu głębokości wg równania :

$$V_S = d_S - e_S \cdot H \quad /11e/$$

Średnią prędkość narastania wewnętrznej części płaszczu jako funkcję głębokości opisuje równanie :

$$V_{Sw} = d_{Sw} - e_{Sw} \cdot H \quad /11f/$$

Podobnie można wyrazić średnią prędkość narastania zewnętrznej części płaszczu mroźeniowego

$$V_{Sz} = d_{Sz} - e_{Sz} \cdot H \quad /11g/$$

Jak poprzednio zachodzą tu relacje między współczynnikami liczbowymi :

$$d_S = d_{Sw} + d_{Sz}$$

$$e_S = e_{Sw} + e_{Sz}$$

Współczynniki we wzorach 11 f, g podano w pracy [45].

Równocześnie wyznaczono współczynnik korelacji liniowej według wzoru :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n /H_i - \bar{H}/ \cdot /N_i - \bar{V}/}{\sqrt{\sum_{i=1}^n /H_i - \bar{H}/ \cdot \sum_{i=1}^n /N_i - \bar{V}/}} \quad /12/$$

Wartości współczynnika korelacji zestawione w pracy [45] są stosunkowo wysokie i korelację prędkości zamrażania od głębokości można uznać za dobrą.

Na podstawie wyników analizy numerycznej i statystycznej opracowano wykresy charakterystycznych przypadków zależności prędkości zamrażania od głębokości /rys.14/ i określono graniczne teoretyczne głębokości zamrażania /dla  $V_S = 0/$ , które w analizowanym przypadku szybu Z-VII wynoszą /przy temperaturze zamrażania  $0^{\circ}\text{C} = 273, 15^{\circ}\text{K} / :$

- w łdach plastycznych 710 + 740 m,
- w łdach zwartych 750 + 810 m.

Wartości te określają głębokości poniżej których zamrażanie skał nie będzie następowało mimo pracy instalacji mroźniowej, lecz wystąpi jedynie ochłodzenie skał wokół otworów mroźniowych. Tak wyznaczona głębokość graniczna ma znaczenie czysto teoretyczne, gdyż praktyczna głębokość zamrażania jest znacznie, mniejsza a określają ją kryteria techniczno-ekonomiczne możliwości i opłacalności stworzenia płaszcza mroźniowego odpowiedniej grubości wokół projektowanego szybu.

W rozpatrywanym przypadku szybu Z-VII przy założeniu minimalnej wartości średniej szybkości zamrażania  $V_{s \text{ min}} = 0,20 \text{ m/m-c}$  graniczna głębokość zamrażania wynosi około 500 m.

#### 4.3.5. Ocena wyników badań

Z porównania szybkości narastania płaszczka mroźniowego dla obu analizowanych szybów wynika, że zamrażanie górotworu w warunkach ROW /Z-VII/ przebiegało znacznie szybciej niż w warunkach LGOM /P-I/.

Szybkość narastania płaszczka mroźniowego w odpowiednich warstwach w szybie Z-VII była wyższa przeciętnie o  $40 \pm 50 \%$  a w piaskowcach nawet o  $100 \%$  w stosunku do danych z szybu P-II

We wszystkich warstwach stwierdzono zjawisko szybkiego zmniejszania się szybkości zamrażania w ciągu pierwszych  $4 \pm 5$  miesięcy trwania tego procesu a następnie pewną stabilizację szybkości ze słabą tendencją zniżkową.

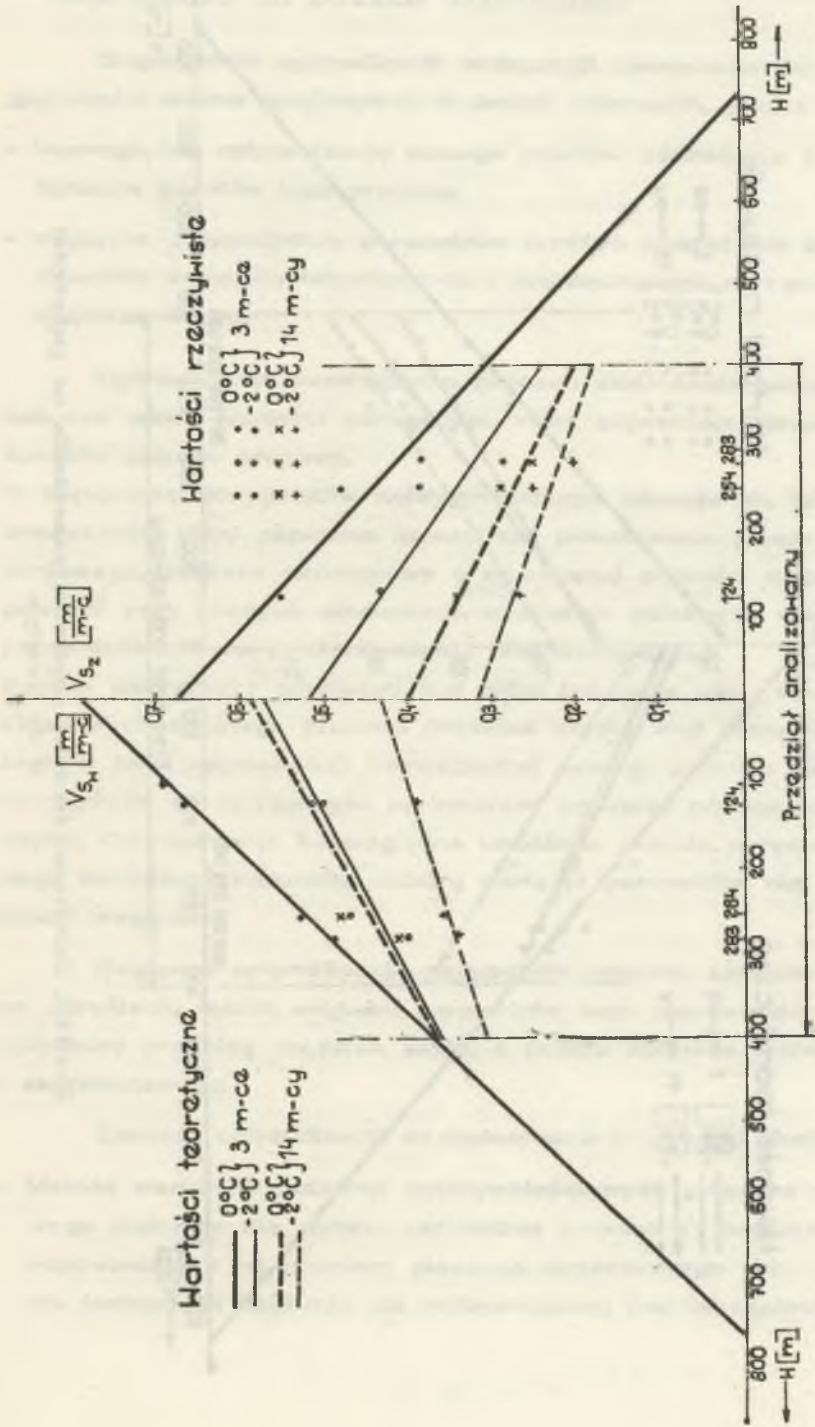
W wyniku przeprowadzonych badań dokonano następujących stwierdzeń :

- w miarę wzrostu głębokości następuje znaczne i systematyczne zmniejszanie się grubości płaszczka mroźniowego,
- w otworze mroźniowym przy laminarnym przepływie łągu i stałowych rurkach łągowych zachodzi w miarę wzrostu głębokości znaczny /ok. 3 deg/ 400 mb/ wzrost temperatury łągu w rurkach łągowych oraz w przestrzeni międzyrurowej /ok. 7 deg/400 mb/; łącznie wzrost temperatury wynosi ok. 10 deg, tj.  $30 \pm 50 \%$  ujemnej temperatury łągu.

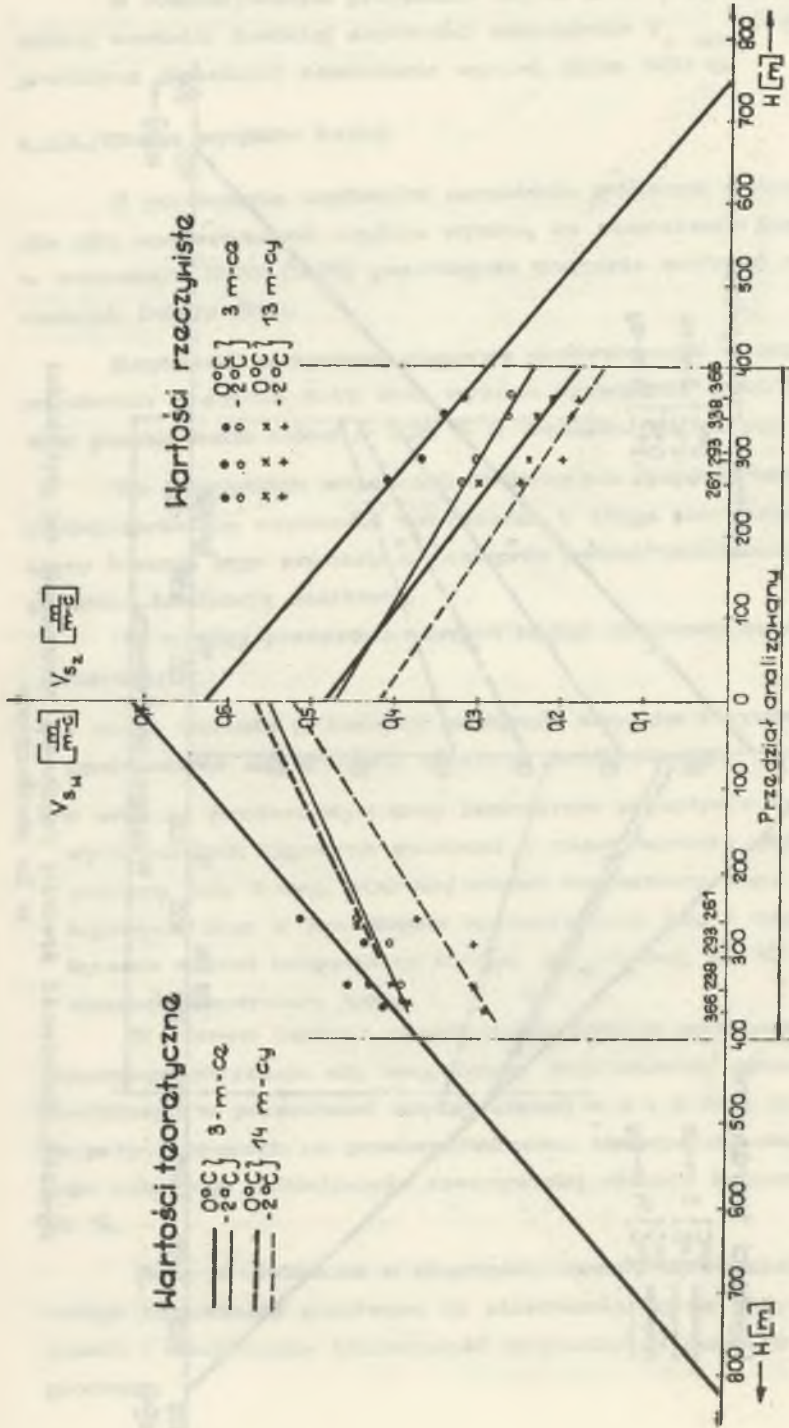
W górnym odcinku otworu mroźniowego występuje zjawisko znacznego obniżania się temperatury /ochładzania/ strumienia łągu powrotnego w przestrzeni międzyrurowej o  $3 \pm 4 \text{ deg}$ , co powoduje, że przy pomiarach na powierzchni ziemi temperatury obu strumieni łągu występuje zmniejszanie rzeczywistej różnicy temperatur o  $40 \pm 50 \%$ .

