

# METODY PRACY – RACJONALIZACJA POSTĘP TECHNICZNY

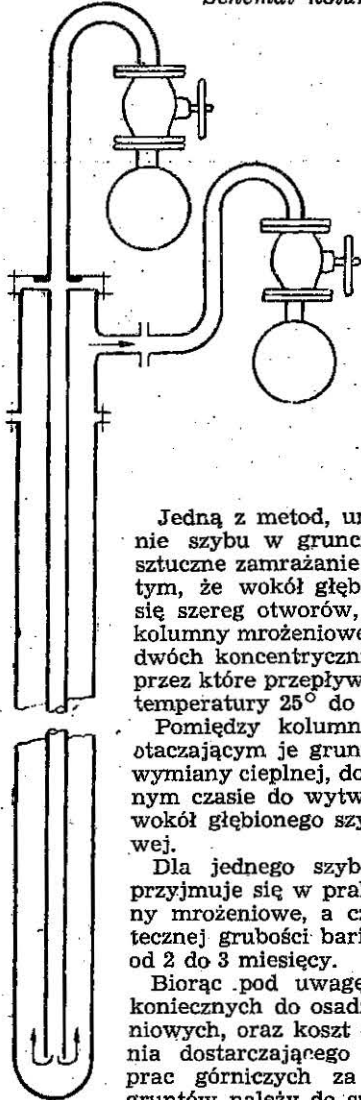
JAN CALIKOWSKI

## PROBLEM BADAŃ MODELOWYCH NAD SZTUCZNYM ZAMRAŻANIEM GRUNTÓW

Zawodnione grunty oraz warstwy wodonośne w stanie kurzawki stanowią poważną przeszkodę w budownictwie podziemnym i naziemnym. Szczególnie przy głębieniu szybów napotkanie warstwy wodonośnej decyduje niekiedy nie tylko o sposobie, ale nawet o możliwości prowadzenia dalszych prac górniczych. Istnieje jednak wiele metod umożliwiających odprowadzenie wody z terenu zawodnionego, jak również, gdy to jest niemożliwe, na prowadzenie prac w pierwotnych warunkach wodnych, czyli w gruncie zawodnionym.

O ilości wody, jaka może występować w gruncie zawodnionym, świadczą najlepiej dane, pochodzące z terenu budowy metra moskiewskiego, gdzie dopływ wody w niektórych szybach osiągał 2500 m<sup>3</sup>/godz., a normalnie wynosił od 600 do 700 m<sup>3</sup>/godz. Z podobnymi warunkami spotyka się niekiedy także i nasze budownictwo podziemne.

Ryc. 1  
Schemat kolumny mroźniowej.



Jedną z metod, umożliwiających głębienie szybu w gruncie zawodnionym, jest sztuczne zamrażanie gruntu. Polega ona na tym, że wokół głębionego szybu odwierca się szereg otworów, w których osadza się kolumny mroźniowe. Kolumny te to zespół dwóch koncentrycznie umieszczonych rur, przez które przepływa solanka ozięblona do temperatury 25° do 45°C (ryc. 1).

Pomiędzy kolumnami mroźniowymi a otaczającym je gruntem zachodzi zjawisko wymiany ciepłej, doprowadzające po pewnym czasie do wytworzenia się w gruncie wokół głębionego szybu tzw. bariery lodowej.

Dla jednego szybu o średnicy 10 mm przyjmuje się w praktyce około 32 kolumny mroźniowe, a czas uzyskania dostatecznej grubości bariery lodowej waha się od 2 do 3 miesięcy.

Biorąc pod uwagę dużą ilość wierceń, koniecznych do osadzenia kolumn mroźniowych, oraz koszt eksploatacji „urządzenia dostarczającego zimno”, prowadzenie prac górniczych za pomocą zamrażania gruntów należy do sposobów bardzo kosztownych.

Wytworzenie bariery lodowej wokół głębionego szybu ma za zadanie zrównoważenie ciśnienia wody gruntowej oraz ciśnienia napierającego gruntu. Dlatego też przy projektowaniu przebijania szybu metodą zamrażania wychodzi się zawsze od obliczeń wytrzymałościowych, które podają wymaganą grubość zamrożonego walca lodowego.

Wytrzymałość gruntu zawodnionego po zamrożeniu zależy od temperatury zamrażania i własności mechanicznych gruntu, tzn. od jego stopnia zawilgocenia i składu mechanicznego. Dane liczbowe charakteryzujące wytrzymałość gruntu po zamrożeniu są znane i ujęte w tablicach lub są możliwe do określenia najprostszymi metodami badań wytrzymałościowych.

