

ZAGADNIENIE SZTUCZNEGO ZAMRAŻANIA ZAWODNIONYCH GRUNTÓW ZA POMOCĄ ROZPRĘŻONEGO POWIETRZA

PRY wykonywaniu szybów, komór, przekopów i tuneli napotyka się niekiedy na grunty zawodnione, niejednokrotnie uniemożliwiające prowadzenie robót górniczych zwykłymi sposobami. Jedną z metod pokonywania tych trudności jest zamrażanie zawodnionego gruntu. Do tego celu używa się obecnie, w technice osadzanych w otworach wiertniczych kolumn mroźniowych oziębianych solanką (roztworem CaCl_2) o temperaturze ok. -25°C . Kolumna mroźniowa składa się z zamkniętej od dołu rury mroźniowej o średnicy ok. 100 mm i długości nieco przekraczającej głębokość warstwy wodonośnej, wewnątrz której umieszczona jest prawie sięgająca do dna węższa rura o średnicy ok. 30 mm, tzw. rura zasilająca, doprowadzająca oziębioną solankę do rury

mroźniowej. Kolumny mroźniowe w ilości ok. 30 zespołów rozmieszcza się równomiernie na okręgu koła o średnicy 7 — 15 m. Mają one za zadanie utworzenie w zawodnionym gruncie płaszcza lodowo-gruntowego o odpowiedniej wytrzymałości, wewnątrz którego można bezpiecznie prowadzić roboty górnicze i stawiać obudowę. Osobne urządzenia połączone specjalnymi rurociągami z kolumnami mroźniowymi służą do stałego podziębienia solanki i jej przetłaczania. Instalacja i praca takiego zestawu jest nadzwyczaj kosztowna.

W poszukiwaniu bardziej ekonomicznej metody sztucznego zamrażania gruntu Zakład Geologii Technicznej Instytutu Geologicznego w Warszawie przy

współdziałale Stacji Niskich Temperatur Zakładu Chemii Nieorganicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie podjął badania zmierzające do opracowania nowej metody zamrażania gruntu, polegającej na zastosowaniu innego niż solanka środka oziębiającego, a mianowicie na wykorzystaniu zjawiska spadku temperatury w czasie rozprężania się powietrza.

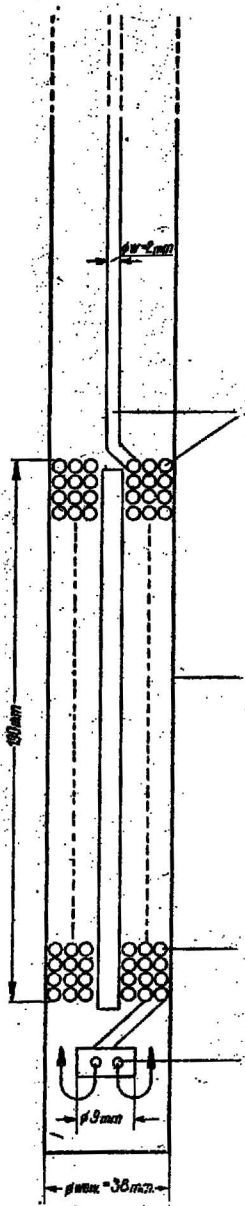
Z doświadczeń Joule'a i Thomsona wynika, że gaz rzeczywisty poddany rozprężaniu oziębia się. Spadek temperatury rozprężonego gazu można obliczyć ze wzoru Vogela.

$$dT = (0,268 - 0,00086 P) \cdot \left(\frac{273}{T}\right)^2 \cdot dP$$

Np. rozprężając powietrze o temperaturze początkowej 0°C i będące pod ciśnieniem 50, 100, 200 atm. do stanu ciśnienia równego 1 atm., można uzyskać spadek temperatury równy odpowiednio 13,5°, 25,6°, 44,8°C. Jeżeli zaś zastosuje się jeszcze urządzenie działające na zasadzie przeciwprądu, w szybkim czasie można osiągnąć temperaturę bardzo niską.