Dane te świadczą o nieprzystosowaniu dotychczasowej technologii zamrażania górotworu do stosowania jej na dużych głębokościach i uzasadniają konieczność optymalizacji parametrów tego procesu.





Rys.14a. Zależność średniej prędkości zamrażania od głębokości w ile plastycznym



Rys.14b. Zależność średniej prędkości zamrażania od głębokości w ile zwartym

## 5. OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU DO DUŻYCH GŁĘBOKOŚCI

Zagadnienie optymalizacji technologii zamrażania do dużych głębokości można rozpatrywać w dwóch zakresach, jako :

- bezwzględną optymalizację samego procesu zamrażania z uwagi na minimum kosztów tego procesu,
- względną optymalizację parametrów procesu zamrażania z uwzględnieniem wymogów technicznych i ekonomicznych całego procesu drążenia szybu.

Optymalizacja bezwzględna procesu zamrażania polega na doborze takich wartości parametrów, które zapewniają minimalizację kosztów samego procesu.

W większości przypadków najwygodniejszym okazuje się taki reżim zamrażania, który zapewnia najszybsze powstawanie płaszczka mroźniowego. Płaszcz mroźniowy o wymaganej grubości może jednak powstać przy różnych stosunkach wzajemnie zależnych wielkości parametrów otworu mroźniowego i temperatur ługu.

Proces zamrażania górotworu jest tylko jednym z wielu elementów składowych ogólnego procesu drążenia szybu, stąd parametry uzyskane w toku optymalizacji bezwzględnej samego procesu zamrażania nie zawsze są optymalnymi parametrami ogólnego procesu drążenia szybu. Optymalizacja bezwzględna umożliwia jedynie określenie ogólnego kierunku i warunków doboru wartości parametrów dla optymalizacji względnej.

Względna optymalizacja parametrów procesu zamrażania polega na określeniu takich wartości parametrów tego procesu, które zapewnią optymalny przebieg drążenia szybu z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego.

Zadanie optymalizacji względnej można określić następująco:

- Metodą wariantów obliczeń wytrzymałościowych płaszczka mroźniowego dokonuje się wyboru optymalnej temperatury zamrażania oraz odpowiadające jej rozmiary płaszczka mroźniowego przy uwzględnieniu technologii drążenia dla najtrudniejszej /najniebezpieczniejszej/



warstwy skał. Warstwę taką może określać zarówno charakterystyka litologiczna i fizyko-termiczna, jak również naturalna temperatura i głębokość zalegania oraz własności fizyko-mechaniczne i reologiczne zamrożonych skał. Warstwę taką można nazwać przewodnią dla procesu zamrażania.

- Określa się grubości płaszczka mroźniowego, jakie tworzą się w innych charakterystycznych warstwach przekroju geologicznego w czasie odpowiadającym powstaniu płaszczka mroźniowego określonej grubości w warstwie przewodniej, przy uwzględnieniu technologii i przebiegu robót,
- Na podstawie np. nomogramów określa się czas potrzebny dla powstania płaszczka mroźniowego zadanych rozmiarów w warstwie przewodniej, tj. czas zamrażania aktywnego.
- Czas i reżim zamrażania pasywnego winien być określony na podstawie analizy technologii i przebiegu robót

### 5.1. Wpływ podstawowych parametrów zamrażania na proces powstawania płaszczka mroźniowego

Przebieg procesu zamrażania górotworu uzależniony jest od zmiennych technologicznych i naturalnych parametrów określających warunki zamrażania.

Podstawowymi parametrami technologicznymi zamrażania są:

- temperatura zamrażania,
- wzajemna odległość otworów mroźniowych,
- średnica rur mroźniowych,
- średnica kręgu otworów mroźniowych,

Wśród naturalnych parametrów decydującą rolę odgrywają:

- naturalna temperatura skał,
- pojemność i przewodność cieplna skał.

Grubość ścian płaszczka mroźniowego jest funkcją czasu oraz parametrów określających warunki naturalne i technologiczny schemat zamrażania :

$$E = f(T, t_w, t_z, D_z, D_k)$$

Grubość ścian płaszczka mroźniowego można wyrazić wzorem empirycznym [34] :

$$E = 0,446 + 0,0533/24-t_n + 0,0017 t_z/T-1 \left[ 0,65 + 0,00066/24-t_n \right]^2 +$$

$$+ E_o/T + 0,0,08/D_z - 5''/T-1/ \cdot 0,44 + 0,0017/24-t_n/t_z/1-1,3/..... /13/$$

gdzie :

- T - czas zamrażania /miesiące/
- $t_n$  - temperatura naturalna skał
- $t_z$  - temperatura zamrażania
- l - wzajemna odległość otworów mroźniowych
- $D_z$  - średnica rur mroźniowych

$E_o/T$  - zależność grubości ścianki płaszczka mroźniowego od czasu zamrażania, dla średnicy zewnętrznej rury mroźniowej 5 cali

Zakres wpływu poszczególnych parametrów na grubość ścian płaszczka mroźniowego przedstawiono na rysunku 15 opracowanym na podstawie wzoru /13/.

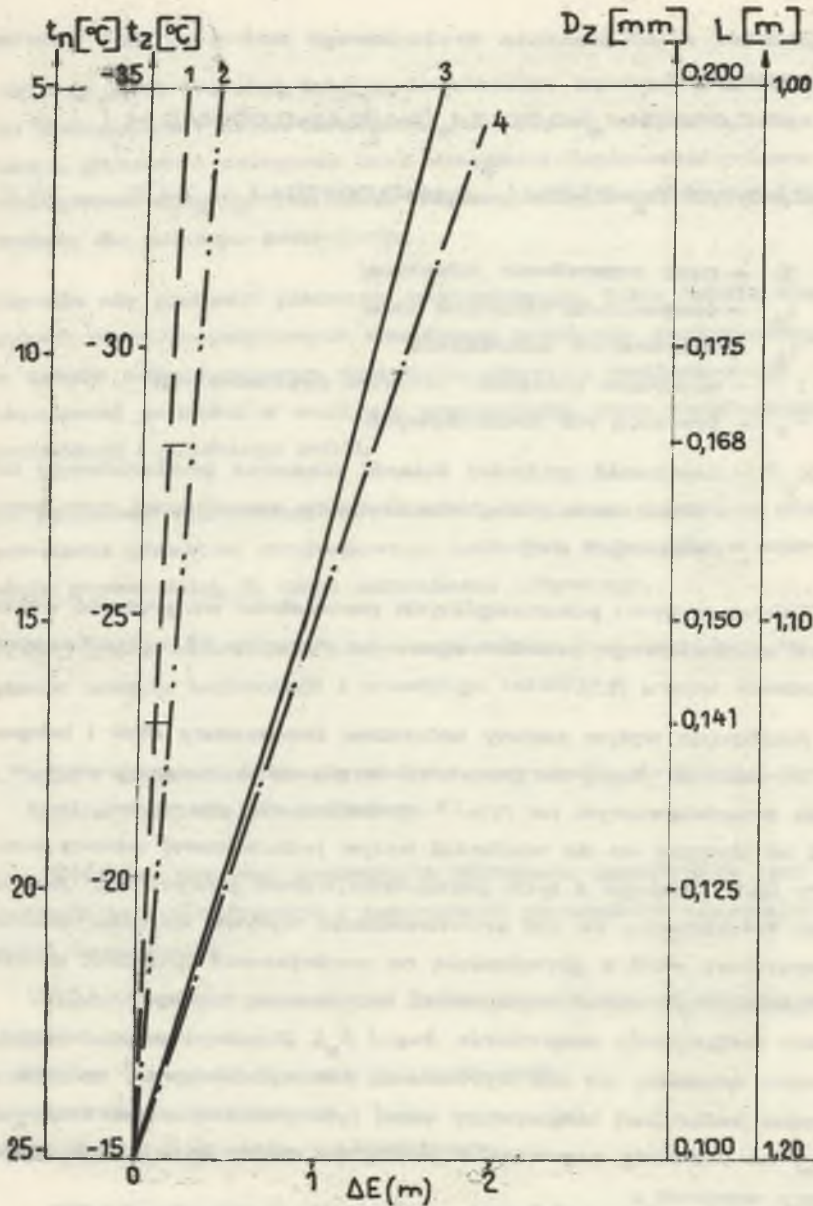
Analizując wpływ zmiany naturalnej temperatury skał i temperatury zamrażania  $t_{z0}$  na powstawanie płaszczka mroźniowego w zakresie przedstawionym na rys.15 stwierdza się przeciwny, lecz nieomal identyczny co do wielkości wpływ jednostkowej zmiany temperatury  $\Delta t$  każdego z tych parametrów. Wobec powyższego można wysunąć twierdzenie, że dla zrównoważenia wpływu wzrostu naturalnej temperatury skał z głębokością na zmniejszenie grubości płaszczka mroźniowego winno następować w tym samym stopniu  $\Delta t$  obniżanie temperatury zamrażania  $t_{z0}/t_z$ . Z powyższego twierdzenia wynika wniosek, że dla wyrównania /skompensowania/ wpływu głębokości /naturalnej temperatury skał/ i temperatury zamrażania skał  $t_o$  na przebieg zamrażania górotworu winien być spełniony następujący warunek :

$$|t_z| \geq |t_n| + |t_o| ; \quad ^\circ C / \dots \dots \dots /14/$$

lub

$$t_z \leq 273,15 - |t_n - t_o| ; \quad ^\circ K /$$

Zależność ta wyraża jedną z podstawowych zasad optymalizacji procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości.



