

Jan SKŁADZIEN

Instytut Techniki Ciepłej

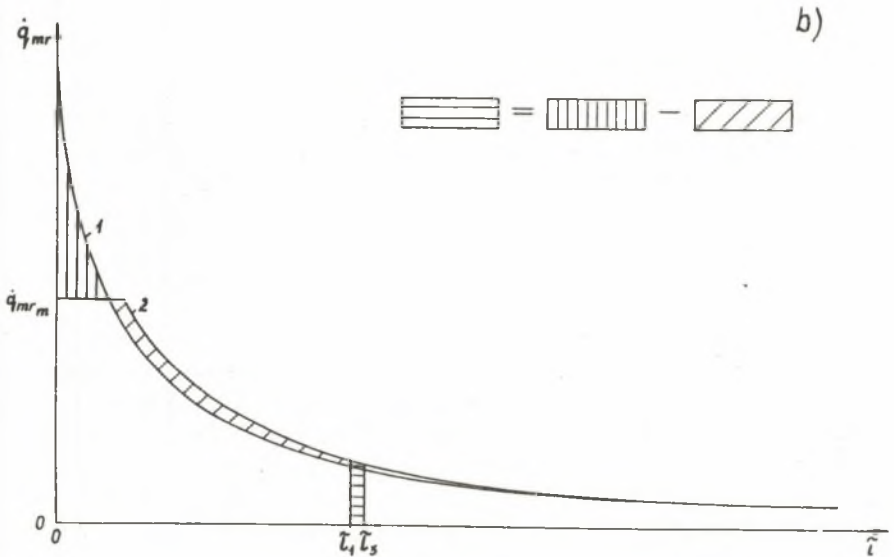
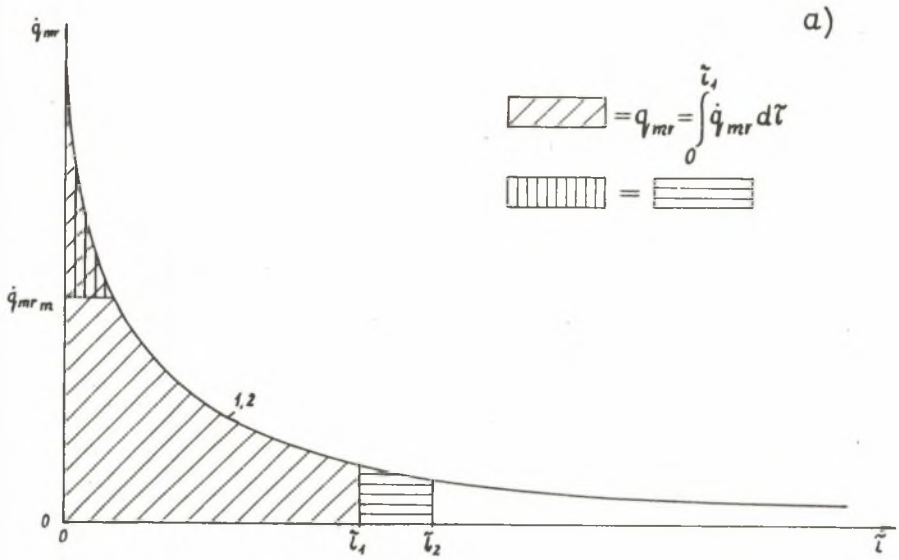
ZAMRAŻANIE GÓROTWORU PRZY OGRANICZONEJ MOCY
AGREGATÓW MROŻENIOWYCH

Streszczenie. W pracy przeanalizowano, na konkretnym przykładzie liczbowym, zamrażanie górotworu w przypadku ograniczonej mocy ziemniczej agregatów mrożeniowych. Rozkłady temperatur oraz granice obszaru zamrożonego wyznaczono za pomocą równań różnicowych.

WSTĘP

Przy analizie cieplnej procesu zamrażania górotworu występuje problem określenia rozkładu temperatury w górotworze, wraz z wyznaczeniem granicy obszaru zamrożonego oraz problem wyznaczenia przebiegu temperatury czynnika chłodzącego w rurze opadowej i mrożeniowej. Warunkiem początkowym jest przebieg temperatury naturalnej górotworu, warunkiem brzegowym taki sam rozkład temperatury w dużej odległości od kręgu otworów mrożeniowych. Warunkiem brzegowym przy wyznaczaniu zmian temperatury chłodziwa jest oddziaływanie aparatury mrożeniowej. Przy odpowiednio dużej mocy agregatów ziemniczych temperatura chłodziwa przy dopływie do rury opadowej może być stała, równa np. minimalnej, możliwej do zastosowania ze względu na własności czynnika mrozącego. Moc cieplna odebrana w jednym otworze mrożeniowym \dot{q}_{mr} zmienia się wtedy w sposób pokazany na rys. 1a.

Moc ta, przy stałym strumieniu chłodziwa, jest proporcjonalna do przyrostu temperatury czynnika chłodzącego podczas przepływu przez rurę opadową i mrożeniową. Odebranie przez jeden otwór od górotworu ciepła q_{mr} wymaga mrożenia przez okres τ_1 . Przy ograniczonej mocy agregatów mrożeniowych w początkowym okresie mrożenia temperatura solanki dopływającej do rur opadowych jest wyższa od minimalnej i ustala się na takim poziomie, że moc cieplna odbierana od górotworu jest równa maksymalnej mocy netto aparatury ziemniczej. Efekt cieplny, wynikający z akumulacji energii w chłodziwie, można zaniedbać ze względu na małą pojemność cieplną czynnika zawartego w rurze mrożeniowej i opadowej w stosunku do pojemności cieplnej zamrażanego górotworu. Przy ograniczonej mocy agregatów mrożeniowych, równej w odniesieniu do jednego otworu $\dot{q}_{mr m}$, odebranie od górotworu ciepła q_{mr} wymaga wydłużenia czasu mrożenia. Maksymalny czas w tym przypadku byłby równy τ_2 , gdyby inny początkowo rozkład temperatury chłodziwa, niż w przypadku jego stałej temperatury przy dopływie, nie powodował zmian w



