

P. 3349 / 81



**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

ENERGETYKA

**Z. 78
GLIWICE
1981**

P. 3349/81



POLITECHNIKA ŚLĄSKA ·

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 693

JAN SKŁADZIEŃ

**ANALIZA CIEPLNA
I EKONOMICZNA MROŻENIA
GÓROTWORU**

GLIWICE

1981

OPINIODAWCA

Prof. dr inż. Jan Szargut

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Jan Bandrowski (redaktor naczelny), Gerard Kosman (redaktor działu),

Wojciech Mikołajków (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Roma Łoś

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9796

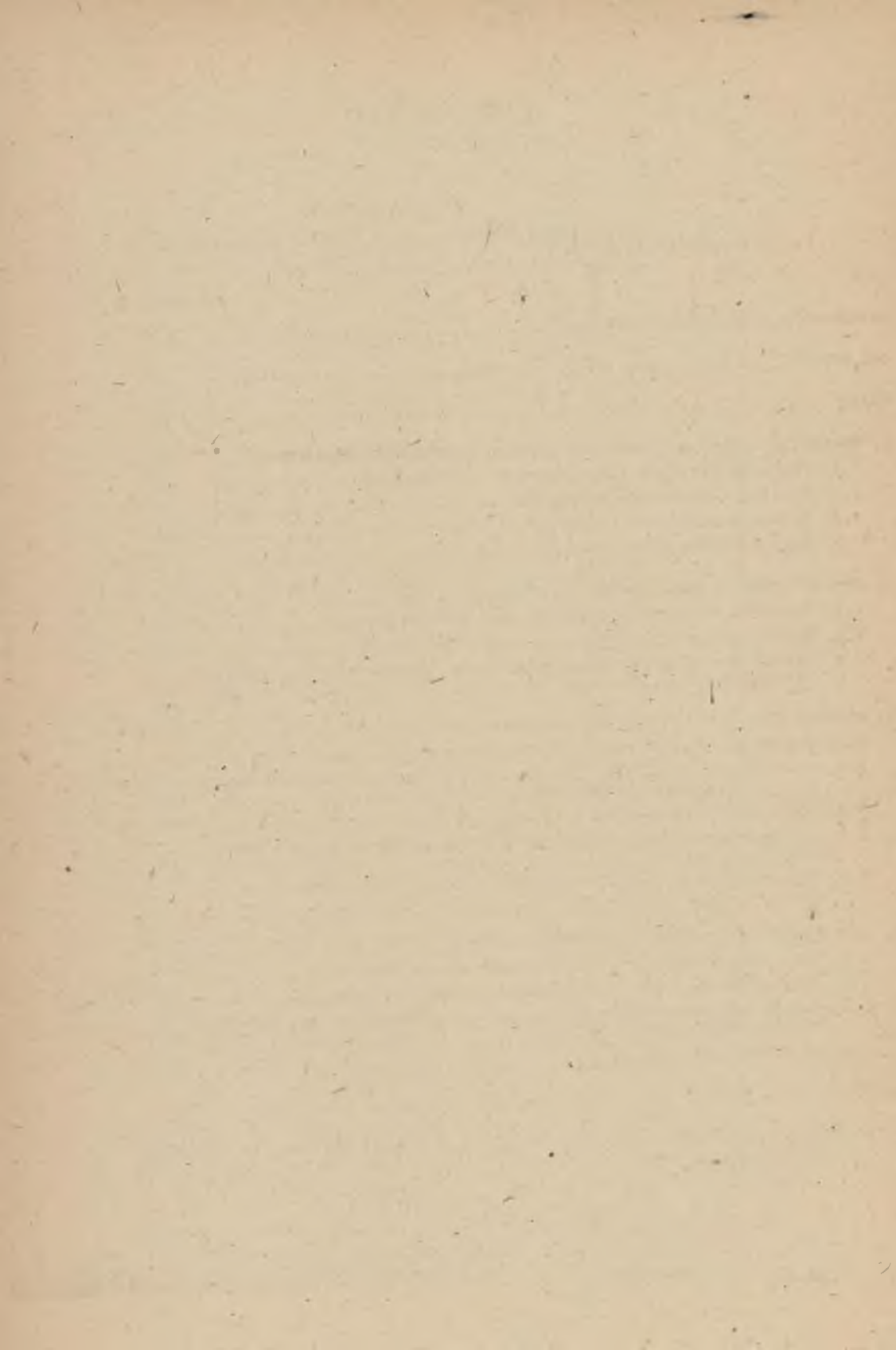
Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 2, 44-100 Gliwice

Nakł. 170+85 Ark. wyd. 7,5 Ark. druk. 7,625 Papler offsetowy kl. VII 70x100, 70 g
Oddano do druku 10.04.81 Podpis. do druku 16.06.81 Druk ukończ. w lipcu 1981
Zamówienie 538/81 Cena zł 19.—

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

SPIS TREŚCI

	Str.
ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI	5
CEL PRACY	9
WSTĘP	11
1. NUMERYCZNY MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU	14
1.1. Równania bilansów elementarnych	14
1.2. Rozkład temperatury chłodziwa	17
1.3. Wyznaczanie oporów przepływu ciepła	23
1.4. Rezultaty obliczeń wstępnych	29
2. WYNIKI OBLICZEŃ DLA WYBRANYCH SZYBÓW	32
2.1. Zamrażanie jednym kręgiem otworów mrozeniowych	32
2.2. Zamrażanie dwoma kręgami otworów mrozeniowych	41
2.3. Zamrażanie do dużej głębokości dwoma kręgami otworów mrozeniowych	47
3. BEZWYMIAROWA ANALIZA CIEPLNA MROŻENIA GÓROTWORU	67
3.1. Bezwymiarowe zmienne i parametry mrożenia	67
3.2. Wyznaczenie bezwymiarowej grubości płaszcza mrozeniowego przy jednym kręgu otworów	69
3.3. Analiza błędów obliczeń	81
3.4. Bezwymiarowa optymalizacja wstępna przy jednym kręgu otworów	85
3.5. Bezwymiarowa optymalizacja wstępna przy dwóch kręgach otworów	87
4. OKREŚLENIE OPTYMALNYCH PARAMETRÓW MROŻENIA	97
4.1. Ustalenie parametrów podlegających optymalizacji	97
4.2. Optymalizacja zewnętrznej średnicy rury opadowej	98
4.3. Sposób optymalizacji mocy agregatów, strumienia chłodziwa oraz liczby otworów mrozeniowych	102
4.4. Przykład obliczeniowy	104
WNIOSKI	114
LITERATURA	116