Rys.15. Wpływ poszczególnych parametrów na proces zamrażania górotworu w okresie 5 miesięcy zamrażania, wg /34/

- 1-średnica rur mroźniowych,  $D_z = 100 + 0,200$  m,  
 2-odległość między otworami mroźniowymi  $l = 1,00 + 1,20$  m,  
 3-temperatura zamrażania,  $t_z = -15 + -35$  °C,  
 4-naturalna temperatura skał,  $t_n = 5 + 25$  °C.



## 5.2. Optymalizacja parametrów otworu mroźeniowego i instalacji mroźeniowej

Otwór mroźeniowy zajmuje kluczową pozycję w procesie zamrażania górotworu, gdyż poprzez niego odbywa się przepływ ciepła z górotworu do instalacji mroźeniowej.

W otworze mroźeniowym można wyróżnić dwa strumienie łożu :

- w rurze wewnętrznej /łożowej/ strumień łożu przepływa najczęściej z góry w dół,
- w przestrzeni pierścieniowej /międzyrurowej/ strumień łożu powrotnego, przepływającego najczęściej z dołu do góry.

Wymiana ciepła zachodzi nie tylko na zewnątrz otworu pomiędzy strumieniami łożu w przestrzeni pierścieniowej /międzyrurowej/ a górotworem /wymiana zewnętrzna/, lecz również wewnątrz otworu pomiędzy obu strumieniami łożu /wymiana wewnętrzna/.

Zasadniczym celem optymalizacji parametrów otworu mroźeniowego jest intensyfikacja wymiany zewnętrznej, która stanowi o szybkości narastania płaszcza mroźeniowego a ograniczenie wymiany wewnętrznej, która wpływa na intensyfikację procesu zamrażania w górnej części strefy zamrażanej kosztem dolnej strefy, co jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym, gdyż wówczas grubość płaszcza mroźeniowego zmniejsza się w miarę wzrostu głębokości.

Intensywność wymiany ciepła w cieczech zależy w głównej mierze od charakteru przepływu danego strumienia cieczy, dlatego też jednym z warunków optymalizacji procesu zamrażania jest określenie optymalnych warunków przepływu łożu w otworze mroźeniowym.

### 5.2.3. Ocena wyników optymalizacji parametrów otworu mroźniowego i instalacji mroźniowej

W celu oceny efektów proponowanej optymalizacji wykonano numeryczną analizę porównawczą dotychczasowych wielkości parametrów otworu mroźniowego oraz proponowanych wartości tych parametrów.

Analizę przeprowadzono dla obu stosowanych średnic rur mroźniowych 141 mm i 168 mm i różnych średnic rurek ługowych.

Rozpatrzono dwa charakterystyczne przypadki warunków wymiany ciepła w otworze mroźniowym :

- dotychczasowy, tradycyjny układ w którym wydatek przepływu ługu w otworze mroźniowym wynosi około 100 l/min, a w przestrzeni międzyrurowej występuje zawsze przepływ laminarny;
- proponowany, nowy układ w którym w przestrzeni międzyrurowej zawsze występuje przepływ burzliwy  $/Re \geq 3500/$  a wydatek przepływu zależy od średnic stosowanych rur mroźniowych i ługowych.

W zależności od zestawu rur mroźniowych i ługowych wydatki przepływu dla pojedynczego otworu wahają się od 305 l/min, dla rur 141 mm i rurek 44,5 mm do 451 l/min, dla rur 168 mm i rurek 102 mm.

Wartości te są 4 + 5 krotnie wyższe w stosunku do wydatków przepływu stosowanych w dotychczasowej praktyce zamrażania górotworu  $/80 + 100 \text{ l/min.}/$ .

Intensyfikacja zewnętrznej wymiany ciepła w otworze mroźniowym umożliwi wzrost szybkości zamrażania, zmniejszenie ilości otworów mroźniowych przez zwiększenie odległości pomiędzy nimi na kręgu a także obniżenie temp. ługu w przestrzeni międzyrurowej i obniżenie średniej temperatury skał zamrożonych.

Ogólnie można przyjąć, że w wyniku proponowanego około 4-krotnego wzrostu wydatku przepływu ługu, współczynnik wymiany ciepła z górotworem  $/\beta_{pz}/$  wzrośnie 10 + 20-krotnie, uwzględniając

zmniejszenie ilości otworów mroźniowych oraz zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy ługiem a górotworem wydaje się konieczne znaczne zwiększenie /4 + 5 krotnie/ wydajności agregatów mroźniowych w stosunku do kryteriów obowiązujących dotychczas.

### 5.3. Optymalizacja parametrów płaszczu mroźniowego

Do podstawowych parametrów płaszczu mroźniowego, które winny być uwzględnione przy optymalizacji procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości należy zaliczyć

- określenie średniej temperatury płaszczu mroźniowego,
- wyznaczenie średniej wytrzymałości poszczególnych warstw skał zamrożonych,
- określenie grubości płaszczu mroźniowego oraz wielkości i czasu odstonięcia wyłomu pojedynczego odcinka w poszczególnych warstwach skał.

#### 5.3.1. Określenie średniej temperatury płaszczu mroźniowego

Rozkład temperatur w płaszczu mroźniowym jest bardzo złożony ze względu na wzajemny wpływ poszczególnych otworów mroźniowych. Określenie średniej temperatury płaszczu mroźniowego w tych warunkach jest bardzo trudne.

Na szczególne wyróżnienie z uwagi na ich łatwe praktyczne zastosowanie zasługują wzory Stiepanowej z Instytutu Górniczego im. A. A. Skoczyńskiego w Moskwie [57]. W oparciu o prace analityczne Bachołdina, Hakimowa i Libermana dokonała ona obliczeń na maszynie cyfrowej dla występujących w praktyce głębienia szymbów wariantów poszczególnych parametrów mrożenia i opracowała wzory empiryczne na określenie średnich temperatur w płaszczu mroźniowym.

Wzór na średnią temperaturę całego płaszczu mroźniowego posiada postać [57]

$$t_{sc} = t_{st} / 0,42 + 0,09 \frac{1}{2R_0} - 0,20 \frac{1}{2E} + 0,37 \frac{D_z}{1} + 0,01 \frac{nE}{E}$$



gdzie :

- $t_{st}$  - temperatura skały na powierzchni rury mrożeniowej
- $l$  - odległość pomiędzy otworami mrożeniowymi
- $R_o$  - promień kręgu otworów mrożeniowych
- $D_z$  - średnica zewnętrzna rury mrożeniowej
- $E$  - grubość płaszczka mrożeniowego na zewnątrz kręgu otworu mrożeniowego
- $nE$  - grubość płaszczka mrożeniowego do wewnątrz kręgu otworów mrożeniowych

Badania wykazały, że wzór Stiepanowej mimo prostej postaci daje wyniki dokładne i zgodne z pomiarami w naturze wykonanymi przez Bachołodina oraz z rezultatami obliczeń na integratorze hydraulicznym Łukjanowa.

Na podstawie wywodów Stiepanowej i wzoru 15 wykonano obliczenia na maszynie cyfrowej Odra 1204 dla zakresu wartości poszczególnych wielkości występujących w praktyce a następnie opracowano przykładowe nomogramy dla określania średniej temperatury płaszczka.

### 5.3.2. Określenie wytrzymałości skał zamrożonych

Na podstawie badań laboratoryjnych i "in situ" [2,4,10,12,15, 28,33] stwierdzono, że parametry wytrzymałościowe skał zamrożonych zależą zarówno od rodzaju skały jak również od jej parametrów fizycznych : porowatości, wilgotności, składu granulometrycznego i rosną w miarę obniżania temperatury zamrożenia.

Równocześnie stwierdza się bardzo znaczną zmianę parametrów wytrzymałościowych w funkcji czasu a więc obserwuje się intensywne zjawiska reologiczne w skałach zamrożonych oraz znaczne zmiany objętościowe w procesie zamrażania.

Intensywność tych zjawisk zwiększa się wraz ze wzrostem głębokości zamrażania a więc i wielkości obciążeń płaszczka mrożeniowego.

W procesie zamrażania górotworu do dużych głębokości wydaje się konieczne uwzględnienie zmian parametrów wytrzymałościowych skał w zależności od temperatury zamrożenia  $t$  i czasu

działania obciążenia  $|T|$ . Zagadnienia te nie są jeszcze dostatecznie wyjaśnione i zbadane, lecz wyniki dotychczasowych badań zarówno krajowych [2,4,12,28,59+61] jak również zagranicznych [2,4,12,63,64] stwarzają możliwości wstępnych uogólnień i praktycznego ich wykorzystania.