Rys. 1. Zależność mocy cieplnej odebranej w jednym otworze mroźniowym \dot{q}_{mr} od czasu $\tilde{\tau}$

a) przypadek fikcyjny, b) przypadek rzeczywisty

1 - stała temperatura chłodziwa przy dopływie, 2 - ograniczona moc agregatów mroźniowych

dalszym etapie mrożenia. W rzeczywistości, po pewnym czasie mrożenia z ograniczoną mocą temperatura solanki osiąga wartość minimalną, po czym moc odebrana od górotworu jest mniejsza od maksymalnej wydajności agregatów mroźniowych, ale większa (rys. 1b) niż w tym samym momencie zamrażania górotworu za pomocą chłodziwa o stałej temperaturze, przy dopływie do rury opadowej. W rezultacie czas mrożenia wydłuża się jedynie do wielkości τ_3 . Przy odpowiednio długim czasie mrożenia czasy τ_1 i τ_3 są niemal takie same. W celu zbadania wpływu ograniczenia mocy agregatów chłodziw na czas zamrażania górotworu przedstawiono w pracy sposób przystosowania metody różnicowej do obliczeń z uwzględnieniem tego ograniczenia oraz pokazano wyniki przykładowych obliczeń cyfrowych.

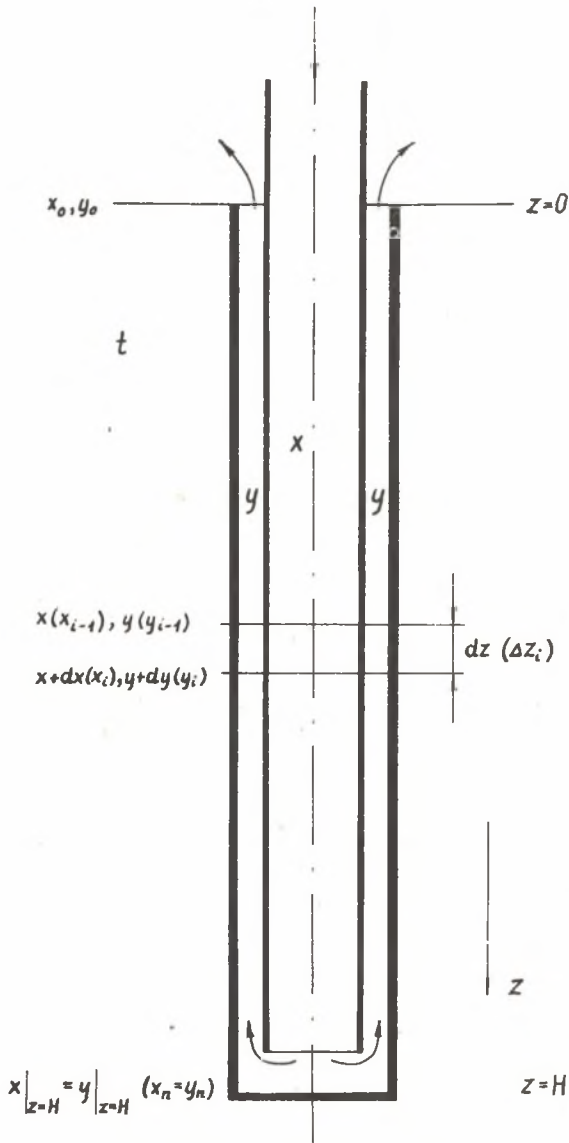
1. WYZNACZANIE POLA TEMPERATURY W GÓROTWORZE

Ze względu na złożony charakter przepływu ciepła w zamrażanym górotworze celowe jest [1, 2] zastosowanie metody różnicowej z ilorazem przednim do wyznaczenia rozkładu temperatury oraz granicy obszaru zamrożonego przy wykorzystaniu równań bilansu energii dla elementów różnicowych, w których występuje zmiana fazy wody [3].

W przyjętej metodzie zakłada się, że elementy różnicowe są izotermiczne. Środek elementu jest jego środkiem ciężkości. Przy obliczaniu oporów cieplnych przyjęto ponadto, że granice elementów też są izotermiczne. Zależności [2] wykorzystane w przykładzie obliczeniowym służą przy założeniu, że nie występuje ruch wód podziemnych oraz że woda krzepnie jak czysty składnik, tzn. przy stałej temperaturze. W dalszych rozważaniach założono również, że każda warstwa ma jednorodną strukturę i własności cieplne warstw (współczynniki przewodzenia ciepła, objętościowe pojemności cieplne właściwe) są stałe, zmieniają się jedynie skokowo w momencie zamrożenia wody. Zgodnie z rezultatami obliczeń przedstawionymi w pracy [1] pominięto przepływ ciepła w górotworze w kierunku pionowym, uwzględniono natomiast przepływ ciepła przez powierzchnię walcową kręgu otworów mroźniowych.

2. WYZNACZANIE ROZKŁADU TEMPERATURY CZYNNIKA CHŁODZĄCEGO

Rura mroźniowa i opadowa tworzą pojedynczy element Fielda (rys. 2). Rozkład temperatury czynnika chłodzącego w takim elemencie oraz przyrost jego temperatury można wyznaczyć analitycznie tylko na początku procesu zamrażania, gdy znany jest rozkład temperatury naturalnej górotworu stykającego się z rurą mroźniową. Równania bilansu energii dla odcinka dz mają postać:



Rys. 2. Rura mroźeniowa i opadowa

$$\left. \begin{aligned} k_z dz(t - y) &= -W dy + k_w dz(y - x) \\ k_w dz(y - x) &= W dx \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

przy warunkach brzegowych:

$$x \Big|_{z=0} = x_0; \quad x \Big|_{z=H} = y \Big|_{z=H}, \quad (2)$$

gdzie:

- k_z i k_w - są współczynnikami przenikania ciepła, odniesionymi do jednostkowej długości,
- t - temperatura górotworu,
- x i y - temperatura chłodziwa w rurze opadowej i w przestrzeni międzyrurowej,
- W - pojemność cieplna jego strumienia.