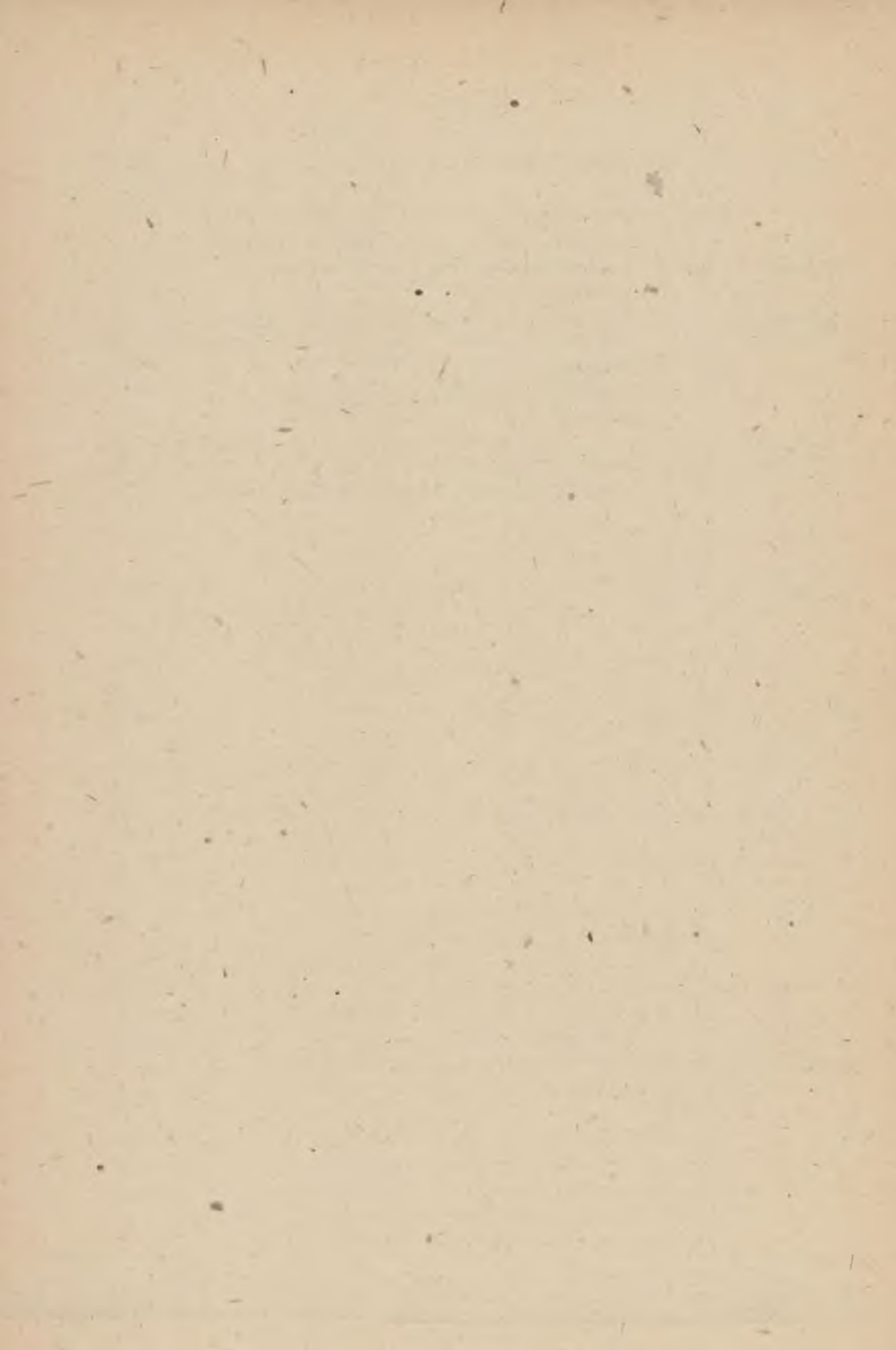


ZESTAWIENIE WAZNIEJSZYCH SYMBOLI

- A, A_1, A_w, A_z, a_1 - pomocnicze stałe,
 a_t, a'_t - współczynniki dyskontujące,
 B, B_1, B_w, B_z, b_1 - pomocnicze stałe,
 b, b_d - bezwymiarowy zewnętrzny promień rury mrozeniowej oraz drugiego, zewnętrznego kręgu (przy mrożeniu dwoma kręgami),
 C, C_1, C_w, C_z, c_1 - pomocnicze stałe,
 C_n, C_z - objętościowa pojemność cieplna właściwa górotworu niezamrożonego i zamrożonego,
 c - stosunek pojemności cieplnych,
 D_1, d_1 - pomocnicze stałe,
 D_w, D_z, d_w, d_z - średnice wewnętrzne i zewnętrzne rury mrozeniowej oraz opadowej,
 E, E_w, E_z, e, e_w, e_z - rzeczywista i bezwymiarowa grubość całego płaszcza mrozeniowego oraz jego składowych,
 E, E_0, E_z - rzeczywisty, porównawczy oraz zredukowany efekt ekonomiczny,
 E_{el} - zużycie energii elektrycznej,
 f - bezwymiarowy czas,
 f_Q, f_w - pomocnicze funkcje poprawkowe,
 g_1, h_1 - pomocnicze stałe,
 H - głębokość mrożenia,
 I - entalpia,
 I_k - objętościowa entalpia zamarzania górotworu,
 I_s - kwota uzyskana ze sprzedaży urządzeń,
 J_0 - nakład inwestycyjny,
 K - pomocnicza stała bezwymiarowa lub koszty bieżące,
 K_{el}, k_{el} - koszt oraz strumień kosztów energii elektrycznej,
 k - bezwymiarowa entalpia zamarzania górotworu,
 k_1 - pomocnicze stałe,
 k_w, k_z - współczynniki przenikania ciepła przez rurę opadową i mrozeniową,
 l - stosunek współczynników przewodzenia ciepła górotworu lub szerokość elementu różnicowego,
 l_D, l_1 - liczby elementów różnicowych,
 n_1 - pomocnicze stałe,
 n - liczba warstw.

- N, \bar{N} - całkowite nakłady kapitałowe oraz strumień nakładów i kosztów,
- N_f - moc elektryczna potrzebna do neutralizacji efektów tarcia,
- n, n_d - liczba otworów całkowita lub w kręgu wewnętrznym oraz liczba otworów w drugim, zewnętrznym kręgu,
- n_1, n_2 - pomocnicze stałe,
- P, \bar{P} - wartość produkcji oraz strumień efektów produkcyjnych,
- p - bezwymiarowy opór przenikania ciepła,
- Δp_f - spadek ciśnienia wywołany tarciami,
- Q_{mr} - ciepło odebrane od górotworu,
- \dot{Q} - strumień ciepła,
- $\dot{Q}_{mr}, \dot{Q}_{mr m}$ - moc rzeczywista oraz nominalna agregatów mrozeniowych,
- \dot{q}_f - moc tarcia w jednym otworze,
- R - opór przepływu ciepła,
- R_d, R_o, R_{sz} - promień zewnętrznego (drugiego) i wewnętrznego lub pojedynczego kręgu oraz promień szybu,
- R_s, R_w, R_z - średni, wewnętrzny i zewnętrzny promień elementu różnicowego,
- r - stopa dyskontowa,
- r_o, r_w - zewnętrzny i wewnętrzny promień rury mrozeniowej,
- T - temperatura,
- T_{chl} - temperatura chłodziwa (wykorzystywana przy analizie bezwymiarowej),
- T_g, T_z - temperatura naturalna oraz temperatura zamarzania górotworu,
- t - bezwymiarowa temperatura zamarzania górotworu,
- V - objętość,
- V_w - objętość wewnętrznej części elementu różnicowego,
- V_z - objętość zamrożona,
- \dot{V} - objętość strumienia chłodziwa,
- v - pojemność cieplna strumienia chłodziwa,
- w - prędkość,
- x - temperatura chłodziwa w rurze opadowej lub pomocnicza zmienna,
- x_o - temperatura chłodziwa przy dopływie do rury opadowej,
- y, y_o - temperatura chłodziwa w przestrzeni międzyrurowej oraz przy wypływie z elementu mrozeniowego,
- z - głębokość,
- Δz - grubość warstwy,
- α_1, α_2 - pomocnicze stałe,
- $\alpha_{ot}, \alpha_w, \alpha_z$ - współczynniki wnikania ciepła: do otoczenia, w rurze opadowej, w przestrzeni międzyrurowej,
- β - pomocnicza stała,

- δ - grubość elementu różnicowego lub ścianki rury opadowej,
- ϵ - bezwymiarowa grubość ścianki rury opadowej,
- ξ_z - wskaźnik energetyczny agregatu mroźniowego,
- η_{iP}, η_P - sprawność wewnętrzna i całkowita pompy,
- λ_f - liczba tarcia,
- $\lambda_n, \lambda_D, \lambda_n, \lambda_z$ - współczynnik przewodzenia ciepła: materiału rury mroźniowej i opadowej, górotworu niezamrożonego i zamrożonego,
- ν - kinematyczny współczynnik lepkości,
- ρ - gęstość,
- τ, τ_0, τ_z - czas, czas zamrażania w warunkach odniesienia oraz rzeczywistych,
- φ - kąt, w którym zawarty jest element różnicowy.



CEL PRACY

Celem pracy jest zbudowanie modelu matematycznego procesu zamrażania górotworu oraz wykorzystanie tego modelu do obliczeń wielowariantowych. Model mrożenia górotworu powinien odpowiadać takim wymaganiom jak:

- uwzględnienie rzeczywistego charakteru zjawisk występujących podczas zamrażania górotworu,
- ograniczony czas realizacji obliczeń, tak aby możliwe było przeprowadzenie wielowariantowej analizy przy użyciu ogólnie dostępnych maszyn cyfrowych,
- wystarczająca dokładność obliczeń przy rozpatrywaniu zarówno krótkotrwałych procesów mrożenia, jak i przypadków, gdy wymagana jest duża grubość płaszcza mrozeniowego,
- możliwość rozpatrywania zamrażania górotworu za pomocą pojedynczego i podwójnego kręgu otworów,
- możliwość rozpatrywania procesu, w którym górotwór składa się z wielu warstw, przy uwzględnieniu charakteru oddziaływania agregatów mrozeniowych.

Wymagania powyższe związane są ze sposobem wykorzystania opracowanego modelu. Model ten zastosowano do wielowariantowych obliczeń dotyczących konkretnych szybów zamrażanych za pomocą pojedynczego oraz podwójnego kręgu zawierającego otwory mrozeniowe. Drugą grupę obliczeń stanowią rozważania związane ze współrzędnymi i parametrami bezwymiarowymi. Po zdefiniowaniu tych wielkości przeprowadzono analizę, której rezultaty mają charakter ogólny.

W oparciu o wyniki obliczeń dotyczących rzeczywistych przypadków mrożenia, jak również w oparciu o wyniki rozważań bezwymiarowych, opracowano metodykę postępowania przy optymalizacji techniczno-ekonomicznej procesu zamrażania górotworu. Ponieważ pełna optymalizacja wymagałaby rozpatrzenia dużej liczby wariantów mrożenia, zaproponowano optymalizację stopniową. Część parametrów można dobrać w sposób optymalny poprzez analizę bezwymiarową i tym samym mniej wielkości pozostaje do określenia na drodze analizy przebiegu mrożenia rzeczywistego szybu. Jako kryterium optymalizacji przyjęto maksimum efektu ekonomicznego.

Celowość opracowania kompleksowego modelu matematycznego procesu zamrażania górotworu wynika z faktu budowania szybów o coraz większej głębokości. Dotychczasowe termodynamiczne obliczenia projektowe dotyczące szybów o głębokości niezbyt dużej mają charakter uproszczony i bazują często na danych odnoszących się do przypadków już zrealizowanych. Korek-

ta obliczeń projektowych odbywa się podczas mrożenia na podstawie wyników pomiarów. Przy prognozowaniu procesu zamrażania górotworu do większych głębokości jest jednak wskazane zastosowanie dokładniejszych metod obliczeniowych. Celowe jest również bardziej precyzyjne przyjmowanie mocy agregatów oraz strumienia chłodziwa. W chwili obecnej wielkości te dobierane są w sposób nieco intuicyjny, proponowana zaś metoda optymalizacji techniczno-ekonomicznej [41] może znaleźć zastosowanie, ze względu na bardzo uproszczony charakter, jedynie w przypadku szybów o małej głębokości, przy krótkim czasie mrożenia. Sytuacja taka wynika stąd, że w dotychczasowych opracowaniach [3, 4, 16, 20+23, 32+37, 41, 44] pomija się wpływ mocy agregatów oraz strumienia chłodziwa, przez przyjęcie jego stałej temperatury, bądź też analizuje się znaczenie wymienionych czynników w sposób nieco marginesowy, bez ich ścisłego powiązania z czasem zamrażania górotworu.

WSTĘP

Analiza cieplna procesu zamrażania górotworu jest problemem złożonym ze względu na następujące fakty:

- W górotworze występuje trójwymiarowe pole temperatury z ujemnymi źródłami ciepła, którymi są rury mrozeniowe. Temperatura czynnika chłodzącego w rurze opadowej i w pierścieniowej przestrzeni międzyrurkowej zależy od głębokości i zmienia się w czasie.

- Własności cieplne skał zależą od położenia i od temperatury. Przewodność cieplna może również zależeć od kierunku ze względu na anizotropię. Poza tym przewodność λ i pojemność cieplna właściwa zmieniają się skokowo w momencie zamrażania.

- Zamrażany obszar znajduje się w ośrodku nieskończenie rozległym. Do części zamrożonej oraz oziębionej dopływa ciepło z boku, od dołu oraz od góry. Temperatura nieoziębionego górotworu jest funkcją głębokości.

- Woda zawarta w różnych warstwach może zamrażać przy różnej temperaturze. Możliwy jest również przypadek zamrażania w skończonym przedziale temperatury.

Przeprowadzenie analizy cieplnej mrożenia górotworu wymaga zatem przyjęcia założeń upraszczających. Pierwsze rozważania dotyczące tego problemu, o charakterze analitycznym [8, 21], wymagały uwzględnienia tak znacznej liczby założeń upraszczających, że rozpatrywano w rezultacie zjawiska o zmienionej postaci, których rozwiązania mają znaczenie jedynie historyczne. Przed rozpowszechnieniem maszyn cyfrowych stosowano analogi hydrauliczne [20÷23]. Analogi elektryczne nie zostały wykorzystane ze względu na brak możliwości zamodelowania procesu izotermicznej zmiany fazy. Obliczenia wykonane za pomocą analogów hydraulicznych są obarczone błędami wynikającymi z istoty działania tych urządzeń. Mimo dużej pracochłonności oraz kosztu, badania analogowe nie są możliwe przy podziale górotworu na odpowiednio małe elementy. Spośród metod numerycznych do analizy cieplnej mrożenia górotworu znalazły zastosowanie równania różnicowe oraz metoda elementów skończonych. W pracach [3, 4, 16] zastosowano równania różnicowe z ilorzadem centralnym. Iloraz ten daje najdokładniejsze wyniki, może znaleźć jednak [39] zastosowanie jedynie w zagadnieniach jednowymiarowych. Z tego względu, w wymienionych opracowaniach pomija się przepływ ciepła w kierunku pionowym oraz rozpatruje się, podobnie jak w [32÷37], pole temperatury o symetrii osiowej. Do momentu zamknięcia płaszcza mrozeniowego oś symetrii pokrywa się z osią rury. Obszar zamrożony wokół każdej rury ma wtedy taki kształt, jak w przypadku umieszczenia pojedynczej

rury w ośrodku nieskończenie rozległym. W etapie drugim osią symetrii jest oś szybu, powierzchnie izotermiczne mają zatem kształt pobocznic walca. Krąg rur mroźniowych zastąpiony zostaje izotermiczną powierzchnią o zadanej temperaturze i o kształcie walcowym. Przyjęcie takich założeń powoduje powstanie pewnego błędu przy rozpatrywaniu płaszczy mroźniowych o niezbyt dużych grubościach.