### 5.3.2.1. Analiza wytrzymałości wybranych skał zamrożonych w zależności od temperatury zamrożenia

Analizując wyniki badań wytrzymałościowych skał zamrożonych [2,4,12,28,59+61] autor stwierdził, że zależność wytrzymałości od temperatury zamrożenia można wyrazić wzorem empirycznym typu:

$$\log R_{CO} = A \log |t| + B \quad /16/$$

lub za pomocą logarytmów naturalnych

$$R_{CO} = \exp [A \cdot \ln |t| + C] = d \cdot \exp [A \cdot \ln |t|] \quad /16a/$$

gdzie :

$A, B$  - stałe, których wartość zależy od rodzaju i parametrów fizycznych skały,

$|t|$  - wartość bezwzględna temperatury zamrożenia skały /ujemnej temperatury wyrażonej w  $^{\circ}C$ /,

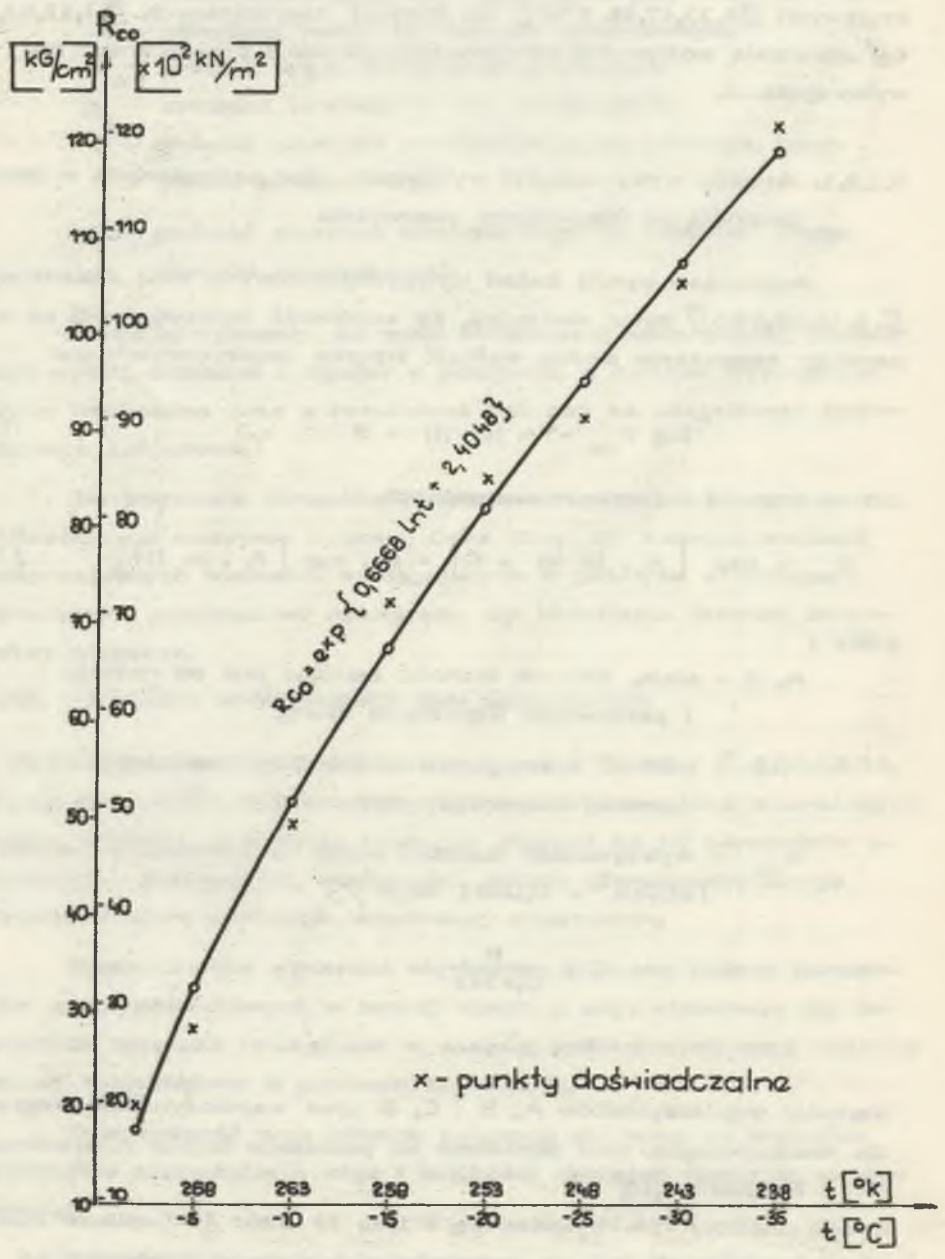
$R_{CO}$  - wytrzymałość doraźna skały na 1-osiowe ściskanie;  
/  $kG/cm^2 = 0,0981 MN/m^2$  /

$$C = \frac{B}{0,4343}$$

$$D = e^C$$

Wartości współczynników  $A, B$  i  $C, D$  oraz współczynników regresji dla analizowanych skał określono na podstawie badań Z.Strzeleckiego [59] i Fedjukina [15]

Wyniki analizy / rys.16 / świadczą o tym, że wzór 16 opisuje stosunkowo dokładnie zmianę wytrzymałości skały w zależności od temperatury zamrożenia w zakresie temperatur  $-5 \div -30^{\circ}C$ . Większe



Rys.16. Zależność wytrzymałości doraźnej skał od temperatury zamrożenia - dla iłu miocńskiego o wilgotności 70%



niedokładności pojawiają się dopiero poniżej temperatury  $-30^{\circ}\text{C}$ , a więc, w zakresie średnich temperatur płaszcza mroźniowego bardzo rzadko osiągalnych względnie nieosiągalnych w obecnym stanie techniki zamrażania górotworu.

### 5.3.2.2. Analiza wytrzymałości wybranych skał zamrożonych w zależności od czasu działania obciążenia

Rozpatrując zależność wytrzymałości zamrożonych skał od czasu działania obciążenia można wyróżnić dwa pojęcia :

- wytrzymałość doraźną, gdy obciążenie działa przez okres krótkotrwały nie przekraczający kilku minut,
- wytrzymałość długotrwałą, gdy czas działania obciążenia jest dłuższy /powyżej kilku minut/.

Na podstawie analizy wyników badań własności skał zamrożonych przedstawionych w pracach [2, 15, 25] autor stwierdził, że proces zmiany wytrzymałości skał w funkcji czasu działania obciążenia można opisać wzorem empirycznym :

$$R_{CT} = E \cdot R_{CO} - FT^G + H \exp \left[ - \frac{T}{I} \right] \quad [17]$$

gdzie :

$E, F, G, H, I$  - współczynniki liczbowe zależne od rodzaju skały i jej parametrów fizycznych

$$E > 1$$

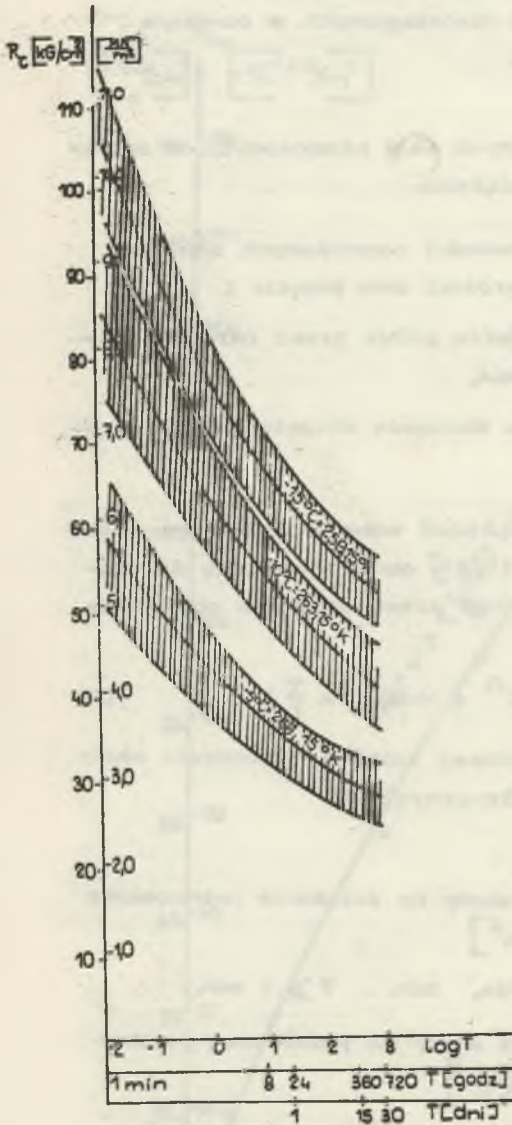
$R_{CO}$  - wytrzymałość doraźna skały na ściskanie jednoosiowe  
 $\left[ \text{kG/cm}^2 \approx 10^{-1} \text{ MN/m}^2 \right]$

$T$  - czas działania obciążenia, min. ,  $T \gg 1$  min,

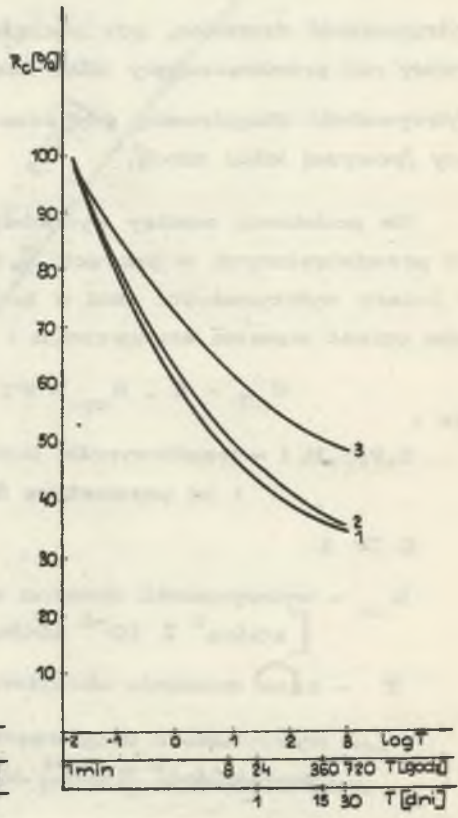
$R_{CT}$  - wytrzymałość długotrwała skały na jednoosiowe ściskanie;  
 $\left[ \text{kG/cm}^2 \approx 10^{-1} \text{ MN/m}^2 \right]$

Wartości współczynników  $E, F, G, H, I$  podano w pracy [45].