Urządzenie przeciwprądowe (ryc. 1) w danym przypadku polega na tym, że powietrze sprężone np. do 200 atm. doprowadza się wąską, spiralnie skręconą rurką miedzianą (a) do wylotu ekspansyjnego (b). Powietrze wydostając się przez małe otworki, rozpręża się i tym samym oziębia się. Jeżeli wylot ekspansyjny wraz ze spiralą umieścić w rurze (c) zamkniętej od strony wylotu ekspansyjnego, wówczas oziębiony gaz wędruje wzdłuż spirali ochładzając w niej sprężone powietrze. To z kolei rozprężając się, oziębia się jeszcze bardziej itd. W przypadku gdy rura (c) będzie otoczona izolacją cieplną (np. naczynie Dewara), można w ciągu ok. 3 min. doprowadzić do skroplenia powietrza, tj. uzyskać temperaturę -185°C.

Przedstawioną zasadę urządzenia przeciwprądowego można zastosować również w celach zamrażania zawodniomych gruntów. Przewód doprowadzający sprężone powietrze do spirali zakończonej jednym lub kilkoma wylotami ekspansyjnymi umieszcza się odpowiednio w rurze mroźniowej. Rozprężone a tym samym oziębione powietrze pobiera pewną część ciepła zarówno od gruntu otaczającego rurę mroźniową, jak i od doprowadzanego sprężonego powietrza. Przy różnicy ciśnień równej 200 atm. temperatura rozprężonego powietrza spada początkowo gwałtownie, później w miarę oziębiania się otoczenia coraz wolniej, teoretycznie aż do -185°C, tj. do temperatury skraplania powietrza. W praktyce dopro-

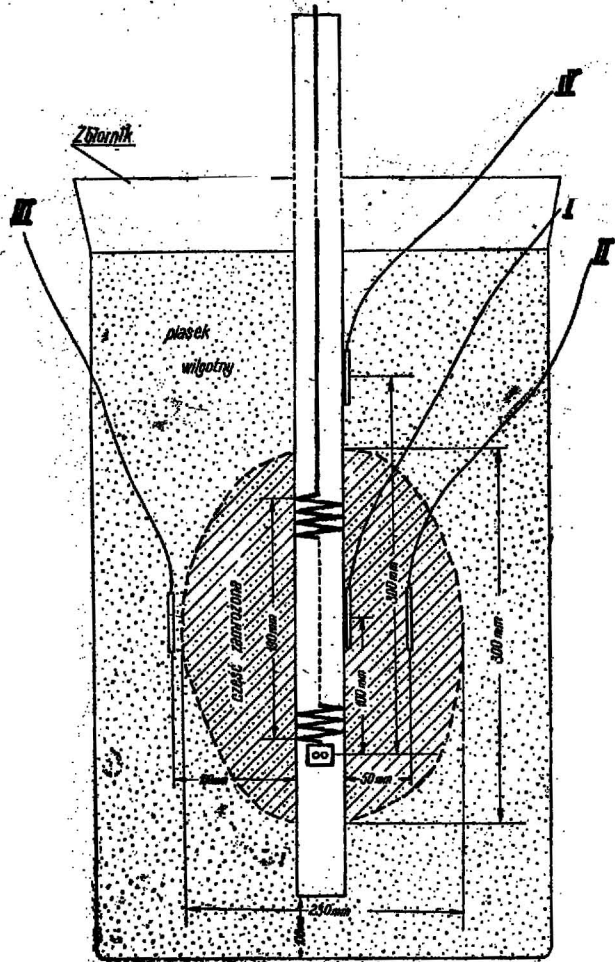


Ryc. 1. Schemat urządzenia przeciwprądowego.
a — rurka miedziana, wysokociśnieniowa;
b — wylot ekspansyjny;
c — rura zewnętrzna, mroźniowa.

wadzenie w miejscu ekspansji do tak niskiej temperatury zapewne nie będzie potrzebne.