W pracy [44] zastosowano metodę elementów skończonych, przy czym rury mroźniowe zostały zastąpione izotermiczną powierzchnią walcową o znanej temperaturze. Rozpatruje się dwuwymiarowy układ osiowo-symetryczny, w którym cały czas osią symetrii układu jest oś szybu. Założenia takie są mniej zgodne z rzeczywistością niż przyjęte w pracach, w których proces mroźnienia dzieli się na dwa etapy. We wszystkich wymienionych opracowaniach rozpatruje się przypadek zamrażania pojedynczym, walcowym kręgiem rur mroźniowych.

W pracy [4] rozpatruje się zamrażanie dwoma kręgami otworów mroźniowych, przy czym też uwzględnia się jedynie promieniowy przepływ ciepła. Układ jest osiowo-symetryczny ze środkiem w osi szybu. Zakłada się dodatkowo, że płaszcz mroźniowy zaczyna powstawać już w momencie rozpoczęcia procesu chłodzenia.

Dla przypadku zamrażania jednym kręgiem rur istnieją [22, 23, 41] uproszczone wzory podające zależność pomiędzy czasem zamrażania i grubością płaszcza mroźniowego. Wzory te uwzględniają jednak jedynie część parametrów i w dodatku stosowanie ich jest w pewnych wypadkach dość kłopotliwe.

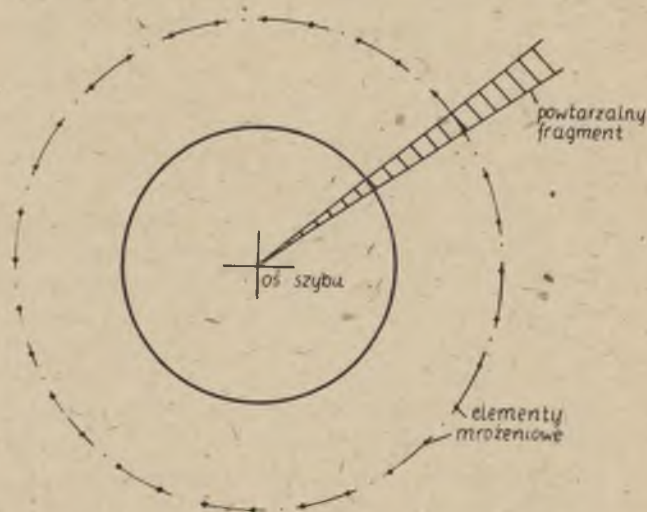
Analiza numeryczna procesów związanych ze zmianą fazy [1, 6, 10] realizowana jest, w ogólnym przypadku, za pomocą różnorodnych, dość złożonych nieraz, metod. Metody te są z reguły przystosowane do zagadnień jednowymiarowych, a ponadto niezbyt przydatne przy rozwiązywaniu zagadnień technicznych. W niniejszym opracowaniu wykorzystano równania różnicowe z ilorazem przednim. Zastosowana metoda obliczeń, pomimo swojej prostoty, umożliwia uwzględnienie dodatkowych efektów, pominiętych w omówionych pracach, dotyczących mroźnienia górotworu. Przyjęcie odpowiedniego kształtu elementów różnicowych pozwala na rozpatrzenie rzeczywistego kierunku przepływu ciepła, a tym samym pozwala na otrzymanie dość dokładnych wyników również w przypadku analizy mroźnienia podwójnym kręgiem rur. Spośród wymienionych uprzednio sposobów postępowania taką samą, a nawet większą, dokładność można osiągnąć jedynie za pomocą metody elementów skończonych, przy innym jednak podziale na elementy niż w [44]. Inny podział pociąga zaś za sobą konieczność modyfikacji sposobu postępowania przedstawionego w cytowanej pracy. Nie skorzystano z metody elementów skończonych, gdyż uzyskanie wyników dokładniejszych niż w przypadku równań różnicowych z ilorazem przednim wymagałoby, w przypadku mroźnienia kilkudziesięciu warstw, zastosowania bardzo dużej liczby węzłów, rzędu tysięcy. Potrzeba dokładnego zbilansowania entalpii zamrażania wody powoduje z kolei [44] konieczność zastoso-

wania niezbyt dużych kroków czasowych, przy czym dla każdego kroku trzeba kilkakrotnie rozwiązywać układ równań minimalizujących. Taki tok postępowania wymaga długiego czasu obliczeń za pomocą maszyny cyfrowej o dużej pamięci, korzyści zaś są stosunkowo niewielkie. Z tego powodu wykorzystano metodę elementów skończonych jedynie do orientacyjnych obliczeń pomocniczych. Metoda ta może być natomiast przydatna przy nieizotermicznej zmianie fazy [17], gdy entalpię krzepnięcia uwzględnia się poprzez przyjęcie odpowiednio zwiększonej wartości pojemności cieplnej w przedziale temperatury obejmującym przemianę fazową.

1. NUMERYCZNY MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU

1.1. Równania bilansów elementarnych

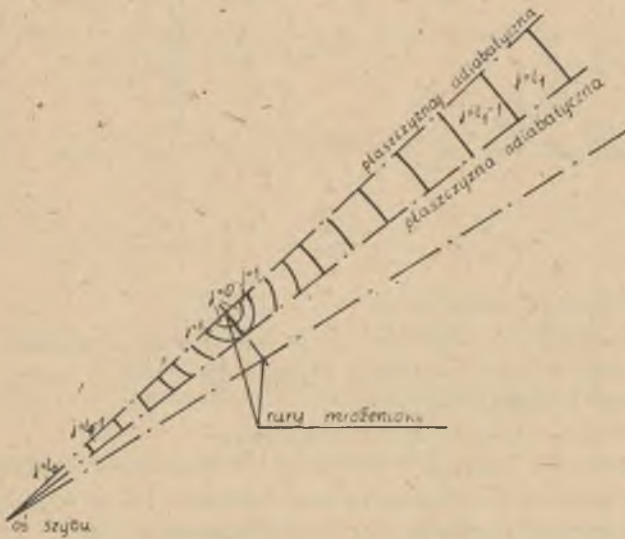
Przy zastosowaniu równań różnicowych z ilorazem przednim dogodnie jest rozpatrywać jedynie fragment górotworu. Analizę procesu mrożenia jednym kręgiem rur, pokazanych na rys. 1, przeprowadza się biorąc pod uwagę część górotworu, która jest wycinkiem walca, ograniczonym dwoma pionowymi płaszczyznami adiabatycznymi przechodzącymi przez oś szybu. Podział rozpatrywanej części górotworu na elementy różnicowe w płaszczyźnie poziomej pokazany jest na rys. 2, w płaszczyźnie pionowej zaś na rys. 3. Elementy różnicowe są więc graniastosłupami prostymi o podstawie, z wyjątkiem dwóch pośrednich elementów w każdej warstwie, będącej wycinkiem pierścienia. Środek pierścienia pokrywa się z osią rury lub z osią szybu. Taki podział górotworu na elementy wynika z przewidywanego kierunku przepływu ciepła.



Rys. 1. Zamrażanie górotworu jednym kręgiem otworów

Równania różnicowe oparto na bilansach elementarnych. Nie wyprowadzono tych zależności z równania przewodzenia ciepła [7] ze względu na złożoną geometrię. Przyjęto typowe uproszczenia, tzn. założono, że elementy są izotermiczne, pojemność cieplna każdego elementu jest skupiona w jego

środku ciężkości, ciepło zaś podczas przepływu między sąsiednimi elementami napotyka na taki opór, jak przy przewodzeniu przez jednowymiarową przegrodę. Środki ciężkości rozpatrywanych sąsiednich elementów znajdują się na ścianach granicznych tej przegrody.



Rys. 2. Podział górotworu na elementy w płaszczyźnie poziomej

Dla równań różnicowych z ilorzadem przednim przyjmuje się stałą, podczas trwania całego interwału, wartość strumienia ciepła, wyznaczoną dla chwili początkowej. Dla przypadku izotermicznej zmiany fazy równania te można ogólnie zapisać w postaci:

$$\Delta I_p = \Delta \tau \sum_q \dot{Q}_{pq} = \Delta \tau \sum_q \frac{T_{q,\tau} - T_{p,\tau}}{R_{pq}} \quad (1)$$

gdzie:

- ΔI_p - przyrost entalpii rozpatrywanego elementu p w czasie $\Delta \tau$, ujemny w przypadku mrożenia,
- \dot{Q}_{pq} - strumień ciepła dopływający do elementu p od sąsiedniego elementu q,
- R_{pq} - opór przepływu ciepła między elementami p i q,
- $T_{p,\tau}, T_{q,\tau}$ - temperatury elementów p i q na początku rozpatrywanego interwału czasu.

Przyrost entalpii ΔI_p [39] jest określony jedną z zależności:

$$\Delta I_p = \left. \begin{array}{l} V_p C_{np} (T_{p,\tau+1} - T_{p,\tau}) \quad \text{gdy } T_{p,\tau} > T_{zp}, T_{p,\tau+1} > T_{zp}, \quad (a) \\ V_p C_{np} (T_{zp} - T_{p,\tau}) - \delta V_{zp} I_{kp} \quad \text{gdy } T_{p,\tau} > T_{zp}, T_{p,\tau+1} = T_{zp}, \quad (b) \\ -\delta V_{zp} I_{kp} \quad \text{gdy } T_{p,\tau} = T_{zp}, T_{p,\tau+1} = T_{zp}, \quad (c) \\ - (V_p - V_{zp\tau}) I_{kp} + V_p C_{zp} (T_{p,\tau+1} - T_{zp}) \quad \text{gdy } T_{p,\tau} = T_{zp}, T_{p,\tau+1} < T_{zp}, \quad (d) \\ V_p C_{zp} (T_{p,\tau+1} - T_{p,\tau}) \quad \text{gdy } T_{p,\tau} < T_{zp}, T_{p,\tau+1} < T_{zp}, \quad (e) \end{array} \right\} (2)$$

gdzie:

- V_p - objętość elementu p,
- $T_{p,\tau+1}$ - temperatura elementu p na końcu kroku czasowego,
- C_{np}, C_{zp} - objętościowa pojemność cieplna właściwa w stanie niezamrożonym i zamrożonym,
- I_{kp} - objętościowa entalpia zamrażania,
- δV_{zp} - przyrost objętości zamrożonej w rozpatrywanym interwale czasu,
- $V_{zp\tau}$ - objętość strefy zamrożonej elementu p na początku interwału,
- T_{zp} - temperatura zamrażania wody w elemencie p.