W oparciu o wzory 16 i 17 określono wytrzymałość zamrożonych skał dla temperatur zamrożenia  $-5; -10; -15^{\circ}\text{C} = 268,15; 263,15; 258,15^{\circ}\text{K}$  w zależności od czasu działania obciążenia a wyniki przedstawiono na wykresach [rys.17a].



Rys.17a. Wytrzymałość na ściskanie  $R_c$  w zależności od czasu działania obciążenia dla płasku średnioziarnistego /niższe wartości odpowiadają płaskowi jednorodnemu, wyższe wartości - różnorodnemu/.



Rys.17b. Procentowy spadek wytrzymałości w zależności od czasu działania obciążenia w zakresie temperatur  $-5 + 15^\circ\text{C}$ ;  
1-gлина, 2-піaseк pylisty, 3-піaseк średnioziarnisty

Na podstawie danych przedstawionych na wykresach [rys.17] można stwierdzić, że spadek wytrzymałości najintensywniej przebiega w ciągu pierwszych 8 godzin trwania obciążenia i wynosi od 40 + 50 % wytrzymałości doraźnej, następnie spadek wytrzymałości jest znacznie wolniejszy i asymptotycznie zanika; spadek wytrzymałości jest znacznie wyższy w iltach niż w piaskach,

Uogólniając rezultaty analizy wyników badań, można określić dla celów praktycznych następujący orientacyjny zakres zmian wytrzymałości w czasie dla skał zamrożonych w zakresie temperatur  $-5 + -15^{\circ}\text{C}$  [rys.17b],

W przedziale czasu 0 + 24 godziny :

- ilt, gliny zmniejszają swoją wytrzymałość o 60 % a więc do 40 % wytrzymałości doraźnej;  $R_{c24h} = 0,4 R_{co}$
- piaski pylaste zmniejszają swoją wytrzymałość o około 55 %, a więc do 45 % wytrzymałości doraźnej;  $R_{c24h} = 0,45 R_{co}$
- piaski średnioziarniste zmniejszają swą wytrzymałość o około 40%, to jest do 60% wytrzymałości doraźnej;  $R_{c24h} = 0,6 R_{co}$

Po 30 dniach wytrzymałości zamrożonych skał spada do następujących wielkości :

- ilt i gliny  $R_{c30d} = 0,35 R_{co}$
- piaski pylaste  $R_{c30d} = 0,37 R_{co}$
- piaski średnioziarniste  $R_{c30d} = 0,50 R_{co}$

Czasokresy działania obciążenia wynikają z technologii drążenia i wielkości odstąpiętego a nieobudowanego odcinka,



### 5.3.3. Wymiarowanie płaszcz mroźniowego

Wzrost głębokości zamrażania górotworu spowodował w ostatnich latach rewizję dotychczasowych poglądów na pracę i wytrzymałość płaszcz mroźniowego. W skałach zamrożonych występują bardzo silnie zjawiska reologiczne, narastanie deformacji w czasie przy stałym obciążeniu /zjawisko pełzania/, względnie zmniejszenie się naprężeń w czasie przy stałych odkształceniach /zjawisko relaksacji/ oraz obniżanie się wytrzymałości przy długotrwałym działaniu obciążenia. W szczególności mogą występować duże deformacje wskutek pełzania bez niszczenia samego płaszcz mroźniowego, co znacznie utrudnia wykonanie obudowy i powoduje pęknięcie rur mroźniowych. Ponadto w procesie zamrażania następuje zmiana objętości skał w wyniku przechodzenia wody w lód, co powoduje dodatkowe naprężenia wewnętrzne w skałach zamrożonych i potęguje ich skłonność do deformacji.

Według zgodnych opinii autorów krajowych [9,28,47+49,69] i zagranicznych [2,34,35,63+65] płaszcz mroźniowy można rozpatrywać jako ośrodek sprężysty lub ośrodek sprężysto-lepki /model Maxwella/ jedynie na mniejszych głębokościach, nie przekraczających w zasadzie 300 m, co stanowi równocześnie granicę stosowalności wzorów opartych na tych założeniach /Lame', Hubera, Domke/, a określających grubość płaszcz mroźniowego na podstawie naprężeń dopuszczalnych dla skał zamrożonych.

Zgodnie z wynikami obserwacji zjawisk występujących w praktyce [17,30,43] oraz rezultatami badań [9,28,47+49,63+65] płaszcz mroźniowy na większych głębokościach należy rozpatrywać jako ośrodek plastyczno-lepki /model Bingham'a/ a jego grubość powinna być wyznaczona na podstawie stanu granicznej równowagi, gdy płaszcz mroźniowy na całej swej grubości przejdzie w stan plastyczny. Oparte na tych zasadach wzory na określenie grubości płaszcz mroźniowego Sałustowicza, Wjałowa i Libermana umożliwiają określenie optymalnych parametrów płaszcz mroźniowego na dużych głębokościach.

Analizując pracę płaszczu mroźniowego można wyróżnić dwa przypadki :

- płaszcz mroźniowy nieograniczonej wysokości, gdy wysokość niezabudowanego odcinka jest większa od promienia szybu w wyłomie  $h > R$ ;
- płaszcz mroźniowy ograniczonej wysokości, gdy wysokość nieobudowanego odcinka jest mniejszą od promienia szybu w wyłomie  $h < R$ .

### 5.3.3.1. Płaszcz mroźniowy nieograniczonej wysokości

Pojęcie płaszczu mroźniowego nieograniczonej wysokości oznacza w praktyce drążenie szybu długimi odcinkami  $h > R$  bez obudowy wstępnej. Grubość płaszczu mroźniowego w tych warunkach można wyznaczyć następującym wzorem Libermana [31]

$$E = R \cdot \exp \frac{\gamma \cdot H}{R_c} - 1 \cdot S \quad [18]$$

gdzie :

- $E$  - grubość ścianki płaszczu mroźniowego ; /m/
- $R$  - wewnętrzny promień płaszczu mroźniowego ; /m/
- $\gamma$  - średni ciężar objętościowy skał ; /T/m<sup>3</sup>/, kN/m<sup>3</sup>
- $H$  - głębokość zamrażania ; /m/
- $R_c$  - wytrzymałość skały zamrożonej ; /T/m<sup>2</sup>/, MN/m<sup>2</sup>
- $S$  - współczynnik pewności ; /S = 1,1 + 1,2/

Dla określenia zakresu stosowalności tego rodzaju technologii w warunkach skał zamrożonych wykonano na EMC - Odra 1204 obliczenia powyższego wzoru dla całego zakresu występujących w praktyce wartości poszczególnych parametrów

$$\begin{aligned} R &= 2,5 + 10 \text{ m co } 0,5 \text{ m} \\ \gamma &= 1,3 + 3,0 \text{ T/m}^3 = 13 + 30 \text{ kN/m}^3 \text{ co } 0,1 \text{ T/m}^3 = 1 \text{ kN/m}^3 \\ H &= 10 + 250 \text{ m co } 10 \text{ m} \\ R_c &= 100 + 1000 \text{ T/m}^2 = 1 + 10 \text{ MN/m}^2 \\ S &= 1,1 \text{ i } 1,2. \end{aligned}$$

Na podstawie obliczeń opracowano nomogramy dla charakterystycznych wartości parametrów.

Na podstawie analizy wyników obliczeń można stwierdzić, że przy zamrażaniu jednostopniowym  $t_{sc} = -10^{\circ}\text{C}$  i grubości płaszczu mroźniowego 5 m istnieje możliwość drążenia szybu długimi odcinkami bez obudowy wstępnej do głębokości: 60 + 70 m w glinach, 90 + 110 m w kurzawkach /piaskach pylastych/ i 170 + 200 m w piaskach.

Przy zamrażaniu 2-stopniowym  $t_{sc} = -15^{\circ}\text{C}$  głębokość ta wzrasta do ok. 100 m dla glin, 150 m dla kurzawek i 250 m dla piasków.

Z rozważań tych wynika wniosek, że przy zamrażaniu górotworu na dużych głębokościach  $H > 300$  m/ niemożliwe jest w obecnych warunkach zamrażania drążenie szybów długimi odcinkami bez obudowy wstępnej. Powyższe stwierdzenie jest zgodne z doświadczeniami praktycznymi wynikającymi z licznych awarii i trudności w szybach drążonych metodą zamrażania górotworu na większych głębokościach.

### 5.3.3.2. Płaszcz mroźniowy ograniczonej wysokości

Ograniczenie wysokości płaszczu mroźniowego do wielkości promienia wyłomu odpowiada w praktyce warunkom drążenia szybu krótkimi odcinkami, względnie z zastosowaniem odpowiedniej obudowy wstępnej.

Rozpatrując płaszcz mroźniowy ograniczonej wysokości J.M.Liberman założył, że w wyniku tarcia pomiędzy otaczającym górotworem a płaszczem mroźniowym rzeczywiste obciążenie nieobudowanego odcinka płaszczu mroźniowego wynosi w granicznych warunkach połowę ciężaru nadległych skał.