Współczynnik k_z dotyczy przenikania ciepła od górotworu do czynnika w przestrzeni międzyrurowej, k_w odnosi się do przenikania ciepła przez rurę opadową. Dla przypadku, gdy wielkości k_z , k_w i W mają stałą wartość oraz gdy temperatura górotworu jest określona za pomocą szeregu potęgowego o stałych współczynnikach A_i :

$$t = \sum_{i=0}^n A_i z^i \quad (3)$$

rozwiązanie układu równań (1) z warunkami (2) przyjmuje postać:

$$\left. \begin{aligned} x &= C_1 e^{\alpha_1 z} + C_2 e^{\alpha_2 z} + \sum_{i=0}^n B_i z^i \\ y &= C_1 \left(\alpha_1 \frac{W}{k_w} + 1 \right) e^{\alpha_1 z} + C_2 \left(\alpha_2 \frac{W}{k_w} + 1 \right) e^{\alpha_2 z} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n-1} \left[B_i + \frac{W}{k_w} B_{i+1} (i+1) \right] z^i + B_n z^n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{k_z}{2W} \left(1 \mp \sqrt{1 + 4 \frac{k_w}{k_z}} \right)$$

$$B_n = A_n$$

$$B_{n-1} = A_{n-1} - \frac{W}{k_w} n B_n$$

$$i = (n-2) \div 0$$

$$\left. \begin{aligned}
 B_i &= A_i - \frac{W}{k_w} (i+1) B_{i+1} + \frac{W^2}{k_z k_w} (i+2)(i+1) B_{i+2} \\
 C_1 &= \frac{(x_o - B_o) \alpha_2 e^{\alpha_2 H} + \sum_{i=0}^{n-1} (i+1) B_{i+1} H^i}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} \\
 C_2 &= \frac{-\sum_{i=0}^{n-1} (i+1) B_{i+1} H^i - (x_o - B_o) \alpha_1 e^{\alpha_1 H}}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Dla temperatury górotworu zależnej liniowo od głębokości z , otrzymuje się

$$B_1 = A_1; \quad B_o = A_o - \frac{W}{k_w} A_1. \quad (5)$$

Przyrost temperatury chłodziwa podczas przepływu przez rurę opadową i mrozeniową jest określony zależnością:

$$y|_{z=0} - x_o = \frac{W}{k_w} (C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 + B_1) \quad (6)$$

lub:

$$\begin{aligned}
 y|_{z=0} - x_o &= \frac{W}{k_w} \left[(x_o - B_o) \alpha_1 \alpha_2 \frac{e^{\alpha_2 H} - e^{\alpha_1 H}}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} + \right. \\
 &+ B_1 \left(1 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} \right) - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} \sum_{i=1}^{n-1} \\
 &\left. \cdot (i+1) B_{i+1} H^i \right]. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Dla przypadku liniowej zależności temperatury górotworu od głębokości ostatnie wyrażenie we wzorze (7) nie występuje.

Układ równań (1) jest słuszny przy założeniach ogólnie stosowanych w teorii wymienników ciepła, tzn. gdy pomija się przewodzenie ciepła w rurce opadowej i mrozeniowej w kierunku osiowym oraz dla stanu ustalonego. Rozwiązanie analityczne tego układu może być przydatne jedynie w począt-

kowej chwili mrożenia, gdy t jest temperaturą naturalną górotworu stykającego się bezpośrednio z rurą mrożeniową. Współczynnik k_z uwzględnia wtedy jedynie przewodzenie ciepła przez tę rurę oraz wnikanie w przestrzeni międzyrurowej. W dalszych etapach zamrażania temperatura górotworu w części przylegającej do rur zmienia się w sposób nieregularny i z różną szybkością narasta płaszcz mrożeniowy w poszczególnych warstwach. Przy analizie różnicowej procesu zamrażania górotworu rozpatruje się elementy różnicowe i przepływ ciepła między nimi oraz między elementami stykającymi się z rurą mrożeniową i czynnikiem w przestrzeni międzyrurowej. Współczynnik k_z uwzględnia w takim przypadku również przewodzenie ciepła przez część fragmentu górotworu o wielkości zależnej od przyjętego podziału różnicowego. Współczynnik k_z w każdej warstwie górotworu jest wtedy inny i zmienia się w czasie zamrażania elementu przylegającego do rury mrożeniowej. Narzuca to konieczność zastosowania metody różnicowej do wyznaczenia rozkładu temperatury czynnika chłodzącego w rurze opadowej i mrożeniowej. W tym celu rury te dzieli się na odcinki o grubości Δz_i równej grubościom poszczególnych warstw górotworu. Dla i -tego odcinka równania bilansu energii mają, w odniesieniu do czynnika w rurze opadowej oraz mrożeniowej, postać ($i=1 \div n$, n - ilość warstw)

$$\left. \begin{aligned} k_w \Delta z_i \left(\frac{y_{i-1} + y_i}{2} - \frac{x_{i-1} + x_i}{2} \right) &= W(x_i - x_{i-1}) \\ \sum_1 k_{z_{i1}} \Delta z_i (t_{i1} - \frac{y_{i-1} + y_i}{2}) &= W(x_i - x_{i-1}) + W(y_{i-1} - y_i) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

gdzie indeks 1 dotyczy wszystkich elementów stykających się z rurą mrożeniową w i -tej warstwie; $k_{z_{i1}}$ w związku z tym odniesione jest do części obwodu rury. Temperatury x_i oraz y_i występują na końcu, x_{i-1} oraz y_{i-1} na początku zaś rozpatrywanego odcinka. Warunki brzegowe dla układu równań (8) mają postać:

$$\left. \begin{aligned} x_{i-1} \Big|_{i=1} &= x \Big|_{z=0} = x_0 \\ x_n &= y_n \end{aligned} \right\} \quad (9a)$$

Układ równań (8) służy jest dla stanu ustalonego, w rzeczywistości zaś występuje stan nieustalony. Układ ten można jednak stosować, gdy pomija się zmianę energii solanki zawartej w rurach w funkcji czasu.