Równanie (2a) słuszne jest podczas oziębiania do temperatury T_{zp} , równanie (2b) dotyczy kroku czasowego, w którym rozpoczyna się proces zamrażania. Zależność (2c) słuszna jest w dalszych interwałach aż do momentu zakończenia mrożenia. W ostatnim przedziale czasowym obejmującym okres zamrażania elementu p obowiązuje (2d), gdyż w tym okresie temperatura zaczyna obniżać się poniżej wartości T_{zp} , dla elementu zamrożonego obowiązuje natomiast bilans energii w postaci (2e).

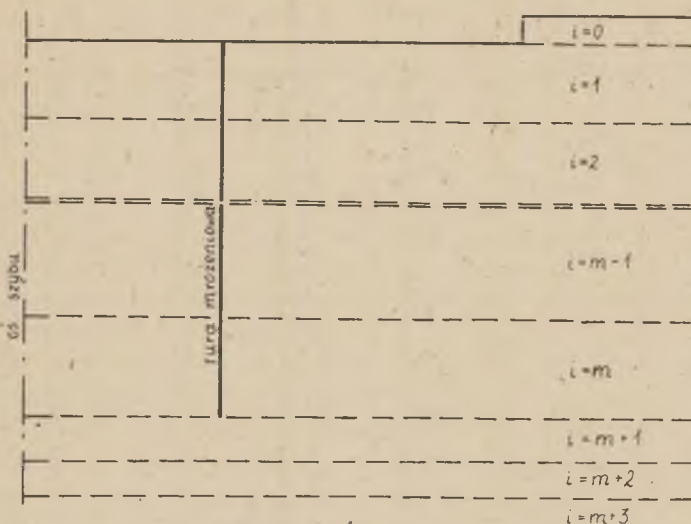
Interwał czasowy dla wszystkich elementów powinien spełniać warunek

$$\Delta \tau < \frac{V_p C_{np}}{\sum_q \frac{I}{R_{pq}}} \quad (3a)$$

Dla elementów ulegających zamrożeniu powinna być dodatkowo spełniona nierówność:

$$\Delta \tau < \frac{V_p C_{zp}}{\sum_q \frac{I}{R_{pq}}} \quad (3b)$$

Opory R_{pq} podczas zamrażania zmieniają na ogół wartość.



Rys. 3. Podział górotworu na elementy w pionie

Zależności powyższe słuszne są przy założeniach:

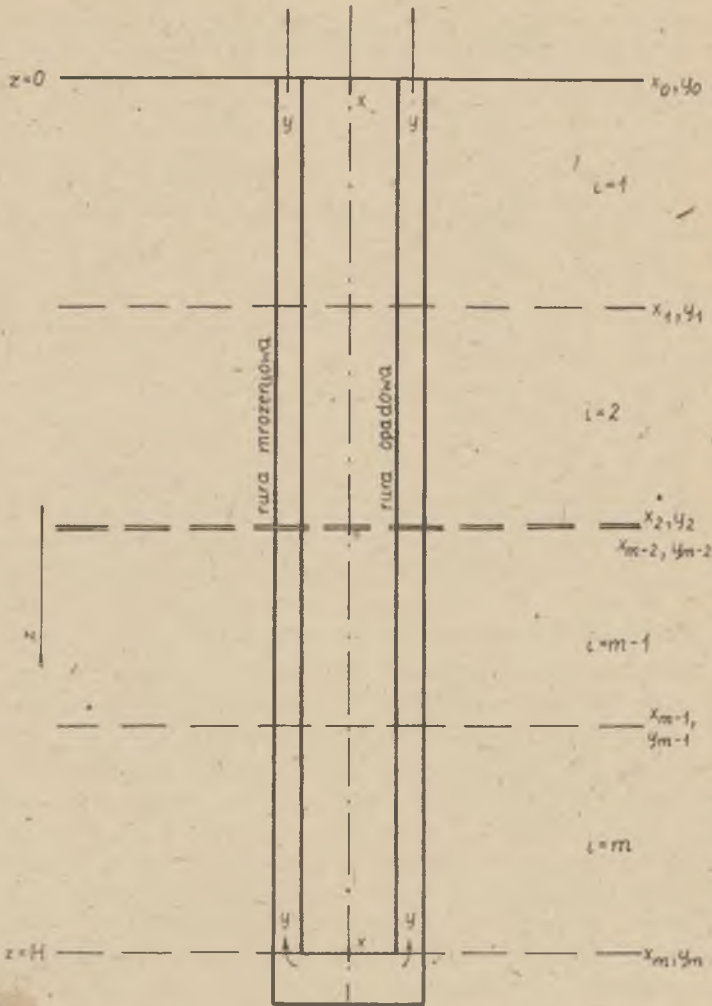
- woda krzepnie jak czysty składnik, tzn. w stałej temperaturze,
- nie występuje ruch wód podziemnych, nie występuje również przemieszczenie górotworu wywołane zmianą objętości podczas zamarzania,

Zastosowana metoda różnicowa umożliwia, w razie konieczności, uwzględnienie pominiętych efektów. Jeśli woda, w wyniku dużej zawartości substancji rozpuszczonych, krzepnie w skończonym przedziale temperaturowym, to proces zmiany fazy można potraktować jak ochładzanie przy odpowiednio powiększonej pojemności cieplnej w zakresie temperatury obejmującym zamarzanie. Drugiego z wymienionych założeń można uniknąć przez uwzględnienie w równaniu bilansu energii wyrażenia określającego unoszenie.

Podczas wykonywania obliczeń przyjęto dalsze uproszczenia, wynikające jedynie z charakteru danych. Założono, że każda warstwa ma jednorodną strukturę i że własności cieplne warstw są stałe, zmieniają się jedynie skokowo w momencie zamrożenia.

1.2. Rozkład temperatury chłodziwa

Rura mroźeniowa wraz z zawartą w niej rurą opadową tworzy pojedynczy pionowy element Fielda (rys. 4). Rozkład temperatury czynnika chłodzącego w takim elemencie oraz przyrost jego temperatury można wyznaczyć analitycznie tylko na początku procesu, gdy rura mroźeniowa styka się z górotworem o naturalnej temperaturze, zależnej od głębokości. Dla tego przypadku z bilansu energii dla strumienia wewnątrz rury opadowej i w pier-



rys. 4. Podział na elementy rury mroźeniowej i opadowej

ściennej przestrzeni międzyrurowej otrzymuje się układ równań różniczkowych:

$$\left. \begin{aligned} w \frac{dx}{dz} &= k_w (y - x), \\ -w \frac{dy}{dz} &= k_z (T_g - y) - k_w (y - x), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

przy warunkach brzegowych:

$$x \Big|_{z=0} = x_0, \quad x \Big|_{z=H} = y \Big|_{z=H}, \quad (5)$$

gdzie:

- W - pojemność cieplna strumienia chłodziwa,
- k_z, k_w - współczynniki przenikania ciepła, odniesione do jednostki długości, dla rury mrozeniowej i opadowej,
- x, y - temperatura chłodziwa w rurze opadowej i w pierścieniowej przestrzeni międzyrurkowej,
- x_0 - temperatura chłodziwa przy dopływie do rury opadowej,
- z, H - głębokość i głębokość całkowita rur,
- T_g - temperatura górotworu przy powierzchni rury mrozeniowej.

Układ równań (4) jest słuszny przy założeniach ogólnie stosowanych w teorii wymienników ciepła, tzn. gdy pomija się przewodzenie ciepła w rurze opadowej i mrozeniowej w kierunku osiowym oraz dla stanu ustalonego. W rzeczywistości występuje stan nieustalony, jednak ze względu na powolne zmiany temperatury chłodziwa oraz małą jego pojemność cieplną w stosunku do pojemności cieplnej górotworu, akumulacja ciepła przez czynnik chłodzący nie odgrywa istotnej roli. W dalszych rozważaniach przyjęto, że wielkości k_w i W mają stałą wartość oraz że wpływ końca elementu jest pomijalny. Te ostatnie założenia nie są konieczne przy różnicowym wyznaczeniu rozkładu temperatury chłodziwa. Rozwiązanie analityczne układu (4) jest słuszne ponadto jedynie dla przypadku $k_z = \text{idem}$. Rozwiązanie to, jak wspomniano, ma sens tylko na początku procesu.

Układ równań (4) dla podanych założeń daje się łatwo rozwiązać, gdy znana jest funkcja $T_g(z)$. Dla skokowych zmian T_g wzdłuż głębokości rozwiązanie podane zostało w [15]. Gdy temperatura górotworu jest określona za pomocą skończonego szeregu potęgowego o stałych współczynnikach A_i

$$T_g = \sum_{i=0}^n A_i z^i, \quad (6)$$

to rozwiązanie układu (4) z warunkami (5) przyjmuje postać

$$\left. \begin{aligned} x &= C_1 e^{\alpha_1 z} + C_2 e^{\alpha_2 z} + \sum_{i=0}^n B_i z^i, \\ y &= C_1 \left(\alpha_1 \frac{W}{k_w} + 1 \right) e^{\alpha_1 z} + C_2 \left(\alpha_2 \frac{W}{k_w} + 1 \right) e^{\alpha_2 z} + \\ &+ \sum_{i=0}^{n-1} \left[B_i + \frac{W}{k_w} B_{i+1} (i+1) \right] z^i + B_n z^n, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

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

$$B_n = A_n,$$

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

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

$$B_i = A_i - \frac{W}{k_w} (i+1) B_{i+1} + \frac{W^2}{k_z k_w} (i+2)(i+1) B_{i+2}, \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{(x_0 - B_0) \alpha_2 e^{\alpha_2 H} + \sum_{i=0}^{n-1} (i+1) B_{i+1} H^i}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}},$$

$$C_2 = \frac{- \sum_{i=0}^{n-1} (i+1) B_{i+1} H^i - (x_0 - B_0) \alpha_1 e^{\alpha_1 H}}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}}.$$

Dla temperatury górotworu zależnej liniowo od głębokości z otrzymuje się

$$B_1 = A_1, \quad B_0 = A_0 - \frac{W}{k_w} A_1. \quad (7a)$$

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

$$y|_{z=0} - x_0 = \frac{W}{k_w} (C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 + B_1) \quad (8)$$

lub

$$y|_{z=0} - x_0 = \frac{W}{k_w} \left[(x_0 - B_0) \alpha_1 \alpha_2 \frac{e^{\alpha_2 H} - e^{\alpha_1 H}}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} + \right.$$

$$+ B_1 \left(1 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} \right) -$$

$$\left. - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 e^{\alpha_2 H} - \alpha_1 e^{\alpha_1 H}} \sum_{i=1}^{n-1} (i+1) B_{i+1} H^i \right]. \quad (8a)$$

Dla przypadku liniowej zależności temperatury T_g od głębokości ostatnie wyrażenie we wzorze (8a) nie występuje.