Zjawiska ciepłe zachodzące w tego rodzaju urządzeniu przeciwprądowym zastosowanym do zamrażania zawodniomych gruntów, jak również i w samym zawodniomym gruncie są skomplikowane i o ile nam wiadomo, nie były dotychczas badane doświadczalnie. Wszelkie teoretyczne obliczenia ze względu na konieczność wprowadzenia szeregu założeń upraszczających są przybliżone i mogą mieć charakter jedynie orientacyjny. Dlatego też w celu uzyskania bardziej wiarygodnych danych wykonano model kolumny mroźniowej i przeprowadzono na nim kilka wstępnych doświadczeń. Przebieg jednego z tych doświadczeń przedstawiono poniżej.

Do rury mosiężnej o średnicy zewnętrznej 40 mm, wewnętrznej 38 mm i długości 120 cm wprowadzono spiralę wykonaną z rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 3 mm i wewnętrznej 2 mm i przedstawiającą cylinder o wysokości 19 cm. W dolnej swej części spirala zakończona jest dyszą ekspansyjną wykonaną w postaci cylinderka o średnicy 9 mm wyposażonego w 6 otworków o średnicy 1,5 mm. Górna część spirali połączona jest rurką miedzianą (poprzez wylot rury mroźniowej) z kompresorem o wydajności ok. 15 m³ na godz. i ciśnieniu końcowym równym 220 atm.



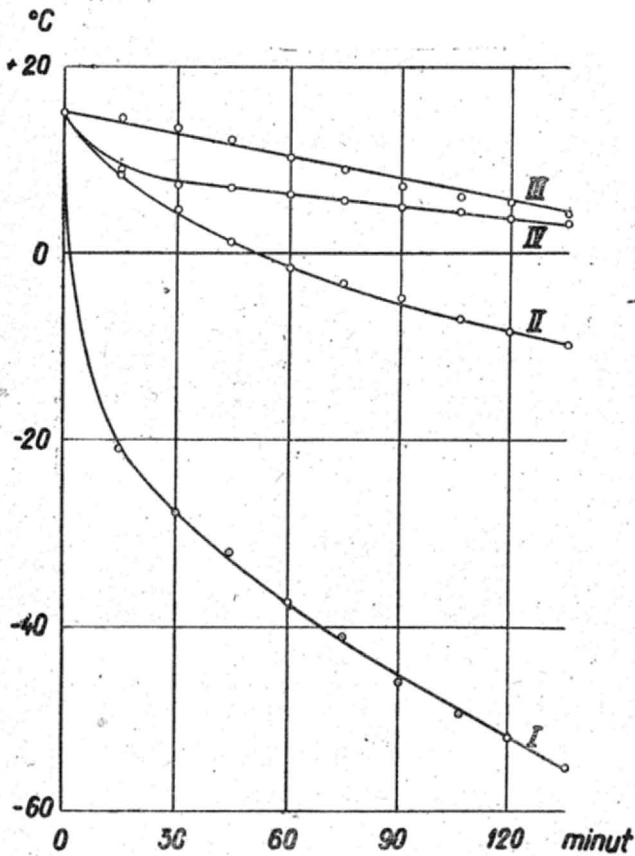
Ryc. 2. Schemat rozmieszczenia termometrów oporowych. Linia kreskowana przedstawia wielkość otrzymanej, zamrożonej bryły.

To urządzenie przeciwprądowe umieszczono w dolnej zamkniętej części rury mroźniowej tak, że odległość punktu ekspansyjnego od jej dna wynosiła 13 cm. Następnie kolumnę mroźniową osadzono w zbiorniku z wilgotnym płaskim w ten sposób, że

ległości 10 cm od dna zbiornika, górna część natomiast 15 cm ponad powierzchnią piasku.