Współczynniki $k_{z_{i1}}$ są w ogólnym przypadku inne w każdej warstwie. Metoda różnicowa umożliwia również uwzględnienie zmienności wielkości k_w i W . W praktyce współczynniki wnikania ciepła, a więc i k_w oraz pojemność cieplna strumienia W , są stałe ze względu na niewielkie zmiany temperatury czynnika chłodzącego podczas przepływu przez rurę opadową i mrożeniową.

Układ równań (8) z warunkami (9a) najwygodniej jest rozwiązać za pomocą kolejnych podstawiń, po wprowadzeniu pomocniczych stałych:

$$k_i = \frac{k_w \Delta z_i}{2W}; \quad g_i = \frac{\Delta z_i}{W} \sum_1 k_{z_{i1}} t_{i1}; \quad h_i = \frac{\Delta z_i}{2W} \sum_1 k_{z_{i1}} \quad (10a)$$

Z równań (8) otrzymuje się kolejno dla $i = 1, \dots, n$:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= a_i + b_i y_0 \\ y_i &= c_i + d_i y_0 \end{aligned} \right\} \quad (10b)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{1}{M_i} [A_i (h_i - 1) + k_i C_i] \\ b_i &= \frac{1}{M_i} [B_i (h_i - 1) + k_i D_i] \\ c_i &= \frac{1}{M_i} [(k_i + 1) C_i - A_i] \\ d_i &= \frac{1}{M_i} [(k_i + 1) D_i - B_i] \\ M_i &= h_i (k_i + 1) - 1 \\ A_i &= k_i (c_{i-1} - a_{i-1}) + a_{i-1} \\ B_i &= k_i (d_{i-1} - b_{i-1}) + b_{i-1} \\ C_i &= g_i - h_i c_{i-1} + a_{i-1} - c_{i-1} \\ D_i &= b_{i-1} - d_{i-1} (1 + h_i) \end{aligned} \right\} \quad (10c)$$

przy czym z warunku brzegowego dla punktu $z = 0$:

$$a_0 = x_0; \quad b_0 = c_0 = 0; \quad d_0 = 1 \quad (10d)$$

Po wyznaczeniu x_n oraz y_n otrzymuje się z warunku brzegowego dla dolnej części elementu chłodzącego:

$$y_0 = \frac{a_n - c_n}{d_n - b_n} \quad (10e)$$

Po skorzystaniu kolejno z zależności (10) można następnie wyznaczyć rozkład temperatury strumienia czynnika chłodzącego w rurze opadowej i mroźniczej.

Przy znacznej mocy agregatów mroźnicowych można zapewnić stałość temperatury x_0 czynnika chłodzącego, dopływającego do rury opadowej. Jeśli moc ta nie jest wystarczająco duża, temperatura x_0 początkowo jest wysoka, następnie stopniowo maleje, aż do wielkości minimalnej. Gdy moc zużyta na zmianę energii solanki jest znikomo mała w porównaniu do mocy cieplnej odbieranej od górotworu, wtedy w każdej chwili moc ta jest równa mocy agregatów mroźnicowych. Z równości mocy wynika temperatura czynnika chłodzącego x_0 :

$$x_0 = y_0 - \frac{\dot{Q}_{mr}}{m \cdot W}, \quad (11)$$

gdzie \dot{Q}_{mr} jest mocą netto, w danej chwili, agregatów mroźnicowych, m zaś oznacza ilość otworów mroźnicowych.