Rozwiązanie (8) ze względu na warunek $k_z = \text{idem}$ może mieć zastosowanie praktyczne jedynie w chwili początkowej, gdy do rury mroźniowej przylega górotwór o znanej temperaturze. Współczynnik k_z uwzględnia wtedy tylko przewodzenie ciepła przez tę rurę oraz wnikanie w przestrzeni międzyrurkowej. W analizie różnicowej rozpatruje się przepływ ciepła pomiędzy chłodziwem i środkami ciężkości elementów przylegających do rury mroźniowej. Współczynnik k_z , uwzględniający wtedy też przewodzenie ciepła przez fragment górotworu o wielkości zależnej od przyjętego podziału różnicowego, jest tu zmienny w czasie i inny w każdej warstwie. Wiąże się to z przesuwaniem się granicy faz. Fakt ten narzuca konieczność stosowania metody różnicowej do wyznaczania rozkładu temperatury czynnika chłodzącego w rurze opadowej i w przestrzeni międzyrurkowej. Rury dzieli się na odcinki o długości równej grubościom poszczególnych warstw górotworu. Równania bilansu energii dla czynnika w rurze opadowej i w przestrzeni międzyrurkowej dla każdego odcinka, przy założeniach jak uprzednio oraz po pominięciu przewodzenia ciepła w rurze w kierunku obwodowym, mają postać:

$$k_w \Delta z_i \left(\frac{y_{i-1} + y_i}{2} - \frac{x_{i-1} + x_i}{2} \right) = W(x_i - x_{i-1}), \quad (9a)$$

$$\sum_1 k_{z1l} \Delta z_i (T_{i1} - \frac{y_{i-1} + y_i}{2}) = W(x_i - x_{i-1}) + V(y_{i-1} - y_i), \quad (9b)$$

gdzie:

Δz_i - grubość warstwy i ,

$x_i, x_{i-1}, y_i, y_{i-1}$ - temperatura czynnika chłodzącego w rurze opadowej i w przestrzeni międzyrurkowej na granicach warstwy i (rys. 4),

T_{i1} - temperatura elementu różnicowego l stykającego się z rurą mroźniową w warstwie i ,

k_{z1l} - współczynnik przenikania ciepła w warstwie i , na jednostkę długości rury, odniesiony do części obwodu rury mroźniowej stykającej się z elementem l .

Warunki brzegowe dla układu równań (9) mają postać:

$$x_{i-1} \Big|_{i=1} = x \Big|_{z=0} = x_0, \quad x_m = y_m. \quad (10)$$

gdzie: m - liczba warstw. W przypadku uwzględnienia wpływu dna rury mroźniowej warunek brzegowy dla końca dolnego jest określony zależnością

$$\sum_d k_{zd} \left(T_d - \frac{x_m + y_m}{2} \right) = W(y_m - x_m). \quad (10a)$$

gdzie: d - dotyczy elementu stykającego się z dnem rury mrozeniowej (T_d jest temperaturą tego elementu, k_{zd} zaś odwrotnością oporu przenikania ciepła od chłodziwa do środka tego elementu).

Układ równań (9) z warunkami (10) najwygodniej jest rozwiązywać za pomocą kolejnych podstawień, po wprowadzeniu pomocniczych stałych:

$$k_i = \frac{k_w \Delta z_i}{2W}, \quad g_i = \frac{\Delta z_i}{W} \sum_1 k_{zil} T_{il}, \quad h_i = \frac{\Delta z_i}{2W} \sum_1 k_{zil}. \quad (11)$$

Z równań (9) otrzymuje się dla $i = 1, \dots, m$

$$\left. \begin{aligned} x_i &= a_i + b_i y_{0i} \\ y_i &= c_i + d_i y_{0i} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{1}{M_i} [A_i (h_i - 1) + k_i C_i], \\ b_i &= \frac{1}{M_i} [h_i (h_i - 1) + k_i D_i], \\ c_i &= \frac{1}{M_i} [(k_i + 1) C_i - A_i], \\ d_i &= \frac{1}{M_i} [(k_i + 1) D_i - B_i], \\ M_i &= h_i (k_i + 1) - 1, \\ A_i &= k_i (c_{i-1} - a_{i-1}) + a_{i-1}, \\ B_i &= k_i (d_{i-1} - b_{i-1}) + b_{i-1}, \\ C_i &= g_i + a_{i-1} - (h_i + 1) c_{i-1}, \\ D_i &= b_{i-1} - (h_i + 1) d_{i-1}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

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

$$x_0 = x_0, \quad b_0 = c_0 = 0, \quad d_0 = 1. \quad (14)$$

Proces obliczeniowy polega na kolejnym wyznaczaniu dla $i=1, \dots, m$ pomocniczych wielkości M_i, A_i, B_i, C_i, D_i oraz a_i, b_i, c_i, d_i . Znajomość tych parametrów dla $i=m$ umożliwia, w oparciu o warunek (10), wyznaczenie temperatury chłodziwa przy wypływie ze wzoru

$$y_0 = \frac{a_m - c_m}{d_m - b_m} \quad (15)$$

Po skorzystaniu kolejno z zależności (12) i (13) wyznacza się rozkład temperatury strumienia czynnika chłodzącego w rurze opadowej i mrozeniowej.

Temperatura chłodziwa przy dopływie x_0 może być utrzymywana na stałym poziomie przy odpowiednio dużej mocy agregatów mrozeniowych, nie mniejszej niż moc cieplna odbierana od górotworu. W praktyce sytuacja taka ma miejsce po upływie określonego czasu zamrażania. W początkowym okresie mrożenia temperatura x_0 jest wyższa od minimalnej, możliwej do otrzymania, ze względu na konstrukcję agregatu mrozeniowego i rodzaj chłodziwa. Wartość x_0 stopniowo maleje, przy stałym strumieniu czynnika chłodzącego, do wartości minimalnej. Gdy moc zużyta na zmianę energii chłodziwa jest znikomo mała, w porównaniu do mocy cieplnej odbieranej od górotworu, wtedy moc odbierana od górotworu jest w każdej chwili równa mocy netto agregatów mrozeniowych. Z równości wymienionych mocy wynika temperatura x_0 :

$$x_0 = y_0 - \frac{\dot{Q}_{mr}}{n W} \quad (16)$$

gdzie:

n - liczba otworów mrozeniowych,

\dot{Q}_{mr} - moc netto agregatów mrozeniowych, zależna m.in. od temperatury y_0 .

Rzeczywista moc agregatów jest większa od mocy netto o wielkość strumieni ciepła dopływających do instalacji w rezultacie jej niedoskonałego zaizolowania oraz o całkowitą moc tarcia. Całkowita moc tarcia jest równa ilorazowi mocy cieplnej wydzielonej w wyniku oporów przepływu czynnika chłodzącego przez sprawność wewnętrzną pomp. Ciepło tarcia powoduje podwyższenie temperatury chłodziwa, lecz przyrost ten jest przy obecnie stosowanych parametrach przepływu tak mały, że nie oddziałuje na proces wymiany ciepła. Nie można jednak pominąć tarcia przy dobieraniu mocy agregatów mrozeniowych, zwłaszcza przy dużych strumieniach chłodziwa przypadających na jedną rurę mrozeniową.

1.3. Wyznaczanie oporów przepływu ciepła

Każdy opór wyrażono w postaci sumy dwóch składników. Składniki te określają opór przewodzenia ciepła od środka elementu do jego granicy. Taki sposób postępowania jest równoznaczny założeniu, iż granice elementów są izotermiczne. Wyjątek stanowią elementy stykające się z otoczeniem oraz z rurą mrozeniową. W tym przypadku jedna ze składowych jest równa

oporowi wnikania ciepła do otoczenia, względnie równa się sumie oporu przewodzenia ciepła przez rurę mroźniową i oporu wnikania ciepła do czynnika chłodzącego.

Opory przepływu ciepła w kierunku pionowym wyznaczano jak przy przewodzeniu ciepła przez przegrodę płaską. Dla połowy elementu p opór ten R_{zp} jest określony wzorem

$$R_{zp} = \frac{\Delta z_p^2}{2\lambda_p V_p} \quad (17)$$

gdzie:

Δz_p - grubość warstwy zawierającej element p,

λ_p - współczynnik przewodzenia ciepła; dla górotworu niezamrożonego

$\lambda_p = \lambda_{np}$, dla zamrożonego $\lambda_p = \lambda_{zp}$.

Wzór (17) jest słuszny dla elementu niezamrożonego lub całkowicie zamrożonego. W przypadku elementów częściowo zamrożonych odmiennie obliczono opory w warstwach $1 \div m$, odmiennie zaś w warstwie $m + 1$. W warstwach $1 \div m$ granica obszaru zamrożonego jest w przybliżeniu powierzchnią pionową. W elemencie częściowo zamrożonym ciepło płynie tu w kierunku pionowym równoległe przez część zamrożoną i niezamrożoną. Po uwzględnieniu równoległego połączenia oporów cieplnych obu tych części otrzymuje się (w chwili τ)

$$R_{zp} = \frac{0,5\Delta z_p^2}{\lambda_{np} V_p + (\lambda_{zp} - \lambda_{np}) \frac{V_p}{z p \tau}} \quad (18)$$

Inaczej obliczano opór cieplny w kierunku pionowym dla częściowo zamrożonych elementów warstwy $m + 1$. Przyjęto, że w warstwie tej granica strefy zamrożonej w każdym elemencie jest w przybliżeniu powierzchnią poziomą. Ma zatem miejsce szeregowe połączenie oporów w części zamrożonej i niezamrożonej, co dla elementów warstwy $m + 1$ daje zależność

$$R_{zp} = \frac{\Delta z_p^2}{V_p} \left[\frac{1}{2\lambda_{np}} + x \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \right] \quad (19)$$

gdzie dla górnych połówek elementów

$$x = \frac{V_{zp\tau}}{V_p}, \text{ gdy } V_{zp\tau} < \frac{1}{2} V_p, \quad x = \frac{1}{2}, \text{ gdy } V_{zp\tau} \geq \frac{1}{2} V_p, \quad (19a)$$

dla dolnych zaś:

$$x = 0, \text{ gdy } V_{zp\tau} \leq \frac{1}{2} V_p, \quad x = \frac{V_{zp\tau}}{V_p} - \frac{1}{2}, \text{ gdy } V_{zp\tau} > \frac{1}{2} V_p. \quad (19b)$$

Przy rozpatrywaniu przepływu ciepła w kierunku pionowym dodawano dwa opory wyznaczone z powyższych wzorów. Wyjątek stanowiło wnikanie ciepła od warstwy 0 lub 1 do otoczenia. Do oporu wyznaczonego z (17) lub z (18) dodawano tu opór wnikania ciepła do otoczenia z powierzchni górnej elementu $R_{\alpha p}$ równy

$$R_{\alpha p} = \frac{\Delta z_p}{\alpha_{ot} V_p}, \quad (20)$$

gdzie:

α_{ot} - współczynnik wnikania ciepła do otoczenia.