W celu umożliwienia obserwacji spadku temperatury zainstalowano w różnych miejscach 4 termometry elektryczne oporowe, a mianowicie: jeden przy zewnętrznej ścianie rury mroźniowej w odległości 10 cm powyżej dyszy ekspansyjnej, drugi i trzeci na tej samej wysokości w odległości 5 i 10 cm od ściany rury mroźniowej i czwarty przy ścianie rury mroźniowej na wysokości 30 cm od dyszy ekspansyjnej (ryc. 2). Górna część rury mroźniowej nakryto wieczkiem z trzema otworami. Przez jeden z nich biegła rurka miedziana doprowadzająca sprężone powietrze, drugi służył do odprowadzenia powietrza na zewnątrz poprzez zwężkę Venturiego służącą do pomiaru szybkości przepływu rozprężonego powietrza, do trzeciego zaś wprowadzono termometr rtęciowy mający na celu pomiar temperatury powietrza na wylocie rury mroźniowej.

W chwili rozpoczęcia doświadczenia temperatura piasku wynosiła 15°C, a powietrza 20°C. Ciśnienie w spirali przeciwprądowej utrzymywano przez cały czas trwania doświadczenia na wysokości 160 atm. Zamrażanie rozpoczęło o godz. 11, przerwano o godz. 13,15. Temperatury odczytywano na termometrze nr I co 5 minut, na termometrach nr II, III, i IV co 15 minut. Wyniki pomiarów zostały ujęte na ryc. 3.

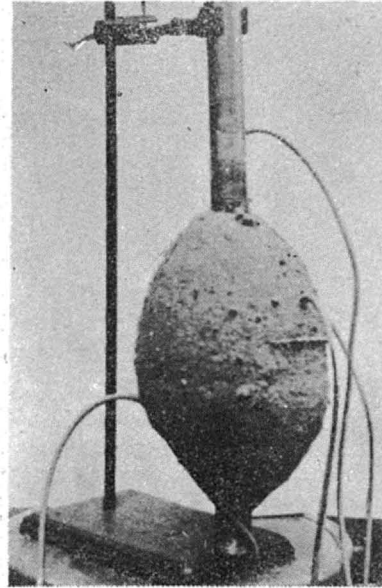


Ryc. 3. Krzywe zmian temperatury w zależności od czasu trwania doświadczenia. Wykresy I, II, III i IV odnoszą się do pomiarów wykonanych odpowiednio na termometrach nr I, II, III i IV.

Z wykresów tych można odczytać, że po upływie 135 minut temperatura przy ścianie rury mroźniowej na wysokości 10 cm powyżej punktu ekspansyjnego wynosiła -53°C , na tej samej wysokości w odległości 5 cm od ściany rury -10°C , w odległości

10 cm $+30^{\circ}\text{C}$ i przy ścianie rury mroźniowej 30 cm powyżej punktu ekspansyjnego $+4^{\circ}\text{C}$. Temperatura u wylotu rury mroźniowej wynosiła przez cały czas trwania doświadczenia $+15^{\circ}\text{C}$. Świadczy to o tym, że cała ilość „zimna“ wyprodukowana wewnątrz rury mroźniowej została odprowadzona do gruntu.

Po przerwaniu doświadczenia opróżniono zbiornik i wyjęto kolumnę mroźniową z przyłączoną w dolnej części bryłą zamrożonego piasku. Bryła ta w kształcie elipsoidy miała długość 30 cm i średnicę 23 cm. Charakterystyczny kształt zamrożonej bryły wskazuje na to, że zależnie od konstrukcji urządzenia przeciwprądowego oraz położenia dyszy ekspansyjnej wewnątrz rury mroźniowej można będzie uzyskiwać „punktowe“ zamrożenie zawadzonego gruntu w dowolnym miejscu, będącym w zasięgu rury mroźniowej.