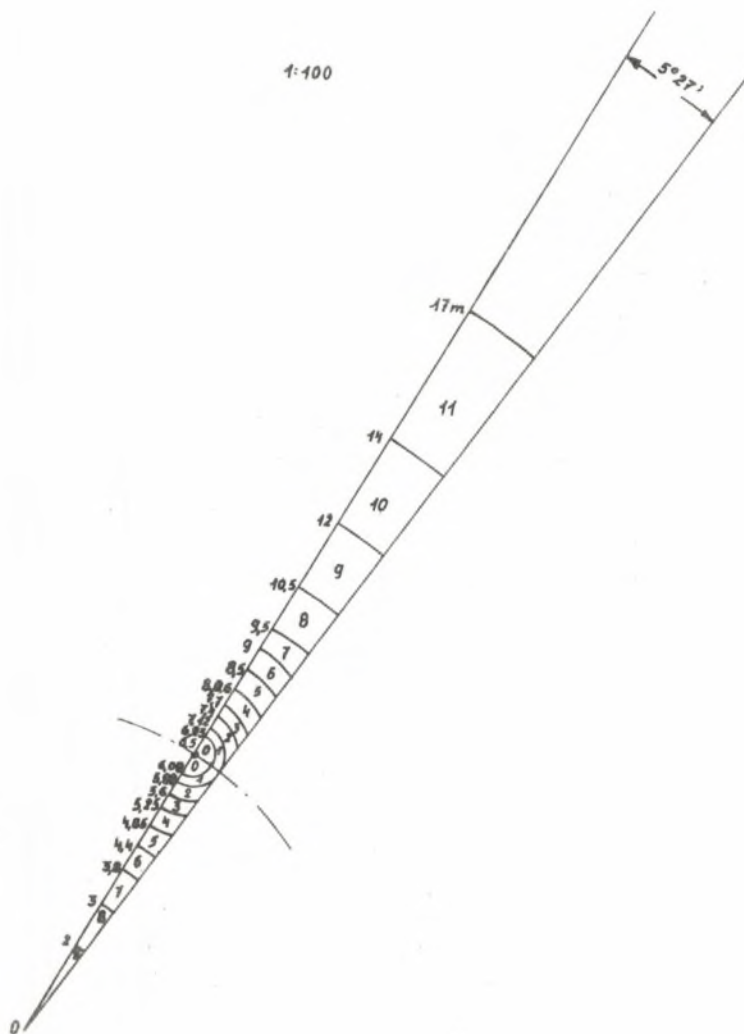
3. PRZYKŁAD LICZBOWY

Według przedstawionej metody wykonano przykładowe obliczenia. Dla każdego przypadku rozpatrywano kolejne interwały czasu wyznaczając rozkład temperatury czynnika chłodzącego w rurze opadowej i mroźniczej dla momentu początkowego, a następnie określając za pomocą równań różnicowych rozkład temperatury oraz granice obszaru zamrożonego w każdej warstwie górotworu na końcu interwału. Temperaturę chłodziwa x_0 przy ograniczonej mocy agregatów mroźnicowych wyznaczano z zależności (11) po przyjęciu temperatury y_0 określonej w poprzednim odcinku czasowym. Po każdym kroku czasowym korygowano [2] opory przewodzenia ciepła w miejscu występowania granicy faz.

Przykładowe obliczenia wykonano dla górotworu podzielonego na 10 poziomych warstw o łącznej grubości 260 m, przy czym pierwsza ma grubość 10 m. Wielkości charakterystyczne dla tej warstwy oraz średnie wielkości charakterystyczne dla 9 pozostałych warstw zamieszczono w zestawieniu 1. Przyjęto następujące parametry mrożenia:

- | | |
|---|-----------------------------------|
| - średnica kręgu otworów mroźnicowych | - 13 m |
| - średnica zewnętrzna i wewnętrzna rury mroźnicowej oraz opadowej | - 168/149; 90/79,8 mm |
| - ilość otworów mroźnicowych | - 33 |
| - pojemność cieplna strumienia chłodziwa W (stała podczas trwania procesu) | - 39 800 W/K, (rurę) |
| - współczynniki wnikania ciepła w rurze opadowej oraz w przestrzeni międzyrurowej | - 1500; 653 W/(m ² K), |
| - współczynnik przewodzenia ciepła materiału rur | - 40 W/(m K). |

Założono, że temperatura zamrażania wody w górotworze jest stała i wynosi 0°C . Powtarzalny wycinek górotworu podzielono na elementy w każdej warstwie w sposób pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Podział na elementy powtarzalnego fragmentu górotworu

Zestawienie 1

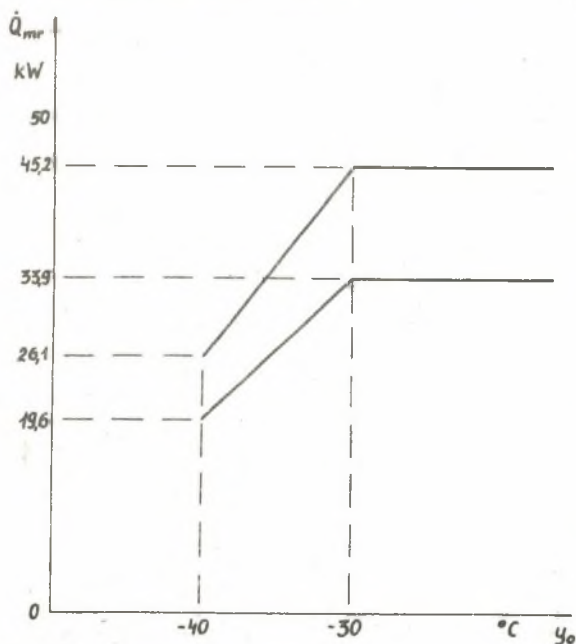
Wielkości charakterystyczne górotworu

Numer war- stwy	Obszar występowania	Tempera- tura na- turalna °C	Pojemność cieplna kJ/(m ³ K)		Współczynnik przewodzenia ciepła, W/(mK)		Entalpia krzepnie- cia R_k kJ/m ³
			C_n	C_z	λ_n	λ_z	
1 2±10	0 ÷ 10 m	8,7	3 737	2 607	1,5	1,75	184 250
	10 ÷ 260 m	9,23	2 872	2 196	1,15	2,08	105 600

n - górotwór niezamrożony, z - górotwór zamrożony

Obliczenia przeprowadzono dla pięciu wariantów mrożenia:

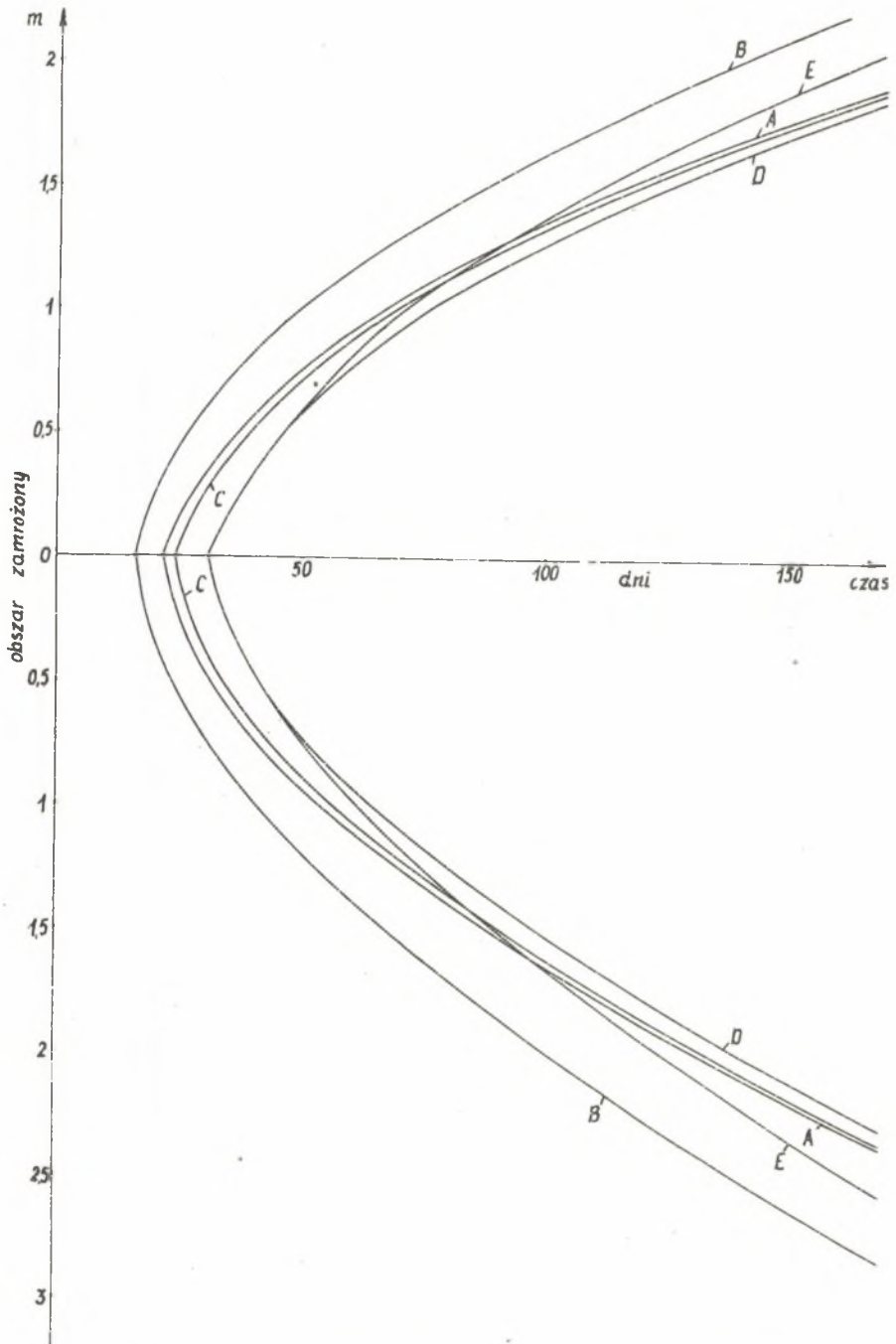
- A - temperatura czynnika chłodzącego przy dopływie do rury opadowej jest stała i wynosi - 30°C,
 B - temperatura czynnika chłodzącego przy dopływie do rury opadowej jest stała i wynosi - 40°C,
 C, D, E - moc agregatów mrozeniowych jest ograniczona, przy czym uproszczo-
 na charakterystyka agregatów pokazana jest na rys. 4. W przypadku C
 wykorzystuje się poziomy odcinek górnej łamanej, w przypadku D poziomy
 odcinek dolnej łamanej, w przypadku E zaś cały zaznaczony zakres
 dolnej charakterystyki.



Rys. 4. Uproszczona charakterystyka agregatów mrozeniowych

Ograniczenie minimalnej temperatury chłodziwa wynikać może np. z własności chłodziwa i z tego powodu w przypadkach C i D założono, że temperatura ta jest równa - 30°C.

Moc \dot{Q}_{mr} zaznaczone na rys. 4 są mocami ziębniczymi netto. Wynika to stąd, że agregaty mrozeniowe muszą zapewnić odebranie od chłodziwa nie tylko ciepła pobranego od górotworu, lecz również ciepła tarcia oraz ciepła dopływającego do solanki z otoczenia. Całkowita moc agregatów musi być zatem odpowiednio większa. Ciepło tarcia w rozpatrywanym przypadku nie ma wpływu na sam proces wymiany ciepła



Rys. 5. Granice obszaru zamrożonego w warstwie 1 w funkcji czasu mrozenia

ła z górotworem, gdyż wynosi ono 5,54 kW/rurę, co odpowiada przyrostowi temperatury chłodziwa o 0,139 K.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych obliczeń wykonano wykresy przedstawione na rys. 5 i 6. Na rys. 5 zaznaczone są granice obszaru zamrożonego w warstwie 1. Minimalną grubość płaszcza mroźeniowego w tej warstwie w określonej chwili przedstawia pionowy odcinek zawarty pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi. Odcinek taki składa się z dwóch części wyznaczonych przez oś czasu. Część górna i dolna przedstawia grubość płaszcza mroźeniowego na zewnątrz i wewnątrz kręgu otworów mroźeniowych. Na podstawie wykresów pokazanych na rysunku 5 wykonano zestawienie 2 podające czas zamrażania niezbędny do osiągnięcia w warstwie 1 płaszcza mroźeniowego o określonej grubości, przy różnych wariantach mrożenia.