Przy obliczaniu oporów przepływu ciepła w płaszczyznach poziomych również dodawano opory przewodzenia w sąsiednich elementach od granicy między nimi do ich środków. Wyjątek stanowiło miejsce kontaktu z rurą mroźniową.

Wszystkie elementy ze względu na sposób obliczania poziomych oporów przepływu ciepła podzielono na dwie grupy. Dla pierwszej opory te wyznaczano jak dla przegrody płaskiej, dla drugiej jak dla przegrody cylindrycznej. Przyjęto, że w przypadku elementu częściowo zamrożonego położonego w warstwach 1 ÷ m opory części zamrożonej i niezamrożonej połączone są szeregowo, w warstwie zaś m + 1 równolegle.

Opór przewodzenia ciepła w kierunku poziomym R_p od środka elementu o przekroju prostokątnym do jego granicy w przypadku elementu, przez który nie przebiega granica fazy, ma postać

$$R_p = \frac{\delta_p}{2\lambda_p l_p \Delta z_p}, \quad (21)$$

gdzie:

δ_p - średnia grubość elementu p.

l_p - średnia szerokość elementu $p(\delta_p l_p \Delta z_p = V_p)$.

Współczynnik przewodzenia ciepła, podobnie jak uprzednio, przyjmuje wartość λ_{np} lub λ_{zp} .

Dla elementu prostokątnego częściowo zamrożonego położonego w warstwach 1 ÷ m obowiązuje, przy przyjętych założeniach, zależność

$$R_p = \frac{\delta_p}{l_p \Delta z_p} \left[\frac{1}{2\lambda_{np}} + x \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \right], \quad (22)$$

gdzie x spełniać musi takie same warunki jak we wzorze (19):

$$x = \min \left(\frac{V_{zp} \sigma}{V_p}; \frac{1}{2} \right) \quad (22a)$$

lub

$$x = \max\left(0; \frac{V_{zpc}}{V_p} - \frac{1}{2}\right). \quad (22b)$$

Dla strony, od której następuje zamrażanie, obowiązuje (22a), dla strony przeciwnej zaś (22b).

Wzory określające składowe opory przewodzenia ciepła w kierunku poziomym w warstwach 1 ÷ m, dla elementów o przekroju w kształcie wycinków pierścienia, przedstawiono w zestawieniu 1. W zestawieniu tym poszczególne symbole oznaczają:

- φ_p - kąt, w którym zawarty jest wycinek pierścienia,
- R_{wp} - promień wewnętrzny pierścienia,
- R_{zp} - promień zewnętrzny pierścienia,
- R_{sp} - promień średni:

$$R_{sp} = \frac{2}{3} \frac{R_{zp}^3 - R_{wp}^3}{R_{zp}^2 - R_{wp}^2}. \quad (23)$$

V_{wp} - objętość części wewnętrznej elementu p:

$$\frac{V_{wp}}{V_p} = \frac{R_{sp}^2 - R_{wp}^2}{R_{zp}^2 - R_{wp}^2}. \quad (24)$$

Dla częściowo zamrożonych elementów położonych w warstwie m + 1, po uwzględnieniu równoległego połączenia oporów części niezamrożonej i zamrożonej, otrzymuje się dla elementu o podstawie prostokątnej

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_{pn}} + \frac{2l_p}{\delta_p} (\lambda_{zp} - \lambda_{np}) \Delta z_p \frac{V_{zpc}}{V_p}} \quad (25)$$

oraz dla elementu o podstawie pierścieniowej

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_{pn}} + \frac{\varphi_p}{\ln x} (\lambda_{zp} - \lambda_{np}) \Delta z_p \frac{V_{zpc}}{V_p}}, \quad (26)$$

gdzie:

- R_{pn} - opór w elemencie niezamrożonym,
- x - stosunek promieni; $x = R_{sp}/R_{wp}$ dla oporu po stronie wewnętrznej oraz $x = R_{zp}/R_{sp}$ dla oporu po stronie zewnętrznej elementu pierścieniowego.

Opory przewodzenia ciepła w elementach pierścieniowych

		Część wewnętrzna	Część zewnętrzna
Element niezamrożony ($\lambda_p = \lambda_{np}$) lub całkowiec zamrożony ($\lambda_p = \lambda_{zp}$)		$\frac{1}{\varphi_p \lambda_p \Delta z_p} \ln \frac{R_{sp}}{R_{wp}}$	$\frac{1}{\varphi_p \lambda_p \Delta z_p} \ln \frac{R_{zp}}{R_{sp}}$
Element częściowo zamrożony	zamrażanie od wewnątrz	$\frac{1}{\varphi_p \Delta z_p} \left\{ \frac{1}{\lambda_{np}} \ln \frac{R_{sp}}{R_{wp}} + 0,5 \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{R_{zp}^2}{R_{wp}^2} - 1 \right) x \right] \right\}$ $x = \min \left(\frac{v_{zp}}{v_p}, \frac{v_{wp}}{v_p} \right)$	$\frac{1}{\varphi_p \Delta z_p} \left\{ \frac{1}{\lambda_{np}} \ln \frac{R_{zp}}{R_{sp}} + 0,5 \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \cdot \ln \left(\frac{R_{wp}^2}{R_{sp}^2} + \frac{R_{zp}^2 - R_{wp}^2}{R_{sp}^2} x \right) \right\}$ $x = \max \left(\frac{v_{wp}}{v_p}, \frac{v_{zp}}{v_p} \right)$
	zamrażanie od zewnątrz	$\frac{1}{\varphi_p \Delta z_p} \left\{ \frac{1}{\lambda_{np}} \ln \frac{R_{sp}}{R_{wp}} - 0,5 \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \cdot \ln \left(\frac{R_{zp}^2}{R_{sp}^2} - \frac{R_{zp}^2 - R_{wp}^2}{R_{sp}^2} x \right) \right\}$ $x = \max \left(1 - \frac{v_{wp}}{v_p}, \frac{v_{zp}}{v_p} \right)$	$\frac{1}{\varphi_p \Delta z_p} \left\{ \frac{1}{\lambda_{np}} \ln \frac{R_{zp}}{R_{sp}} - 0,5 \left(\frac{1}{\lambda_{zp}} - \frac{1}{\lambda_{np}} \right) \cdot \ln \left[1 - \left(1 - \frac{R_{wp}^2}{R_{zp}^2} \right) x \right] \right\}$ $x = \min \left(\frac{v_{zp}}{v_p}, 1 - \frac{v_{wp}}{v_p} \right)$

Przy rozpatrywaniu strumienia ciepła płynącego od elementu stykającego się z rurą mrozeniową do chłodziwa, opór wyznaczony na podstawie zestawienia 1 należy powiększyć o składnik R_m uwzględniający przenikanie ciepła przez rurę mrozeniową:

$$R_m = \frac{\ln \frac{D_z}{D_w}}{\varphi_p \Delta z \lambda_m} + \frac{2}{\varphi_p \Delta z D_w \alpha_z} \quad (27)$$

gdzie:

- D_w, D_z - średnica wewnętrzna i zewnętrzna rury mrozeniowej,
- λ_m - współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury mrozeniowej,
- α_z - współczynnik wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej.

Pomiędzy oporem R_m , oporem R_p dla strony wewnętrznej elementu przy rurze mrozeniowej oraz wielkościami występującymi w równaniu (9b) istnieje relacja

$$\frac{1}{k_{zp} \Delta z} = R_p + R_m \quad (28)$$

Współczynnik przenikania ciepła k_w odniesiony do jednostki długości rury opadowej wynika z zależności

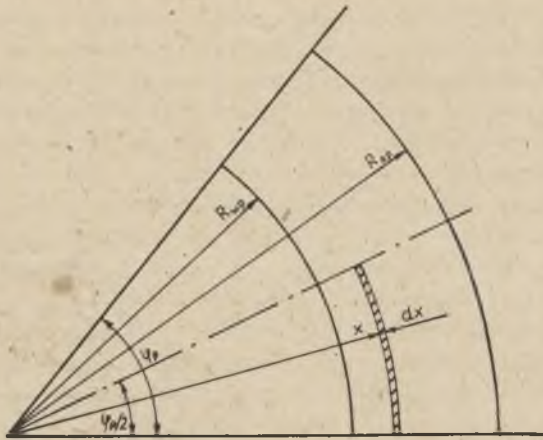
$$\frac{1}{k_w} = \frac{1}{\pi d_w \alpha_w} + \frac{\ln \frac{d_z}{d_w}}{2\pi \lambda_0} + \frac{1}{\pi d_z \alpha_z} \quad (29)$$

gdzie:

- d_w, d_z - średnica wewnętrzna i zewnętrzna rury opadowej,
- λ_0 - współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury opadowej,
- α_w - współczynnik wnikania ciepła wewnątrz rury opadowej.