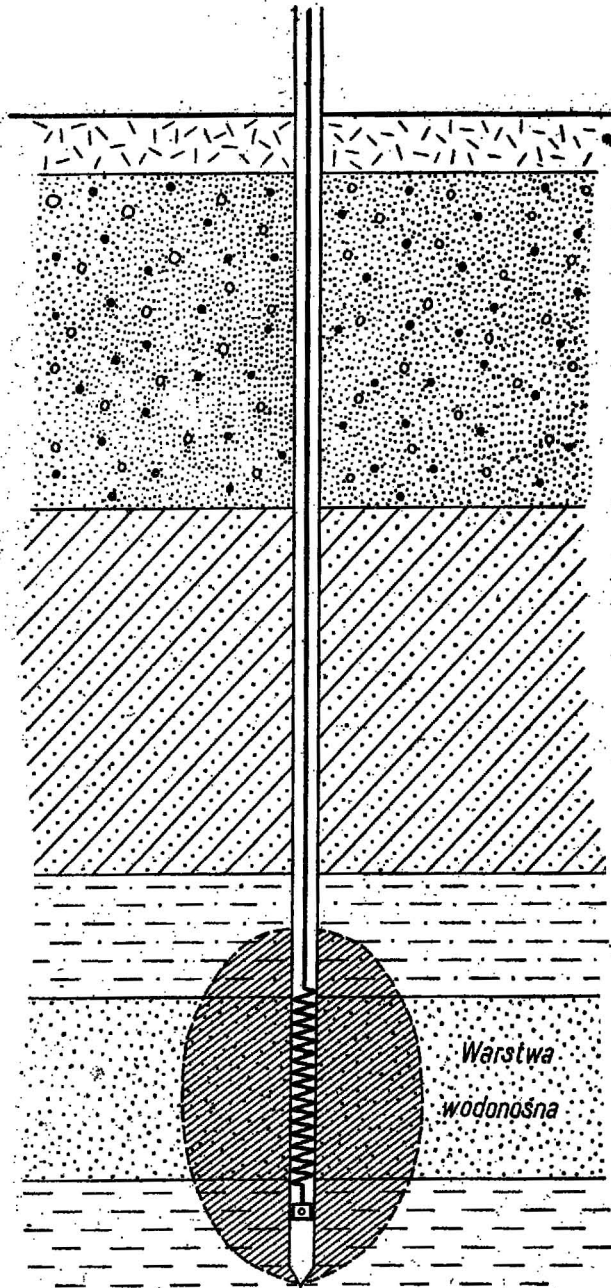
Ryc. 4. Bryła wilgotnego piasku przymarzniona do dolnej części kolumny mroźniowej (linie przerywane). Na zdjęciu widoczne są przewody od termometrów elektrycznych.

Z ekonomicznego punktu widzenia jest to zjawisko bardzo korzystne. A mianowicie w dotychczasowej praktyce mrożenia zawadzonego gruntu przy budowie szybu zamraża się całą serię warstw skalnych, sięgającą od samej powierzchni terenu aż do najniższej położonych warstw zawadzionych. Uzyskanie wymiany ciepła w zgóry określonym miejscu w kolumnach mroźniowych oziębianych solanką jest trudnym problemem do rozwiązania pod względem technicznym. Dlatego też najczęściej ziębi się grunt wzdłuż całej kolumny mroźniowej i niepotrzebnie wyprowadza się z mas skalnych olbrzymie ilości ciepła.

Przy zastosowaniu rozprężanego powietrza jako środka oziębiającego możliwe będzie skonstruowanie takiego urządzenia przeciwprądowego o odpowiednio dobranym ciśnieniu i odpowiedniej szybkości przepływu powietrza, że wymiana ciepła odbywać się będzie na krótszym lub dłuższym odcinku w dowolnym miejscu rury mroźniowej. Pozwoli to na zamrożenie tylko warstwy wodonośnej wraz z częścią warstw stropowych i spągowych w takim stopniu, w jakim mogą tego wymagać warunki hydrogeologiczne i wytrzymałościowe skał. W ten sposób można będzie uzyskać caliznę lodową tylko w tej części głębionego szybu, w której warunki wodne nie zezwalają na prowadzenie robót górniczych.