Wzór Libermana na grubość płaszczu mroźniowego ma wówczas postać [31]

$$E = h \cdot \frac{\delta \cdot H}{R_c} \quad /19/$$



gdzie :

$h$  - wysokość nieobudowanego odcinka /m/

$\gamma$  - ciężar objętościowy nadległych skał

$H$  - głębokość zalegania rozpatrywanego odcinka

Dla analizy zakresu stosowalności wzoru<sup>19</sup> oraz oceny zakresu możliwości drążenia szybów metodą zamrażania górotworu wykonano na EMC - Odra 1204 obliczenia dla zakresu parametrów występujących w praktyce :

$h = 1$  do  $10$  m co  $1$  m

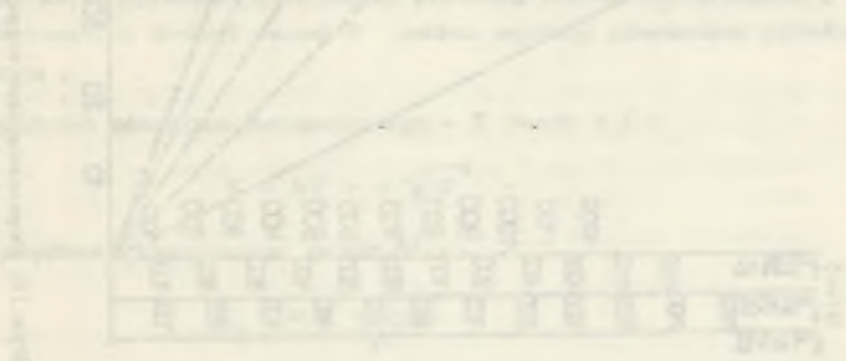
$\gamma = 1,3$  do  $3,0$  T/m<sup>3</sup> =  $13$  do  $30$  kN/m<sup>2</sup>;  $0,1$  T/m<sup>3</sup> =  $1$  kN/m<sup>3</sup>

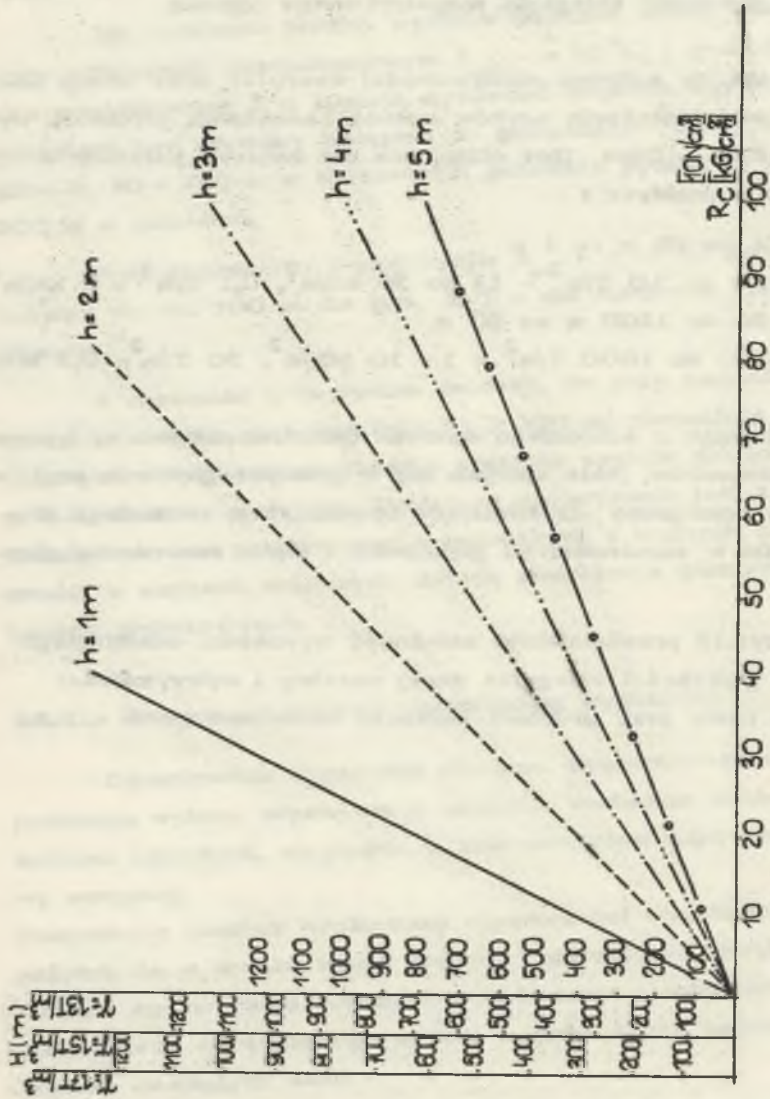
$H = 50$  do  $1200$  m co  $50$  m

$R_c = 100$  do  $1000$  T/m<sup>2</sup> =  $1$  do  $10$  MN/m<sup>2</sup>;  $50$  T/m<sup>2</sup> =  $0,5$  MN/m<sup>2</sup>

Wybierając z szerokiego zakresu obliczeń najbardziej typowe wartości parametrów, jakie spotyka się w praktyce głębienia szybów opracowano nomogramy umożliwiające optymalizację technologii drążenia szybów w zależności od głębokości i stanu zamrożenia górotworu.

Na rys.18 przedstawiono zależność wysokości odsłoniętego zabioru od głębokości zalegania danej warstwy i wytrzymałości zamrożonej skały przy grubości płaszcza mroźniowego  $E = 5$  m,





Rys.18. Dopuszczalna wysokość odsłoniętego zaboru w zależności od głębokości mrożenia  $H$  i wytrzymałości zamrożonej skały  $R_c / \gamma = 1,3; 1,5; 1,7$  T/m = 13,15,17 kN/m<sup>3</sup>;  $E = 5$  m/

## 6. ZAKOŃCZENIE I WNOSKI

Badania i rozważania teoretyczne wykonane w ramach niniejszej pracy pozwoliły na pewne uogólnienia i weryfikację dotychczasowych poglądów w zakresie przebiegu procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości oraz sprecyzowanie szeregu stwierdzeń i wniosków.

- 1/ Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o znacznym spadku prędkości zamrażania  $V$  ze wzrostem głębokości  $H$ , przy tym zależność ta jest liniowa i wyraża się równaniem [11]:

$$V = d - e \cdot H$$

Stwierdzono, że w przypadku zamrażania jednostopniowego i laminarnego przepływu ługu w przestrzeni międzyrurowej, graniczna głębokość zamrażania wynosi teoretycznie dla łoż 700+800 m, a praktycznie 400+500 m /przy temperaturze zamrażania  $0^{\circ}\text{C} - 273,15^{\circ}\text{K}$ . Ponadto stwierdzono, że zmiana temperatury zamrażania skał  $t_0$  z  $273,15^{\circ}\text{K} / 0^{\circ}\text{C}$  do  $271,15^{\circ}\text{K} / -2^{\circ}\text{C}$  to jest o 2 deg, powoduje zmniejszenie szybkości zamrażania i grubości płaszczka mroźniowego o 20 + 30 %.

- 2/ Zgodnie z wynikami tych badań przebieg procesu zamrażania górotworu w funkcji czasu  $T$  można wyrazić równaniem określającym :

= grubość płaszczka mroźniowego =  $E$  /wzór 1 / :

$$E = bT + c \sqrt{T}$$

= prędkość zamrażania /wzór 8/ :

$$V_S = b + \frac{c}{\sqrt{T}}$$

- 3/ Proces zamrażania górotworu do dużych głębokości wymaga znacznego uintensywnienia wymiany ciepła z górotworem w stosunku do zwykłego zamrażania górotworu. Intensyfikację tę można osiągnąć poprzez optymalizację poszczególnych parametrów procesu zamrażania na podstawie zasad podanych w niniejszej pracy,



a w szczególności :

- obniżenie temperatury zamrażania zgodnie ze wzorem /14/ :

$$t_z \leq 273,15 - |t_n - t_o| \quad ^\circ\text{K}$$

- zwiększenie szybkości przepływu łożu w otworze mrozeniowym i zapewnienie warunków przepływu burzliwego w przestrzeni międzyrurowej /  $Re \geq 3500$  /;
  - dobór optymalnych wymiarów rur mrozeniowych i rurek ługowych dla zmniejszenia oporów przepływu łożu i wzrostu wymiary ciepła z górotworem;
  - znaczne zwiększenie wydajności stacji zamrażającej, zgodnie z danymi zawartymi w rozdziale 5.2.
  - uwzględnienie własności reologicznych zamrożonych skał zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 5.3.2.
- 4/ Optymalizacja procesu zamrażania górotworu według proponowanych zasad stwarza możliwości projektowania głębin szybów tą metodą w obecnych warunkach techniczno-technologicznych conajmniej do głębokości 1000 metrów, co stanowi prawie dwukrotne zwiększenie dotychczasowego zakresu stosowania tej metody.
- 5/ Szereg problemów związanych z przeprowadzonymi badaniami zasługuje na dalsze opracowanie zarówno teoretyczne, jak doświadczalne. Można tu wymienić :
- zjawiska towarzyszące zmianie objętości zamrażanych skał,
  - własności i parametry reologiczne zamrożonych skał,
  - współpraca obudowy z zamrożonym górotworem,
  - nowe rodzaje obudowy szybów drążonych metodą zamrażania górotworu na dużych głębokościach,
  - zagadnienie pękania rur mrozeniowych,
  - automatyzacja i sterowanie programowe procesem zamrażania,

Kontynuacja badań nad procesami zamrażania górotworu na dużych głębokościach uzasadniona jest zarówno potrzebami poznawczymi, jak również znaczeniem gospodarczym tej podstawowej metody udostępnienia złóż kopalin zalegających w trudnych warunkach hydrogeologicznych.