Z założeniami wytrzymałościowymi bariery lodowej łączą się rozpatrywane następnie problemy, a to ilość kolumn mroźniowych, czas mrożenia oraz charakterystyka przebiegu procesów cieplnych w gruncie.

Biorąc pod uwagę wpływ czynników ubocznych (ilość i szybkość przepływającej wody oraz charakter gruntu) różnych dla każdego szybu, procesy cieplne zachodzące podczas zamrażania będą dla każdego z rozpatrywanych przypadków odmienne.

Proces zamrażania z punktu widzenia zachodzących w nim zjawisk cieplnych jest procesem bardzo skomplikowanym. Mamy tu do czynienia z niestacjonarną wymianą ciepła, czyli że w każdym punkcie zamrożonego gruntu następują zmiany temperatury, zależne od czasu mrożenia i zmian parametrów fizycznych zamrożonego gruntu.

Uchwycenie tego zjawiska na drodze obliczeń analitycznych przy założeniu warunków uproszczonych (usunięcie wpływu przepływającej wody gruntowej, przyjęcie stałych współczynników przewodzenia ciepła itd.) — jest trudne i nie nadaje się do praktycznego wykorzystania.

Przeprowadzanie bezpośrednich obserwacji i pomiarów na głębionym szybie w warunkach terenowych jest utrudnione i z powodu niemożności dokładnego śledzenia przebiegu procesu zamrożenia nie zawsze celowe.

Praktyka wykazuje, że ilość i rozmieszczenie kolumn mroźniowych, zależnie od procesów cieplnych zachodzących w czasie mrożenia, przyjmuje się dla większości prowadzonych robót jednakowo, nie uwzględniając zmian warunków hydrogeologicznych zachodzących w płonie głębionych szybów.

Dokładniejsze uchwycenie zależności przebiegu procesów cieplnych zachodzących w urządzeniu zamrażającym od warunków hydrogeologicznych umożliwiłoby prawdopodobnie bardziej korzystne rozmieszczenie kolumn mroźniowych, a tym samym zmniejszyłoby ich ilość, skróciłoby czas zamrażania i obniżyłoby związane z tym koszty. Zachodzi teraz pytanie, czy możliwe jest przeprowadzenie takich badań, które przyczyniając się do dokładniejszego poznania procesów zachodzących w gruncie podczas mrożenia umożliwiłyby jednocześnie uchwycenie wyżej wymienionych zależności.

Badania urządzeń cieplnych o skomplikowanych procesach termicznych prowadzone są w ostatnich latach na tzw. aparatach modelowych. Można się więc pokusić o zbudowanie podobnego aparatu badawczego w celu rozwiązania omawianego problemu. Budowa aparatów modelowych oparta jest na zasadach teorii podobieństwa, która ustala warunki przeprowadzenia doświadczenia, podobne do warunków rzeczywistych.

Teoria podobieństwa powstała w wyniku badań równań różniczkowych, analizy wymiarowej poszczególnych zjawisk ruchu płynu, a także poszczególnych procesów ruchu ciepla.

Po raz pierwszy pojęcie „podobieństwa“ pojawiło się w geometrii, skąd przyjęte zostało przez inne dziedziny nauki. Najprostszym przykładem podobieństwa jest podobieństwo geometryczne dwóch trójkątów, a mianowicie: dwa trójkąty są podobne, jeżeli odpowiadające sobie ich kąty są równe, a boki proporcjonalne. Istnieje więc dla trójkątów podobnych współczynnik proporcjonalności „c“, zwany inaczej stałą podobieństwa. Znając warunki podobieństwa dla trójkątów, można rozwiązać szereg zadań praktycznych jak np. obliczyć wysokość wieży, szerokość rzeki itd. Zasady podobieństwa mogą być również stosowane do dowolnych zjawisk fizycznych, z tym że konieczna jest znajomość podobieństwa badanych procesów. Uchwytone zjawiska dla układów podobnych mają te same wartości liczbowe. Są to tzw. niezmienniki lub liczby podobieństwa. Liczby podobieństwa są to układy bezwymiarowe, wielkości charakteryzujące zjawisko. Bezwymiarowość jest ich zasadniczą cechą, służy jako sprawdzian prawidłowości ich formy matematycznej i obliczenia. Liczby podobieństwa zostały oznaczone symbolami składającymi się z początkowych liter nazwisk uczonych pracujących w danej dziedzinie nauki. Np. liczby podobieństwa Newtona (Ne), Reynoldsa (Re), Eulera (Eu), Nusselta (Nu), Prandtla (Pr) itd.