Ekonomiczną analizę użycia rozprężanego powietrza jako środka oziębiającego będzie można przedstawić po teoretycznym i doświadczalnym zbadaniu szeregu zagadnień związanych z wymianą ciepła, wytrzymałością gruntu w niskich temperaturach, pracą sprężarek itp. Ale już w tej chwili, biorąc tylko pod uwagę możliwość miejscowego zamrażania, należy się spodziewać uzyskania dużych oszczędności

zarówno pod względem wkładu pracy, jak i czasu trwania mrożenia. A mianowicie, na wyprowadzenie tej ilości ciepła, którą odebrano z zamrażanego piasku w opisanym doświadczeniu, w przypadku użycia solanki jako środka oziębiającego oraz przy założeniu, że wymiana ciepła następuje na długości 30 cm rury mrożeniowej, potrzeba ok. 80 godz. Proces mrożenia nową metodą może być więc dokonany blisko 40 razy szybciej.



ic. 5. Przekrój przez pierścień lodowo-gruntowy uzyskany w żądanym miejscu górotworu.

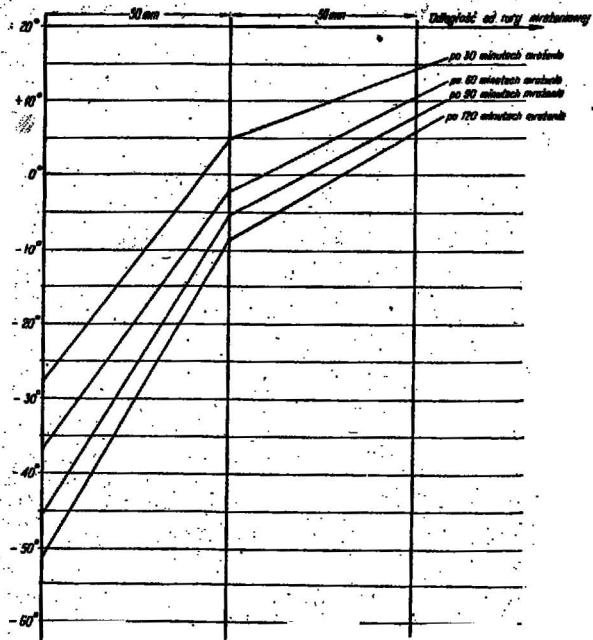
Wielkość aktywnej powierzchni rury mrożeniowej, służącej rolę wymiennika ciepła, jak również stała i prędkość rozchodzenia się powierzchni izotermicznych wokół rury mrożeniowej zależą przede wszystkim od:

- 1) długości i technicznego rozwiązania urządzenia przeciwpłądowego,
- 2) ilości i punktów rozmieszczenia dysz ekspansyjnych,

- 3) szybkości przepływu rozprężonego powietrza,
- 4) różnicy ciśnień powietrza przed i po rozprężeniu.

Przez zaprojektowanie więc odpowiedniej konstrukcji urządzenia przeciwpłądowego oraz dobierając odpowiednio ciśnienia można będzie w pewnych granicach wywierać wpływ na umiejscowienie i przebieg procesu zamrażania i do pewnego stopnia dość łatwo tym procesem kierować.

Przebieg temperatury w gruncie wokół rury mrożeniowej



Powietrze ma stosunkowo małe ciepło właściwe ($c_p = 0,25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$), a zatem w kolumnach mrożeniowych będą musiały przepływać duże ilości powietrza. Zachodzi teraz pytanie, czy technicznie zagadnienie to będzie możliwe do zrealizowania na skalę przemysłową?

Przy założeniu, że rozprężane od 200 do 1 atm. i wskutek tego oziębione powietrze pozostawi całą ilość „zimna” w otaczającym kolumnę mrożeniową gruncie oraz że różnica temperatur powietrza rozprężonego, na odcinku mrożenia, wyniesie średnio 100°C , wówczas na wyprowadzenie $6 \cdot 10^8 \text{ kcal}$ zużyje się $186\,000 \text{ m}^3$ powietrza o temp. 0°C i pod ciśnieniem 1 atm. ($6 \cdot 10^8 \text{ kcal}$ jest to ilość ciepła, którą należy odprowadzić, aby zamrozić cylinder wilgotnego gruntu o średnicy zewn. 8 m, wewn. 6 m i wysokości 10 m od temperatury $+7$ do -10°C).