## 7. LITERATURA

1. Akademiya Nauk SSSR - J.G.D. im. A. Skocyn'skogo - Zamoroživanie gornych porod pri prohodke stvolov šacht, Moskva 1961.
2. Akademiya Nauk SSSR - Vjalov S. - Pročnost i pol' zyc'est merzlych gruntov, Moskva 1963.
3. Akademiya Nauk SSSR - Anologovyje metody i sredstva rešenija krajovyh žadač, Naukova Dumka, Kiev, 1964.
4. Akimov A.T. - Opyt primenenija akustičeskich i sejsmičeskich metodov issledovanija mierzlych porod, - Sovremennyje voprosy regionalnej i inžinernoj geokriologii, Nauka, Moskva 1964, str. 167-180.
5. Aldrich H.P. - Hydraulic analog computer aids in solution of frost problems, Civil Engineering /U.S.A./1956, vol 26, nr 8.
6. Bachoľdin B.V. - Temperaturnoe pole ledogruntovoj stery, Šachtnoe Stroitel' stvo, 1957, nr 4, str.15-18.
7. Bachoľdin B.V. - K voprosu o temperaturnom režime i srokach zamoroživaniya gruntov v stroitelnyh celach, - Iskusstvennyje osnovanija sooruzenij, Gosstrojizdat, Moskva 1959, str.46-55.
8. Bachoľdin B.V. - Zavisimost koe' ffcienta teplovogo vlijaniya ot temperaturnyh uslovi zamoroživaniya, - Iskusstvennyje osnovanija sooruzenij, Gosstrojizdat, Moskva 1959, str.43-45.
9. Borecki M., Chudek M. - Mechanika górotworu - Ślask, Katowice 1972.
10. Chudek M., Źyliński R. - Opracowanie metodyki obliczania obnażonych ociosów w szybach głębionych sposobem zamrażania - maszynopis - Politechnika Ślaska - Instytut Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni - kwiecień 1973.

11. Gross C.A. - An analogue computer for the vertical rocket landing and take off problems, - Journal of the British Interplanetary Society 1956, vol 15, nr 1 /68/.
12. Cytowicz N.A. - Osnovnye zakonomernosti v mechanike merzlych gruntov. - Materiały k IV Meždunarod. Kongr. po mechanike gruntov i fundamentostroeniju, Moskva, Izdatelstvo A.N. SSSR, 1957, str. 20-29.
13. Draeger G. - Die Ausbildung der Frostwand eines Gefrierschachtes und der Einfluss des Teufvorganges auf die Bewegungen innerhalb der Frostwand. Bergbauwissenschaft n, 1963, nr 22, str.511-523.
14. Dolgov O.A., Jersov N.N., Litvin A.Z., Prozorov L.B. - Opytno-promyšlennaja proverka metodiki rasčeta s pomoščju gidrointegratora osnovnych parametrov processa zamoroživanja gornych porod - Trudy Wsechsojuznogo sovešč, po o\_svoeniju mestoroždem poleznyh iskopaemyh, zalegajuščich v složnyh gidrogeologičeskich i inženernogeologičeskich uslovjach, Nedra, Moskva 1964.
15. Fedjukin W.A. - Prochodka stvolov šacht sposobom zamoroživanja, Nedra - Moskva 1968.
16. Galanka J., Sterkowicz J. - Stateczność szybu głębionego metodą zamrażania górotworu, Przegląd Górniczy, 1958 nr 7-8.
17. Galanka J. - Problematyka i osiągnięcia w głębieniu szybów metodą zamrażania górotworu, Międzynarodowy Zjazd Naukowo-Techniczny Budownictwa Kopalń, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1959, t.V, str. 249-266.
18. Graetz - Ueber die Waermeleitfaschigkeiten von Fluessigkeiten - Ann,Phys, 18/1883 str.79/99, 25/1885 str. 337/357.
19. Hakimov H.R. - K voprosu o teplovyh rasčetach promerzaniija ili ottaivaniija gruntov, Sbornik nr 19 trudov NII osnovanii i fundamentov. Strojizdat, 1952.



20. Hakimov H.R. - Teploobmen v zamoroživajuščej kolonke, Gidrotehničeskoje Stroitel'stvo, 1953, nr 8.
21. Hakimov H.R. - Voprosy teorii i praktiki iskustvennogo zamoroživanja gruntov, IZD. AN, SSSR, 1957.
22. Hakimov H.R. - O nekotorych osnovach usoveršenstvovanija sposoba iskustvennogo zamoroživanja gruntov, - Iskustvennyje osnovanija sooruženij, Gosstrojizdat, Moskva 1959, str. 5-13.
23. Hausen - Darstellung des Waermeueberganges in Rohren durch verallgemeinerte Potenzbeziehungen - Z: VDI Beihefte Verfahrenstechnik 1943. 4.4. str. 91-98.
24. Janicot R. - Etude termique des murs en regime variable par l' analogie hydraulique. Revue des materiaux de construction et de travaux publics, 1963, str. 574-576.
25. Jessberger H.L., Nussbaumer M. - Einfluss von Zeit und Temperatur auf die Bemessung von Konstruktionen aus gefrorenem Lockergestein - Bergbauwissenschaften 8/1970/, str. 299.
26. Kartoziya B.A. - O metodach rasčeta toščiny steny ledogrunтого ograždenija, Šachtnoe Stroitel'stvo 1968, nr 6.
27. Kuteteladze S.W. - Osnovy teorii teploobmena, Moskva - Leningrad 1957, Masgiz.
28. Kłeczek Z. - Stan naprężenia i odkształcenia zamrożonego górotworu w otoczeniu szybu jako funkcja czasu. - Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, Zeszyt 37, Kraków 1971.
29. Kokšeniov B.G. - Teoretičeskie osnovy rasčeta ischodnych veličin pri proektirowanii zamoroživanja porod na bolše glubiny. Trudy Ukr, MIOMSSa - 11 Kiev 1960.
30. Kostrz J. - Głębienie szybów metodami specjalnymi, Katowice, 1964.

31. Ljberman J.M. - Metodika rasčeta tolščiny stenki ledoporodnogo cilindra, - Akad.Nauk SSSR, Institut Gornogo Dola, Moskva 1960.
32. Litvin A.Z., Dolgov O.H., Prozorov L.B. - Rezultaty zamoroživanja porod v Jakovlevskim opytnom rajone KMA.
33. Machowski M., Trutwin W. - Próba okrešlenia prędkości fali ultradźwiękowej w próbach skał zawodnionych w różnych temperaturach, Archiwum Górnictwa, t. XI, 1966, str. 365.
34. Man'kovskij G.I., Dolgov O.A., Jersev N.N. - Nomogramy dla rasčeta zamoroživanja gornych porod. IGD im. A.A. Skocyn'skogo, Moskva 1963.
35. Man'kovskij G.I. - Sooruženie stvolov šacht specijalnymi metodami, Moskva 1965.
36. Man'kovskij G.I., Dolgov O.A., Unkovskaja N.F. - Primenenije metodov gidravličeskich i elektrogidrodinamičeskich analogii dla rešenija zadač zamoroživanja gornych porod i upravljenija rezimom podzemnyh vod IGDAN, Moskva 1962.
37. Mohr F. - Grundlagen der Berechnung des Ausbaues von Schächten unter besonderer Beruecksichtigung von Gefrierschächten, Bergbau - Archiv., Essen, 1946.
38. Mueller G. - Ultraschallmessungen zur Ueberwachung des Frostkoepers an Gefrierschächten, Gluckauf, 1962, nr 7, str. 381-387.
39. Nusselt - Die Abhaengigkeit der Waermeuebergangszahl von der Rohrlange - Z: VDI - 54/1910 str. 1154-1158.
40. Proskurjakov B.W. - Teplovyj rasčet zamoroživajuščej skvažiny v filtracjonnom grunte. Izv. WNIIG im. B.E. Vedeneva, t. 45, str. 3-16.

41. Posytek E. - Investigations into the processes of ground freezing and defreezing in shaft construction, Central Mining Institute, Annual Report 1966-1967.
42. Posytek E. - Wyznaczanie granic płaszcza mroźniowego wokół szybu na podstawie pomiarów temperatur w strefie zamrożonej, Przegląd Górniczy nr 1/1972 str. 7-11.
43. Posytek E. - Prognozowanie procesów zamrażania i rozmrażania skał w budownictwie górniczym, Zeszyty Naukowe AGH nr 36, Kraków 1972, str. 285-300.
44. Posytek E. - Analiza przebiegu zamrażania górotworu w warunkach Rybnickiego Okręgu Węglowego - Budownictwo Górnicze nr 1/1971, str.1-4.
45. Posytek E. Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości - Praca habilitacyjna, Wydawnictwo - Prace naukowo-badawcze ZBiD-BG - Mysłowice 1973.
46. Posytek E., Jeleński A. - Określanie przebiegu zamrażania górotworu w budownictwie szybowym metodą analogii hydraulicznych - Prace GIG, Komunikat nr 467, Katowice 1969.
47. Sałustowicz A. - Deformacje zamrożonego górotworu w świetle reologii - Zeszyty Naukowe AGH nr 11a/1967.
48. Sałustowicz A. - Ciśnienie zamrożonego górotworu na obudowę głębionego szybu i jego zmiany po odmrożeniu - Projekty - Problemy nr 9/1964.
49. Sałustowicz A. - Obliczanie grubości płaszcza mroźniowego przy głębieniu szybów. Przegląd Górniczy nr 12/1965 str. 504-507.
50. Schenk, Dumore - Heat transfer in laminar flow through cylindrical tubes App.Scien, Descarch, 4/1954, str. 39-51.
51. Šparber P.A. - Zamrażanie porod na bolše głubiny - Ugol' Ukrainy nr 7/1964, str. 22-25.



52. Staender W. - Die Frostausbreitungevorgaenge bei Gefriergruendungen, insbesondere in Hinblick auf den Schachtbau, Karlsruhe, 1960, /Verceffentlichungen des Instituts fuer Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Friedericiana in Karlsruhe/.
53. Staender W. - Betrachtungen ueber den Einfluss der Temperaturverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung bei Gefrierschaechten, Karlsruhe, 1961, /Verceffentlichungen des Instituts fuer Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe, H.G./.
54. Staender W. - Die Verbesserung der Gefriertechnik im Schachtbau auf wissenschaftlicher Grundlage. VDJ - Zeitschrift - Bd.108/1966/, nr 4 str.117-121, nr 5 str. 171-175.
55. Staender W. - Methematische Ansaetze zur Berechnung der Frostausbreitung in ruhendem Grundwasser im Vergleich zu Modelluntersuchungen fuer verschiedens Gefrierrohranordnungen im Schacht und Grundbau, Karlsruhe, 1967 /Veroeffentlichungen des Institute fuer Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe - H.28/.
56. Staniszewski B., - "Wymiana ciepła - podstawy teoretyczne", PWN Warszawa 1963.
57. Stepanova E.M., - Rasčet srednej pročnosti zamorožennych porod s pomoščju elektronnych cifrovych mašin v zavisimosti ot schemy i temperatury zamoroživanja, Institut Gornogo Dela im. A.A. Skocyńskogo, Moskva 1966.
58. Šparber P.A., Kolesnikov A.V., - Rezultaty opytnogo zamoroživanja na učastke Jakovlevskogo Rudnika KMA - Trudy WNIOMSS-16 - Nedra - Moskva 1965.
59. Strzelecki Z., - Określenie dorażnej wytrzymałości na ściskanie  $/R_c/$  i ścinanie  $/R_t/$  skał ilastych,plastycznych i płynnych w róż-nych temperaturach od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $-35^{\circ}\text{C}$  - maszynopis - AGH - Kraków, kwiecień 1966.