Ponieważ zjawiska cieplne określone są układem równań mechanicznych i cieplnych, warunki podobieństwa określone są dla podobieństwa mechanicznego i cieplnego.

Liczby:

$$\text{równoczesności} \quad He = \left( \frac{w \cdot t}{l} \right)$$

$$\text{Frouda} \quad Fr = \left( \frac{w^2}{g \cdot l} \right)$$

$$\text{Reynoldsa} \quad Re = \left( \frac{g \cdot d}{\mu} \right)$$

$$\text{Eulera} \quad Eu = \left( \frac{p}{\gamma \cdot w^2} \right)$$

określają podobieństwo mechaniczne, a liczby

$$\text{Fouriera} \quad Fo = \left( \frac{a \cdot t}{l^2} \right)$$

$$\text{Pecleta} \quad Pe = \left( \frac{w \cdot d}{a} \right)$$

$$\text{Nusselta} \quad Nu = \left( \frac{a \cdot d}{\lambda} \right)$$

przedstawiają liczby podobieństwa cieplnego, gdzie

g — prędkość masowa kg/m<sup>2</sup> godz.

d — średnica m

μ — dynamiczny współczynnik lepkości kg/m godz.

p — ciśnienie kg/m<sup>2</sup>; kg/cm<sup>2</sup>

γ — gęstość kg/m<sup>3</sup>

w — prędkość liniowa m/godz.; m/sek.

l — długość m

a — współczynnik wyrównania temperatur m<sup>2</sup>/godz.

λ — współczynnik przewodzenia ciepła kcal/m godz. °C

Cp — ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu kcal/kg °C

t — czas, godz.; sek.

Teoria podobieństwa jest teorią opartą na doświadczeniach i dlatego ma duże zastosowanie przy badaniu praktycznym urządzeń cieplnych. Według tej teorii warunkiem koniecznym i wystarczającym do uzyskania podobieństwa między urządzeniem ciepl-

nym i jego modelem jest spełnienie następujących pięciu warunków podobieństwa:

- 1) podobieństwo geometryczne,
- 2) podobieństwo ruchu cieczy na wlocie,
- 3) podobieństwo parametrów fizycznych w odpowiadających sobie punktach urządzenia i jego modelu (stałość współczynników gęstości, lepkości itd.),
- 4) podobieństwa granicznych wartości pól temperatur,
- 5) identyczność wartości ustalających liczby podobieństwa Re i Pr przy wymuszonym ruchu cieczy.

Rozpatrzmy te warunki i możliwości uzyskania ich dla aparatu modelowego do badań nad zamrożeniem gruntów.

1. Podobieństwo geometryczne w odniesieniu do kolumny mrożeniowej uzyskujemy, stosując odpowiednią skalę np. 1:5. W tym stosunku zostaną zmniejszone wymiary średnie rur zewnętrznej i wewnętrznej w aparacie modelowym. Np. przyjmując, że w urządzeniu do zamrażania średnica rury zewnętrznej d = 100 mm, a średnica rury wewnętrznej urządzenia d = 25 mm, w modelu średnice tych rur będą wynosić odpowiednio d<sub>z</sub> = 20 mm a d<sub>w</sub> = 5 mm. Podobieństwo długości rur kolumny urządzenia do zamrażania i jego modelu nie musi być ściśle zachowane, jeżeli stosunek  $\frac{l}{d} > 50$  (Michtejew — Zasady wymiany ciepła). Można więc przyjąć długość kolumny mrożeniowej w modelu za dowolną np. 1100 mm. ( $\frac{1100}{20} > 50$ ). Nie jest możliwe zachowanie

całkowitego podobieństwa geometrycznego dla gruntu, gdyż grunt otaczający głębiony szyb nie jest ograniczony ściankami zbiornika, jak to bywa przy badaniach modelowych. Dlatego też masa gruntu w zbiorniku modelu powinna być taka, aby wpływ ciepła z zewnątrz na zamrażany grunt był najbardziej podobny do takiego, jaki jest w warunkach pracy urządzenia do zamrażania.