Stosując zasady teorii podobieństwa odnoszące się do zjawisk hydrodynamicznych oraz konwekcyjnej wymiany ciepła obliczamy (stosując szereg założeń upraszczających), że średnia prędkość liniowa powietrza w rurach mrożeniowych o średnicy 0,1 m powinna wynosić zależnie od temperatury powietrza od 0,5 do 1 m/sek. W tych warunkach prędkość wazgowa wyniesie ok. 30 kg/godz., a prędkość objętościowa powietrza o temp. 0°C i ciśnieniu 1 atm. wyniesie ok. $23 \text{ m}^3/\text{godz}$. Stąd zapotrzebowanie powietrza dla 30 rur mrożeniowych wynosi $690 \text{ m}^3/\text{godz}$.

Centralny Zarząd Gospodarki Maszynami podaje w Katalogu Sprężarek nr 282 (Warszawa 1954) na str. 47 i 48 opisy będących w handlu sprężarek Serii 5L — produkcji EKM — NRD. Sprężarki Serii 5L dają ciśnienie końcowe 270 atm. i wydajność: typ 5L30 — $270 \text{ m}^3/\text{godz}$, 5L35 — $380 \text{ m}^3/\text{godz}$, 5L40 — $560 \text{ m}^3/\text{godz}$ i 5L45 — $825 \text{ m}^3/\text{godz}$. Jak z zestawienia

tęgo wyniku, typ 5L40, a w każdym razie typ 5L45 jest wystarczający do obsługi jednego szybu.

Z przebiegu pokrótce opisanych, prowizorycznych wstępnych doświadczeń oraz z przedstawionego, orientacyjnego obliczenia wynika, że istnieje możliwość zastąpienia solanki jako środka oziębiającego przez rozprężane powietrze. Korzyści, jakich należy się tutaj spodziewać, są następujące:

1. Istnieje możliwość miejscowego zamrażania gruntu, w odróżnieniu od metody solankowej, w której jesteśmy zmuszeni do mrożenia warstw skalnych leżących nad warstwą wodonośną. Ma to szczególne znaczenie w przypadku konieczności przebijania szybu przez stosunkowo głęboko leżące warstwy wodonośne. Wynikające stąd oszczędności w wytwarzanej energii cieplnej „zimna“ są wprost proporcjonalne do głębokości występowania zamrażanej warstwy wodonośnej.

2. Czas trwania procesu mrożenia jest znacznie krótszy (do kilkudziesięciu razy), niż przy metodzie solankowej.

3. Ze względu na „produkcję zimna“ w rurach mroźniowych, a więc w miejscach jego zapotrzebo-

wania unika się strat zimna w urządzeniach chłodniczych oraz wzdłuż przewodu doprowadzającego solankę do kolumn mroźniowych.

4. Prawdopodobna wydaje się być możliwość zmniejszenia ilości kolumn mroźniowych, a tym samym skrócenia ogólnego metrażu kosztownych wierceń.

5. Odpadają poważne koszty budowy specjalnych urządzeń chłodniczych do oziębiania solanki.

6. Oziębione, suche powietrze nie oddziaływa chemicznie na rury mroźniowe, przy użyciu zaś solanki mogą one ulec korozji i przedziurawieniu.

7. Kolumny mroźniowe, oziębiane rozprężanym powietrzem, można wprowadzać do gruntu nie tylko pionowo, lecz również skośnie i poziomo, co może mieć znaczenie przy budowie tuneli lub wyrobisk pochyłych.

8. W przypadku większego stężenia soli mineralnych w wodzie gruntowej temperatura solanki może okazać się nie wystarczająco niska do utworzenia bariery lodowo-gruntowej o żądanej grubości. Stosując metodę rozprężanego powietrza można uzyskać temperaturę ścianki do -185°C .