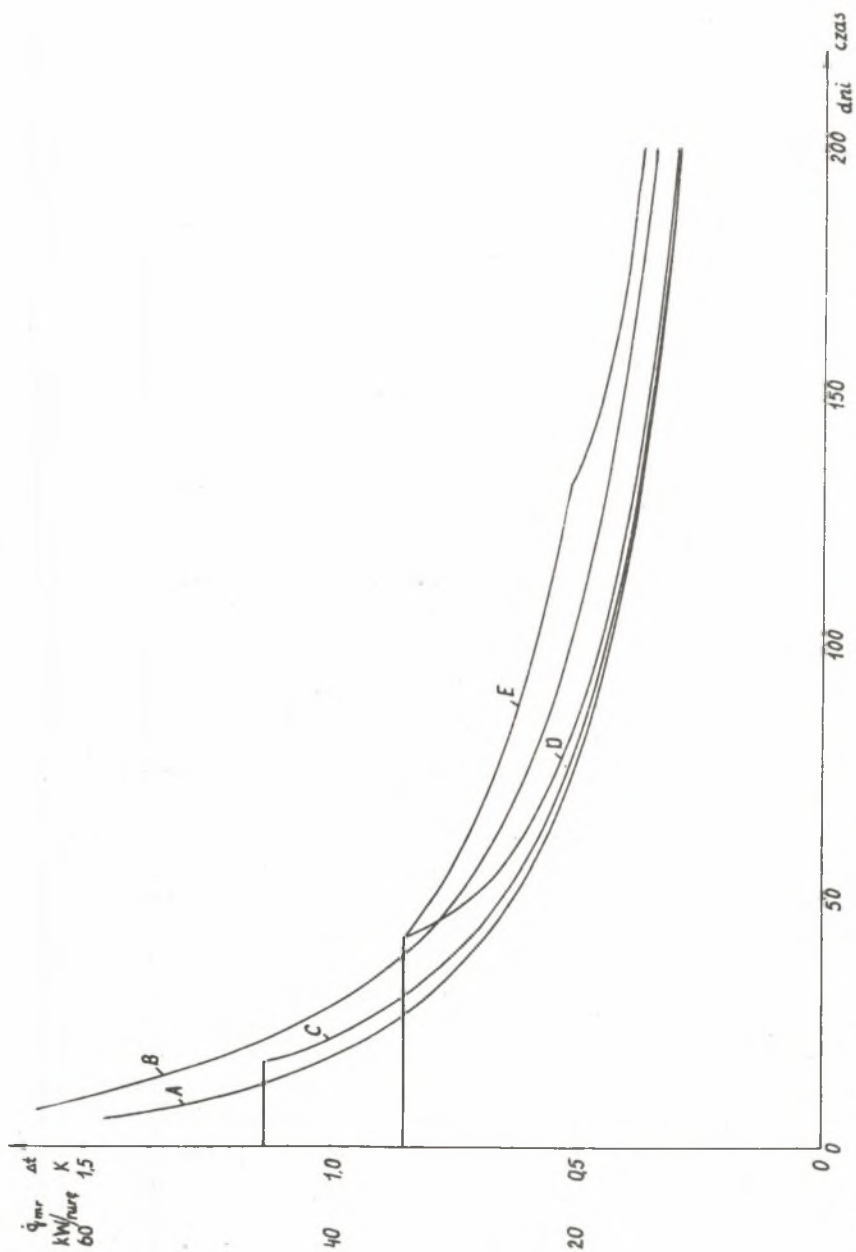
Zestawienie 2

Czas zamrażania górotworu do momentu osiągnięcia w warstwie 1 płaszcza mroźeniowego o założonej grubości (dni)

grubość płaszcza mroźeniowego m	1,5	2	2,5	3	3,5	4
	wariant					
A	44,5	59,5	78	100	125	153
B	33,5	44,5	59	76	95,5	117
C	47,5	62	80,5	103	127,5	156
D	54,5	69,5	88	110	134	161,5
E	53	65,5	81,5	99,5	119	141

Moc ziębnicza przyjęta w wariacie C występuje w przypadku zastosowania 4 największych agregatów mroźeniowych. Wariant D zatem odnosi się do przypadku zainstalowania 3 agregatów. Z rys. 5 oraz z zestawienia 2 wynika niecelowość instalowania tu większej ilości agregatów niż 4. Z kolei dalsze ograniczenie mocy ziębnicznej wymaga zainstalowania 2 agregatów, a więc przyjęcia mocy mroźeniowej o połowę niższej niż w wariacie C. Ponieważ takie ograniczenie mocy znacznie wydłużyłoby czas mrożenia, przypadku tego nie rozpatrzono.

Przyrost temperatury czynnika chłodzącego w rurze mroźeniowej oraz moc cieplna odebrana w jednym otworze, równa iloczynowi tego przyrostu i pojemności cieplnej strumienia chłodziwa, pokazane są na rys. 6. Utrzymanie stałej temperatury chłodziwa przy dopływie wymaga w początkowym okresie mrożenia agregatów ziębnicznych o bardzo dużych mocach. Obliczenia wykonane za pomocą zależności (4) i (7) dla początkowego momentu mrożenia, gdy z rurą mroźeniową łączy się górotwór o temperaturze naturalnej - równej $t = (8,7 + 0,0023 z) ^\circ\text{C}$, dały przyrost temperatury chłodziwa równy 27,3 K oraz 34,3 K dla temperatury solanki przy dopływie do rury opadowej - 30°C



Rys. 6. Przyrost temperatury czynnika chłodzącego Δt podczas przepływu przez rurę opadową i mroźniową oraz moc cieplna q_{mr} odebrana od górotworu w jednym otworze w funkcji czasu mrozenia

oraz -40°C . Są to wielkości znacznie większe od przyrostów temperatury ładu odpowiadających mocom ziębniczym przyjętym w wariantach C oraz D i równym 1,136 K oraz 0,852 K.