2. Podobieństwo warunków ruchu cieczy na wlocie kolumny mrożeniowej urządzenia i modelu można osiągnąć wykonując wlot rury o wymiarach i kształcie podobnym do wlotu kolumny mrożeniowej. W naszym przypadku wlot solanki modelu musi ulec pomniejszeniu w skali 1:5.

3. Warunek podobieństwa parametrów fizycznych w aparacie modelowym i urządzeniu do zamrażania zachowujemy, stosując w obu przypadkach jako medium oziębiające tę samą solankę oraz ten sam grunt.

4. Podobieństwo granicznych wartości pól temperatury w naszym aparacie modelowym jest spełnione, gdyż w modelu mamy badać ten sam materiał (zawodniony grunt) co i w urządzeniu do zamrażania. W przypadku badania przebiegu zjawisk zamrażania w gruncie z przepływającą wodą, można stosować tzw. przybliżoną metodę lokalnego podobieństwa cieplnego. Polega ona na tym, że podobieństwo pól temperatur zostaje zachowane tylko w tym miejscu, gdzie przeprowadzane są badania nad przenikaniem ciepła, a więc w bezpośrednim sąsiedztwie rury mrożeniowej i badanego gruntu. Należy przy tym zaznaczyć, że zachowuje się tylko warunki podobieństwa mechanicznego, tzn. że zachowuje się podobną szybkość przepływu solanki w urządzeniu i modelu oraz tę samą szybkość przepływu wody w gruncie badanym i w gruncie projektowanego szybu.

5. Identyczność wartości ustalonych liczb podobieństwa Re przy wymuszonym ruchu cieczy dla kolumny mrożeniowej urządzenia do zamrażania i modelu osiągnięte się zwiększając odpowiednio prędkość przepływu solanki w aparacie modelowej. Przy stosowaniu w modelu tej samej cieczy i o tej samej temperaturze co w urządzeniu dla zamrażania, wartości określające liczbę Prandtla (Pr), a więc μ, g, c, λ, są identyczne, stąd:

$$Pr = Pr \text{ urządzenia modelu}$$

Charakter zjawisk cieplnych zachodzących w zamrażanym gruncie jest uzależniony od przebiegu

wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią kolumny mroźniowej a przepływającą solanką. Warunki wymiany ciepła pomiędzy solanką a powierzchnią ciała stałego określa tzw. współczynnik przejmowania ciepła. Wyraża się go w kcal/m<sup>2</sup> godz. 1°C. Oznacza on ilość ciepła przejmowaną lub oddawaną przez jednostkę powierzchni w ciągu jednostki czasu i przy różnicy temperatur powierzchni ciała stałego i płynu równej 1°C. Współczynnik ten zależy od szeregu zmiennych, które określają przebieg zjawiska wymiany ciepła, a zatem jest funkcją

$$\alpha = f(w, C_p, \lambda, \mu, t, d, l, \dots)$$

Na podstawie badań i teoretycznych rozważań Nusselta wynika, że współczynnik przejmowania można obliczyć z następującego wzoru:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Rr^m$$

Gdzie C, n, m, są wartościami stałymi wyznaczonymi doświadczalnie i zależnymi od charakteru hydrodynamicznych własności cieczy.

W naszym przypadku, tj. dla ruchu wymuszonego i laminarnego, z szeregu wzorów empirycznych najbardziej jest wzór:

$$Nu = 0,74 \cdot Re^{0,2} \cdot Pr^{0,2}$$

(Wzór ten odnosi się do rur poziomych; przy pionowym położeniu rury i zgodnych kierunkach ruchu swobodnego i wymuszonego współczynnik przejmowania ciepła jest o 15% niższy od obliczonego, zaś przy kierunkach przeciwnych o 15% wyższy).

Uogólnione wzory wyprowadzone na zasadach teorii podobieństwa, a zwłaszcza zawarte w nich liczby podobieństwa pozwalają na opracowanie zasadniczych założeń konstrukcyjnych aparatury modelowej urządzenia do zamrażania zawodniowych gruntów.