Obliczenia wstępne wykazały dość znaczne różnice w temperaturze par elementów stykających się ze sobą za pośrednictwem powierzchni walcowej utworzonej przez rury mrozeniowe (przy podziale jak na rys. 2 występują dwie takie pary dla $j=0$ i $j=1$). W dalszych obliczeniach uwzględniono w związku z tym w warstwach $1 \frac{1}{2}$ m przepływ ciepła między stykającymi się elementami leżącymi po obu stronach powierzchni kręgu rur. Opór przepływu ciepła jest w tym przypadku również sumą dwóch oporów dla sąsiadujących ze sobą elementów. Dla każdego elementu opór składowy R_{kp} wynika (rys. 5) z zależności

$$R_{kp} = \frac{1}{R} = \frac{\varphi_p}{2\lambda_p \Delta z} \frac{\ln \frac{R_{zp}}{R_{wp}}}{\int_{R_{wp}}^{R_{zp}} \frac{dx}{0.5 \varphi_p x}} \quad (30)$$



Rys. 5. Wyznaczenie oporu przepływu ciepła przez powierzchnię kręgu otworów

Wzór ten jest słuszny dla elementu niezamrożonego ($\lambda_p = \lambda_{np}$) lub całkowicie zamrożonego ($\lambda_p = \lambda_{zp}$). Dla elementu częściowo zamrożonego opory części zamrożonej i niezamrożonej traktuje się jak połączone równoległe. Wynika stąd dla elementu częściowo zamrożonego zależność

$$R_{kp} = \frac{\lambda_p}{2\lambda_{np} \Delta z_p \ln \frac{R_{zp}}{R_{wp}} + (\lambda_{zp} - \lambda_{np}) \Delta z_p \ln \left[1 + \frac{v_{zp} \tau}{v_p} \left(\frac{R_{zp}}{R_{wp}} - 1 \right) \right]}, \quad (31)$$

1.4. Rezultaty obliczeń wstępnych

W celu sprawdzenia przydatności do analizy cieplnej mrożenia gorotworu równań różnicowych z ilorazem przednim, tj. równań dających schemat jawny, wykonano przykładowe obliczenia wg danych zawartych w [22, 23] i odnoszących się do szybu Z-VII, zlokalizowanego na terenie ROW-u. Przyjęto podział na warstwy jak w wymienionych pracach, jedynie dwie warstwy o największej grubości podzielono na dwie równe części każda. Rozpatrzono w związku z tym w obszarze rur mrozeniowych $m = 13$ warstw o grubościach $5 \pm 54,5$ m. Uwzględniono ponadto dwie warstwy $m + 1$ i $m + 2$ poniżej zakończeń rur.

Strumień ciepła dopływający do każdego elementu składał się na ogół z czterech strumieni składowych; dwa z nich uwzględniały przepływ ciepła w kierunku pionowym, dwa zaś w płaszczyznach poziomych. Elementy pod dnem rury pominięto. W równaniach bilansów dla elementów $j = 0$ (rys. 2) w warstwach $m + 1$ i $m + 2$ występują w związku z tym wyjątkowo trzy stru-

mienie składowe. Postępowanie takie dawało niewielki dodatkowy błąd przy znacznych korzyściach czasowych. Elementy pod rurą bowiem, zgodnie z warunkami (3), wymagają zastosowania znacznie mniejszego kroku czasowego niż pozostałe fragmenty górotworu. Trzy strumienie składowe występują również w przypadku elementów l_0 (rys. 2). Przyjęto, że naturalna temperatura górotworu występuje w całej warstwie $m + 3$, we wszystkich pozostałych zaś pojawia się ona w takiej odległości od osi szybu, iż opór przepływu ciepła od elementu l_1 (rys. 2) na zewnątrz jest równy oporowi przepływu ciepła pomiędzy elementami l_1 i $l_1 - 1$. Nad warstwą 1 występowało otoczenie o stałej temperaturze.

Podczas wykonywania obliczeń, zgodnie z istotą ilorazu różnicowego przedniego, rozkład temperatury chłodziwa wyznaczano różnicowo na początku każdego interwału czasowego w oparciu o wyniki z kroku poprzedniego. W interwale pierwszym posłużono się zależną od głębokości temperaturą naturalną górotworu. Po każdym kroku czasowym korygowano opory przepływu ciepła.

W wyniku obliczeń [24, 29] otrzymano rozkład temperatury w zamrażanym górotworze oraz położenie granicy obszaru zamarzniętego w każdej warstwie w funkcji czasu. Wyniki obliczeń porównano z fragmentarycznymi wynikami pomiarów przedstawionymi w [22, 23]. Różnice temperatury były rzędu kilku K. Ilości ciepła odprowadzone z elementów, dla których dokonano porównania, wynikające z obliczeń i z pomiarów, różniły się mniej niż o 10%. Wyniki te nie mogą być uważane za miernik dokładności metody. Jest to przede wszystkim rezultatem przybliżonej wartości niektórych danych, dysponowano np. tylko orientacyjnymi informacjami odnośnie do zawartości wody. Rzeczywisty proces różni się poza tym od przyjętego w modelu. W obliczeniach nie uwzględniono skrzywienia rur mrozeniowych oraz założono stałość temperatury chłodziwa przy dopływie do rur. Zgodnie z ogólnie przyjętą zasadą, określenie błędu metody jest w przypadku tak złożonego procesu możliwe jedynie za pomocą jeszcze dokładniejszego modelu matematycznego.

Przeprowadzone obliczenia potwierdziły przydatność przyjętej metody a jednocześnie wykazały, że przewodzenie ciepła w górotworze w kierunku pionowym odgrywa znikomą rolę. Pominięcie przepływu ciepła w tym kierunku umożliwia równocześnie nieuwzględnianie warstw 0, $m + 1$ oraz $m + 2$. W rozpatrzonym przykładzie wystąpiła widoczna różnica pomiędzy temperaturami elementów przylegających w tej samej warstwie do rury mrozeniowej po obu stronach powierzchni walcowej kręgu otworów. Wynika stąd celowość uwzględnienia przepływu ciepła w górotworze w kierunku obwodowym w stosunku do osi rur mrozeniowych, a więc przez powierzchnię walcową utworzoną przez te osie.

W dalszych obliczeniach w wyniku powyższych rezultatów rozpatrywano jedynie m warstw (rys. 3) położonych w obszarze występowania rur mrozeniowych. Nie uwzględniano przewodzenia ciepła w kierunku pionowym. Wza-

jemne oddziaływanie cieplne warstw występuje więc jedynie za pośrednictwem czynnika chłodzącego. Uwzględniono natomiast przepływ ciepła przez powierzchnię walcową, na której znajdują się osie rur mrozeniowych. W równaniach bilansów energii (1) występować zatem będą trzy strumienie ciepła w przypadku elementów przylegających do powierzchni walcowej otworów mrozeniowych, jeden strumień wystąpi w bilansach fragmentów l_0 oraz po dwa strumienie pojawią się będą w równaniach bilansów energii dla pozostałych elementów różnicowych.

Pominięcie pionowych strumieni ciepła powoduje spadek czasu obliczeń o ok. 40% oraz umożliwia znaczne skrócenie programów. Ma to istotne znaczenie, gdyż realizacja obliczeń wstępnych, za pomocą maszyny ODRA 1204, trwała blisko 5 godzin, programy są zaś stosunkowo obszerne (np. prawie 11 kb w przypadku programu wykorzystanego w p. 2). Przyjęte uproszczenie umożliwiło ponadto opracowanie programu, który służy zarówno do rozpatrywania procesu mrożenia pojedynczym lub podwójnym kręgiem otworów całego rozważanego obszaru, jak również do analizy procesu zamrażania górnych warstw za pomocą podwójnego, dolnych zaś za pomocą pojedynczego kręgu otworów mrozeniowych. Z programu tego skorzystano przy wykonywaniu obliczeń opisanych w p. 2. Pominięcie pionowych strumieni ciepła pozwala również na rozpatrywanie pojedynczej warstwy po przyjęciu dodatkowych założeń jak w p. 3.

2. WYNIKI OBLICZEŃ DLA WYBRANYCH SZYBÓW

2.1. Zamrażanie jednym kręgiem otworów mrozeniowych

Przedstawioną metodę różnicową wykorzystano do analizy cieplnej mrożenia jednym kręgiem rur górotworu o parametrach podanych w zestawieniu 2. Rozpatrzono 10 warstw górotworu w obszarze O \pm 260 m.

Na okręgu o średnicy 13 m znajdują się 33 pionowe rury umieszczone w równych odstępach. Średnice rur zewnętrznych wynoszą 168/149 mm, wewnętrznych opadowych zaś 90/79,8 mm. Przyjęto, że przez jeden element przepływa strumień chłodziwa (wodny roztwór CaCl₂) o pojemności cieplnej 39,8 $\frac{\text{kW}}{\text{K}}$. Założono, że współczynniki wnikania ciepła w rurze opadowej i w pierścieniowej przestrzeni międzyrurowej wynoszą odpowiednio 1500 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ i 653 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$. Dla materiału obu rodzajów rur przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła 40 $\frac{\text{W}}{\text{m} \text{K}}$.

Na rys. 6 pokazano zastosowany podział powtarzalnego fragmentu górotworu na elementy w płaszczyźnie poziomej. Zamknięcie płaszcza mrozeniowego następuje po całkowitym zamrożeniu elementów $j = 1$.

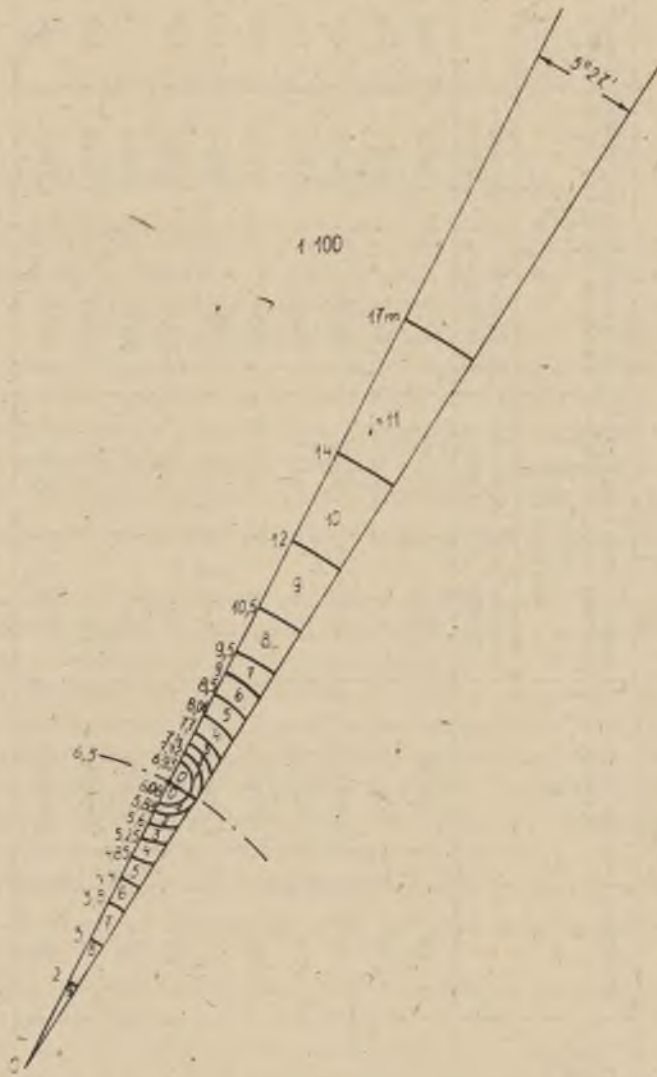
Obliczenia wykonano dla pięciu wariantów danych związanych z charakterem pracy agregatów mrozeniowych, przyjmując temperaturę zamrażania wody w każdej warstwie równą 0°C. W celu zbadania wpływu tej temperatury, znanej w praktyce często niezbyt dokładnie, wykonano dodatkowe obliczenia dla takich samych warunków mrożenia jak w wariantcie A, zakładając temperaturę zamrażania wody równą w każdej warstwie - 2°C.