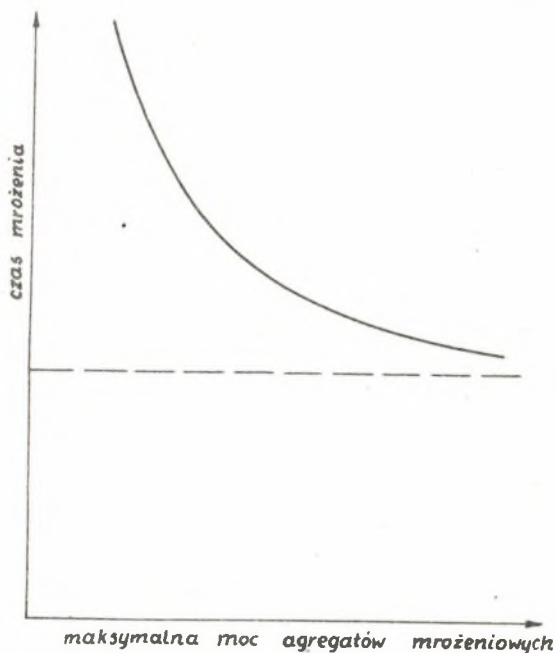
Mimo tych dysproporcji maksymalna moc ziębnicza jest wykorzystywana w wariacie C przez 17 dni, w D zaś przez 42 dni. Po upływie tego czasu w wariantach C i D mrożenia moc cieplna odbierana od górotworu jest mniejsza od maksymalnej mocy agregatów mrożeniowych, temperatura zaś czynnika chłodzącego dopływającego do rury opadowej przyjmuje minimalną wartość. W wariacie E proces przebiega nieco inaczej ze względu na możliwość obniżenia temperatury ładu poniżej -30°C , przy równoczesnym spadku mocy ziębniczej. Ze względu na ten fakt moc pobierana od górotworu zmniejsza się po 42 dniach mrożenia w mniejszym stopniu niż w przypadku D, co pociąga za sobą szybszy w tym okresie wzrost grubości płaszcza mrożeniowego, przedstawiony dla warstwy nr 1 na rys. 5. Temperatura ładu osiąga minimalną wartość -40°C w wariacie E po upływie 133 dni mrożenia.

4. WNIOSKI

W pracy rozpatrzono, za pomocą metod różnicowych, zamrażanie górotworu jednym kręgiem otworów przy uwzględnieniu ograniczonej mocy agregatów mrożeniowych. Jak wynika z przedstawionego przykładu liczbowego, maksymalna moc agregatów, nawet w przypadku dość znacznego jej ograniczenia, wykorzystywana jest tylko przez stosunkowo niezbyt długi czas mrożenia. Wydłużenie względne czasu mrożenia jest niewielkie, zwłaszcza przy wymaganych dużych grubościach płaszcza mrożeniowego. Wynika stąd wnioski, tylko z pozoru absurdalne, że im większa jest wymagana grubość płaszcza mrożeniowego, a więc z im dłuższym czasem mrożenia należy się liczyć, tym mniejszą moc ziębniczną powinno się zainstalować.

Rozważania powyższe są słuszne dla pewnego przedziału mocy ziębniczej, w którym powinna być zawarta łączna moc agregatów mrożeniowych. Wynika to stąd, że krzywa zależności czasu mrożenia, niezbędnego do uzyskania płaszcza mrożeniowego o określonej grubości, od mocy agregatów, przy założonych warunkach mrożenia, jest w przybliżeniu krzywą hiperboliczną (rys. 7). Poziomą prostą, pełniącą rolę asymptoty, jest linia czasu mrożenia przy stałej temperaturze czynnika chłodzącego dopływającego do rury opadowej. Nie jest to asymptota w sensie matematycznym, gdyż czas ten można osiągnąć przy dużej, chociaż ograniczonej, mocy agregatów mrożeniowych. Moc ta jednak ma sens jedynie teoretyczny. Drugą asymptotą jest oś czasu. Zainstalowanie zatem agregatów o mocy większej od pewnej wartości nie daje praktycznie korzyści czasowych, zbytnie obniżenie zaś mocy ziębniczej powoduje gwałtowne wydłużenie czasu mrożenia, zwłaszcza przy wymaganych małych grubościach płaszcza mrożeniowego.

O ile moc agregatów mrożeniowych, powyżej pewnej wielkości zależnej od warunków mrożenia i wymaganej grubości płaszcza mrożeniowego, niezbyt



Rys. 7. Zależność czasu mrożenia od mocy agregatów mroźniowych

wpływa na długość czasu mrożenia, o tyle duży wpływ ma minimalna, zastosowana w procesie, temperatura czynnika chłodzącego. Nawet stosunkowo nieznaczne obniżenie tej temperatury powoduje istotne zwiększenie szybkości narastania płaszczu mroźniowego.

LITERATURA

- [1] Składzień J.: Analiza cieplna procesu zamrażania górotworu przy pomocy metody różnicowej. Archiwum Termodynamiki i Spalania, w druku.
- [2] Składzień J.: Zastosowanie metody różnicowej do analizy cieplnej procesu zamrażania górotworu za pomocą podwójnego kręgu otworów mroźniowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka 63, Gliwice 1978.
- [3] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Katowice 1977.

ЗАМОРАЖИВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В СЛУЧАЕ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ
ЗАМОРАЖИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Р е з ю м е

В статье приведен процесс замораживания горных пород в случае ограниченной мощности замораживающих агрегатов. Распределение температур и пределы замороженного пространства определены методом конечных разностей. Конкретный пример иллюстрирует полученные результаты.

UNDERGROUND ROCK FREEZING UNDER A LIMITED FREEZING
INSTALLATION OUTPUT

S u m m a r y

The paper presents an analysis of an underground rock freezing process under limited conditions because of the freezing installation. Temperature distributions and the size of the frozen area have been determined on the basis of a differential thermal analysis. The relations derived have been used to solve a relevant example.