Zakład Geologii Technicznej Instytutu Geologicznego w pierwszej fazie badań nad sztucznym zamrażaniem gruntów przeprowadził doświadczenia na aparaturze modelowej, zbudowanej w myśl przedstawionych, zasad teorii podobieństwa (ryc. 2). Zbudowana aparatura modelowa składa się z:

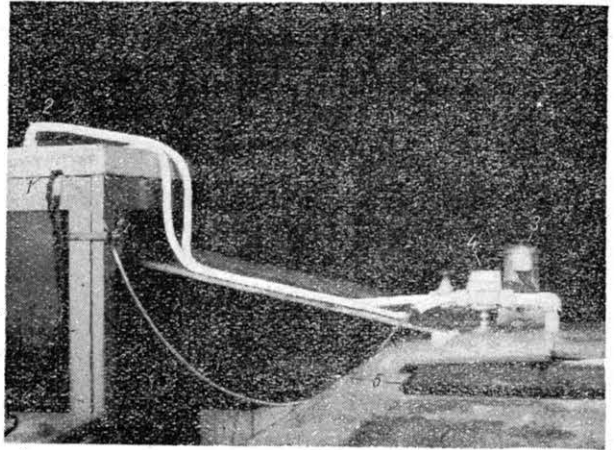
- 1) zbiornika na badany grunt,
- 2) kolumny mroźniowej,
- 3) urządzenia wprowadzającego w obieg solankę,
- 4) licznika prędkości przepływu solanki,
- 5) zbiornika solanki,
- 6) urządzenia chłodzącego solankę (lodówki).

Badania prowadzone są na jednej rurze mroźniowej przy niezmiennych się warunkach wodnych w gruncie. Zadaniem tych badań jest przesledzenie rozchodzenia się strumienia ciepła w warunkach dla gruntu jak najbardziej stałych, tj. bez uwzględnienia oddziaływania przepływającej wody na przebieg mrożenia. Dla tego samego gruntu zostaną następnie przebadane warunki rozchodzenia się ciepła przy zmiennym przepływie wody. W ten sposób stanie się możliwe uchwycenie zmian w przebiegu procesu zamrożenia dla jednej rury mroźniowej przy stacjonarnych i niestacjonarnych warunkach hydrogeologicznych.

W celu przesledzenia wzajemnego oddziaływania procesów cieplnych, biorących początek w poszczególnych kolumnach, na całość procesów mrożenia bariery lodowej szybu przewiduje się również badania modelowe dla większej ilości kolumn mroźniowych. Podobnie jak przy jednej kolumnie mroźniowej, badania nad zamrażaniem gruntów przy użyciu zestawu kolumn mroźniowych w modelu będą pro-

wadzone zarówno dla warunków wodnych stacjonarnych, jak i niestacjonarnych.

Zastosowanie metody badań modelowych nad zamrażaniem gruntów pozwoli nie tylko poznać samą istotę procesu zamrażania, ale i regulować w praktyce przebieg tych procesów w różnych warunkach geologicznych i hydrogeologicznych panujących na terenie projektowanych szybów.



Ryc. 2

Aparatura do badań modelowych nad zamrażaniem gruntów.

1. Zbiornik na badany grunt.
2. Kolumna mroźniowa.
3. Urządzenia wprowadzające solankę w obieg.
4. Licznik szybkości przepływu solanki.
5. Urządzenia chłodzące solankę.

Ponadto badania te dadzą wytyczne do bardziej celowego rozmieszczenia kolumn mroźniowych wokół szybu, co prawdopodobnie pozwoli na zmniejszenie ich ilości. Tak samo badania te pozwolą ustalić kryteria do określania optymalnego czasu zamrażania. Wreszcie przeprowadzenie obok badań modelowych również i badań nad wytrzymałością gruntów zamrożonych da w rezultacie całkowity obraz procesu zamrażania. Należy się spodziewać, że wyniki tych badań nie pozostaną bez wpływu na obniżenie kosztów tak drogiej metody stabilizacji gruntów, jaką jest metoda zamrażania.

Drugą niewątpliwą korzyścią, wynikającą z przeprowadzonych badań modelowych, będzie możliwość porównania uzyskanych wyników z wynikami podobnych badań modelowych nad zamrażaniem gruntów nowo pomyslaną metodą zamrażania przy użyciu rozprężonego powietrza jako medium chłodzącego kolumnę mroźniową. Badania nad zamrażaniem gruntów drugą metodą prowadzone są również przez Zakład Geologii Technicznej Instytutu Geologicznego.

Na zakończenie należy dodać, że metody badań modelowych oraz związane z nimi zasady rachunku prawdopodobieństwa mogą być z powodzeniem zastosowane również w celu rozwiązania rozmaitych zagadnień z zakresu mechaniki gruntu, geologii dynamicznej, a w szczególności badań sedymentologicznych.