60. Strzelecki Z. - Parametry wytrzymałościowe zawodnionych piasków kwarcowych. Przegląd Górniczy, 1962, nr 7-8.
61. Strzelecki Z., Trutwin W. - Określenie termicznych własności zamrożonych skał. Temperatura zamarzania skał zawodnionych, Prace AGH, 1965, maszynopis.
62. Trupak N.G. - Zamoroživanje gornych porod pri prohodke stvolov. Ugletechizdat, Moskva 1954.
63. Trupak N.G. - Methoden zur Berechnung der Wanddioke von Frostzylindern. - Symposium Schachtabteufen und Injektionstechnik - Freiberg 1972 str.7-18 VEB Mansfeld Kombinat 3/1972.
64. Trupak N.G. - O primeneni metoda Lame' - Gadolina dla rasčeta toščiny sten ledogruntovogo ogradždenija šachtnych stvolov. Šachtnoe Stroitel'stvo nr 7/1967.
65. Trupak N.G. - Opredelenie toščiny steny cilindričeskogo uprugo-plastičnogo ledogruntovogo ogradždenija - Šachtnoe Stroitel'stvo nr 5, 1968, str. 3-9.
66. Velden H.A., Schaeffers W.J. - Das Berechnen der notwendigen Kaelteleistung beim Abteufen von Gefrierschaechten. Glückauf 1959, nr 20, str. 1237-1244.
67. Vajpolin A.F., Cybulski W.A. - Prochodka šacht specijalnymi sposobami. Metalurgizdat, Sverdlovsk, 1967.
68. Valbrecker W. - Versuche und Studien ueber das Gefrierverfahren - Glückauf 46 /1910/ str.1681/81,1717/21,1757/64.
69. Walewski J. - Zasady projektowania kopalń, cz.V. Projektowanie szybów i szybików. Katowice 1965.

## Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości

### S T R E S Z C Z E N I E

W celu poznania rzeczywistego przebiegu procesu zamrażania górotworu do większych głębokości przeprowadzono badania modelowe metodą analogii hydraulicznych dla dwóch szybów o głębokości zamrażania 400 m i 430 m zlokalizowanych w różnych rejonach górniczych. Wyniki badań skorygowano na podstawie pomiarów temperatur "in situ" podczas drążenia szybów. W wyniku przeprowadzonych badań określono szybkość przebiegu procesu zamrażania w poszczególnych warstwach skał w funkcji czasu zamrażania i głębokości zalegania.

Wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że przy dotychczas stosowanych wartościach parametrów procesu zamrażania górotworu teoretyczna głębokość zamrażania wynosi 700 + 800 m a praktyczna 400 + 500 m.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano zasady i sposób optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości. Proponowany sposób optymalizacji parametrów otworu mroźniowego, instalacji mroźniowej i płaszcza zamrożonych skał umożliwia w obecnych warunkach technicznych zwiększenie zakresu drążenia szybów metodą zamrażania górotworu co najmniej do głębokości 1000 m.



Изучение оптимизации параметров процесса замораживания  
на большие глубины

Р Е З У М Е

С целью определения действительного течения процесса замораживания горных пород на большие глубины проведены модельные исследования методом гидравлических аналогий для двух шахтных стволов с глубиной замораживания 400 м и 430 м расположенных в разных горных районах. Результаты лабораторных исследований скорректированы на основании измерений температур замороженных пород "in situ" во время углубки стволов.

В результате исследования определена скорость замораживания в отдельных слоях пород в функции времени замораживания и глубины залегания.

Результаты исследований показали, что для применяемых до сих пор числовых значений параметров процесса замораживания горных пород теоретическая глубина замораживания равна 700+800 м а практическая 400+500 м.

На основании сделанных исследований разработаны принципы и способ оптимизации параметров процесса замораживания горных пород на большие глубины.

Представленный способ оптимизации параметров замораживающей колонки, холодильного оборудования и ледопородного даёт возможность в современных технических условиях увеличить глубину замораживания горных пород и проходки шахтных стволов этим способом на глубину до 1000 м.

Study of optimization the parameters of the underground  
rock freezing process to a great depth

S U M M A R Y

For determination the real course of the underground freezing process to a greater depth there was made model testings with the hydraulic analogy method for two shafts situated in two different mining areas with the refrigeration in depth 400 m and 430 m. The results of testings was corrected on the base of temperature measurement "in situ" while shaft sinking. As the result these testings there was defined the velocity of the freezing process in the particular rock strata in dependence of the time of refrigeration and the depth of deposition of strata.

The effects of examinations proved that the theoretical depth of refrigeration was 700 + 800 m and the practical one 400 + 500 m under parameters of the underground freezing process they have used up to the present. On the base of experiments there was scientifically described the principles and the method optimization of parameters of the underground freezing process to a great depth. The proposed manner optimization of parameters freezing hole, refrigeration's installation and the ring freezing rocks would render to increase the range of shaft sinking with the underground rock freezing method in depth 1000 m at least.



## ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICTWO
- H. HUTNICTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- JO. JĘZYKI OBCE
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
- M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE
- O. ORGANIZACJA

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty  
serii G:

Górnictwo z. 1, 1956 r., s. 134, zł 20,—	Górnictwo z. 30, 1968 r., s. 237, zł 14,—
Górnictwo z. 2, 1959 r., s. 96, zł 17,10	Górnictwo z. 31, 1968 r., s. 119, zł 8,—
Górnictwo z. 3, 1961 r., s. 130, zł 21,—	Górnictwo z. 32, 1968 r., s. 97, zł 6,—
Górnictwo z. 4, 1962 r., s. 134, zł 10,95	Górnictwo z. 33, 1968 r., s. 113, zł 6,—
Górnictwo z. 5, 1963 r., s. 158, zł 11,90	Górnictwo z. 34, 1968 r., s. 111, zł 7,—
Górnictwo z. 6, 1963 r., s. 154, zł 8,50	Górnictwo z. 35, 1968 r., s. 143.
Górnictwo z. 7, 1963 r., s. 129, zł 6,80	Górnictwo z. 36, 1969 r., s. 243, zł 13,50
Górnictwo z. 8, 1964 r., s. 175, zł 10,20	Górnictwo z. 37, 1969 r., s. 234, zł 14,—
Górnictwo z. 9, 1964 r., s. 133, zł 10,50	Górnictwo z. 38, 1969 r., s. 167, zł 10,—
Górnictwo z. 10, 1964 r., s. 157, zł 8,75	Górnictwo z. 39, 1969 r., s. 76, zł 4,50
Górnictwo z. 11, 1964 r., s. 221, zł 13,10	Górnictwo z. 40, 1969 r., s. 107, zł 7,—
Górnictwo z. 12, 1964 r., s. 304, zł 15,20	Górnictwo z. 41, 1969 r., s. 642, zł 42,—
Górnictwo z. 13, 1965 r., s. 145, zł 8,40	Górnictwo z. 42, 1970 r., s. 84, zł 5,—
Górnictwo z. 14, 1965 r., s. 78, zł 5,—	Górnictwo z. 43, 1970 r., s. 58, zł 5,—
Górnictwo z. 15, 1966 r., s. 79, zł 5,—	Górnictwo z. 44, 1971 r., s. 199, zł 16,50
Górnictwo z. 16, 1966 r., s. 91, zł 7,—	Górnictwo z. 45, 1971 r., s. 73, zł 5,—
Górnictwo z. 17, 1966 r., s. 113, zł 8,—	Górnictwo z. 46, 1971 r., s. 63, zł 4,50
Górnictwo z. 18, 1966 r., s. 291, zł 16,—	Górnictwo z. 47, 1971 r., s. 67, zł 6,—
Górnictwo z. 19, 1966 r., s. 150, zł 11,—	Górnictwo z. 48, 1972 r., s. 198, zł 15,—
Górnictwo z. 20, 1966 r., s. 84, zł 5,—	Górnictwo z. 49, 1972 r., s. 206, zł 16,—
Górnictwo z. 21, 1967 r., s. 270, zł 17,—	Górnictwo z. 50, 1971 r., s. 148, zł 10,—
Górnictwo z. 22, 1967 r., s. 196, zł 12,—	Górnictwo z. 51, 1972 r., s. 60, zł 5,—
Górnictwo z. 23, 1967 r., s. 69, zł 4,—	Górnictwo z. 52, 1972 r., s. 526, zł 39,—
Górnictwo z. 25, 1967 r., s. 96, zł 5,—	Górnictwo z. 53, 1972 r., s. 140, zł 9,—
Górnictwo z. 26, 1968 r., s. 137, zł 10,—	Górnictwo z. 54, 1973 r., s. 172, zł 12,—
Górnictwo z. 27, 1967 r., s. 378, zł 24,—	Górnictwo z. 55, 1973 r., s. 210, zł 15,—
Górnictwo z. 28, 1968 r., s. 185, zł 11,—	Górnictwo z. 57, 1973 r., s. 64, zł 5,—
Górnictwo z. 29, 1968 r., s. 161, zł 9,—	Górnictwo z. 58, 1974 r., s. 178, zł 13,—



Cena zł 5,—