W rozpatrywanych wariantach przyjmowano:

- 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 - maksymalna moc netto agregatów mrozeniowych przypadająca na jedną rurę jest stała i wynosi 45,2 kW/rurę niezależnie od temperatury chłodziwa; minimalna temperatura czynnika chłodzącego jest równa - 30°C,
- D - maksymalna moc netto agregatów mrozeniowych przypadająca na jedną rurę jest stała i wynosi 33,9 kW/rurę niezależnie od temperatury chłodziwa; minimalna temperatura czynnika chłodzącego jest równa - 30°C,
- E - maksymalna moc netto agregatów mrozeniowych przypadająca na jedną rurę mrozeniową wynosi 33,9 kW/rurę przy temperaturze chłodziwa nie niższej niż -30°C. Moc ta zmienia się następnie liniowo wraz z temperatu-

Parametry termiczne górotworu 1

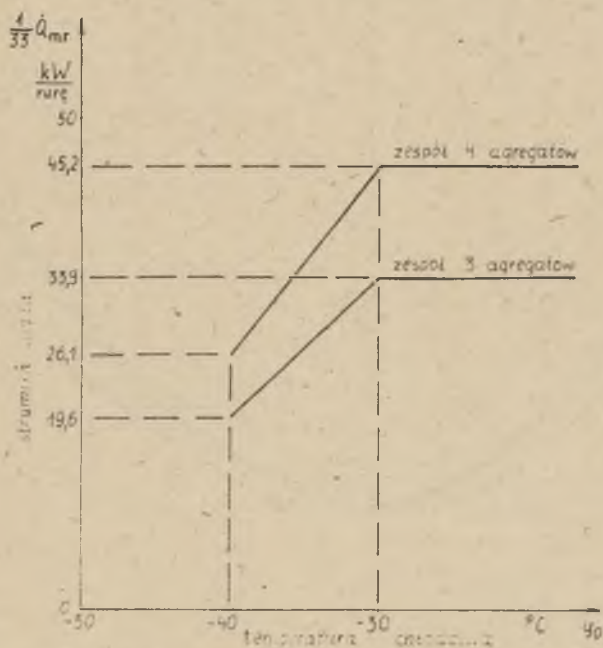
Numer war- stwy	Temperatura naturalna górotworu °C	Grubość m	Obszar wystę- powania m	Współczynnik przewo- dzenia ciepła góro- tworu W/(m K)		Objętościowa pojemność cieplna właściwa góro- tworu kJ/(m ³ K)		Zawar- tość wil- goci kg/m ³
				niezamro- zonego	zamrozo- nego	niezamro- zonego	zamrozo- nego	
1	8,7	10	0+10	1,5	1,75	3737	2607	550
2	9,3	105	10+115	1,2	2,2	3217	2327	400
3	9,1	30	115+145	1,6	2,8	2958	2136	400
4	9,3	10	145+155	0,6	1,2	2430	2101	160
5	9,2	30	155+185	1,3	1,74	2798	2140	320
6	9,2	20	185+205	1,7	1,8	2362	2054	150
7	9,2	25	205+230	1,1	2,3	2514	2082	210
8	9,1	20	230+250	0,8	1,5	2574	2225	170
9	9,3	5	250+255	0,8	1,6	1829	1541	140
10	9,3	5	255+260	1,3	2,1	2499	1986	250



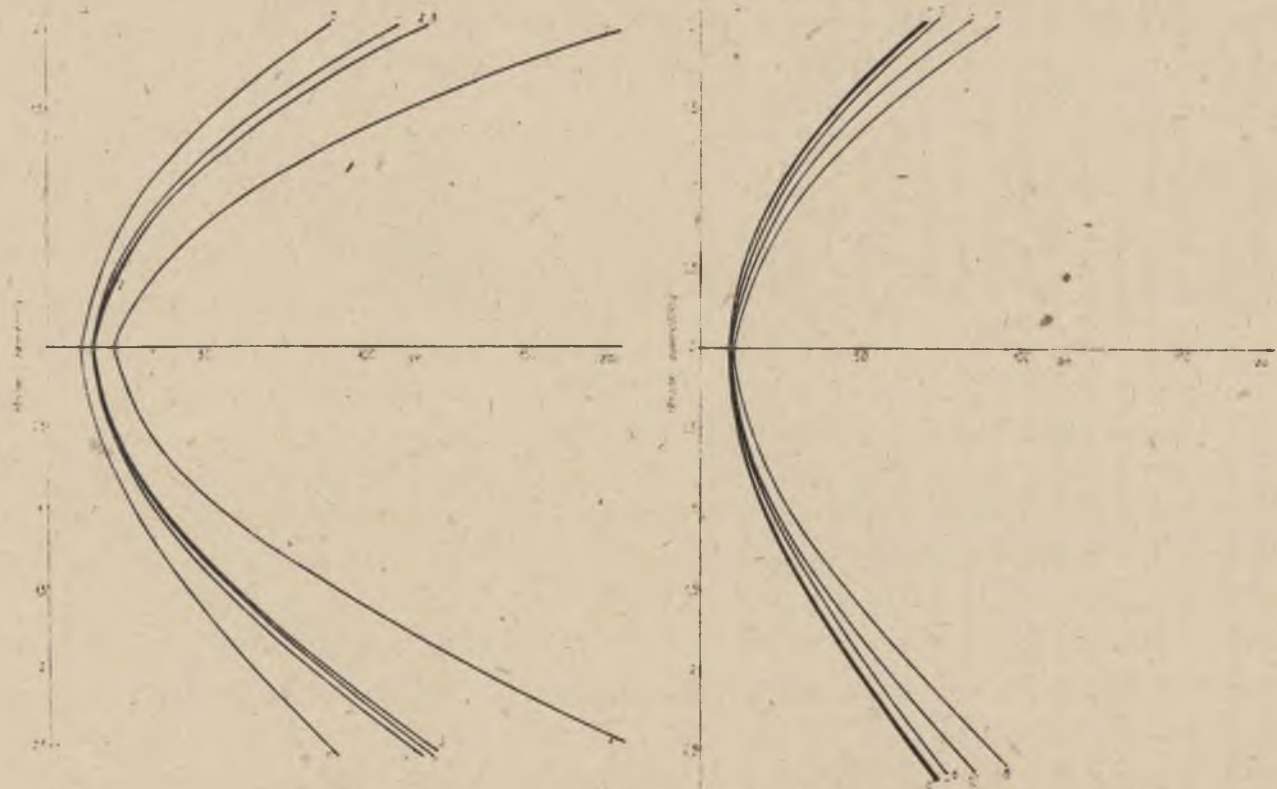
Rys. 6. Podział na elementy powtarzalnego fragmentu górotworu 1

rażę czynnika chłodzącego dopływającego do agregatów i wynosi 19,6 kW/rurę przy minimalnej temperaturze chłodziwa równej - 40°C.

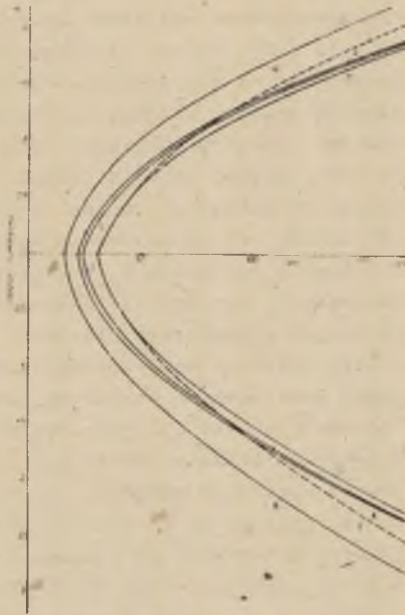
Warianty A i B odpowiadają sytuacji, gdy moc netto agregatów mroźniowych jest tak duża, iż umożliwia utrzymanie stałej temperatury chłodziwa dopływającego do elementów mroźniowych. W wariantach C, D i E przyjęto uproszczoną charakterystykę agregatów mroźniowych pokazaną na rys. 7. Charakterystyka ta podaje zależność pomiędzy strumieniem ciepła pobranym od chłodziwa w parowaczu \dot{Q}_{mr} i temperaturą tego czynnika przy dopływie do parowacza równą, z dużą dokładnością, temperaturze chłodziwa γ_0 wpływającego z rury mroźniowej. Zastosowana charakterystyka, podobnie jak krzywe przedstawione na rys. 17, dotyczy największych stosowanych aktualnie w Polsce agregatów przy mrożeniu górotworu. 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. Górna charakterystyka odpowiada przypadkowi zainstalowania 4 agregatów mroźniowych o wydajności maksymalnej netto 373 kW każdy, co jest równoznaczne mocy 45,2 kW/rurę. Dolna łamana dotyczy 3 agregatów o tej samej wielkości. Ograniczenie minimalnej temperatury chłodziwa wynika z jego własności.



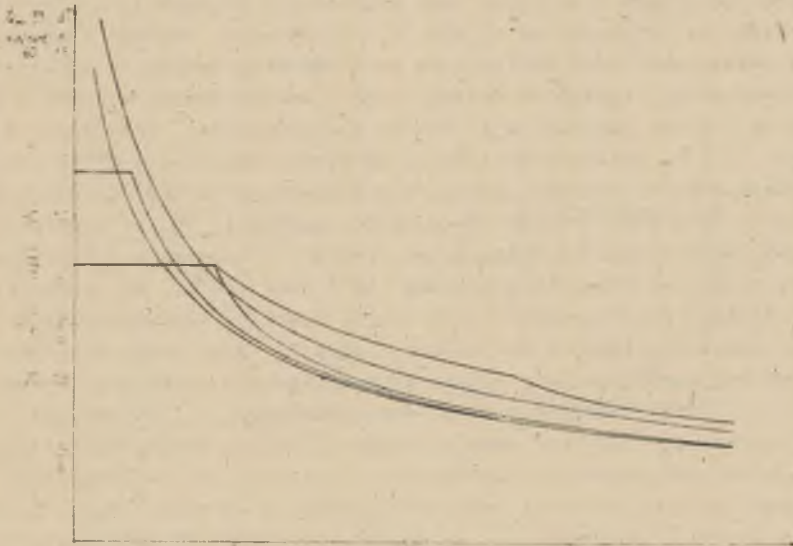
Rys. 7. Charakterystyki pracy agregatów mroźniowych



Rys. 8. Granice obszaru zamrożonego w funkcji czasu mrozenia
 a) w warstwach 1-5 w wariancie A, b) w warstwach 6-10 w wariancie A



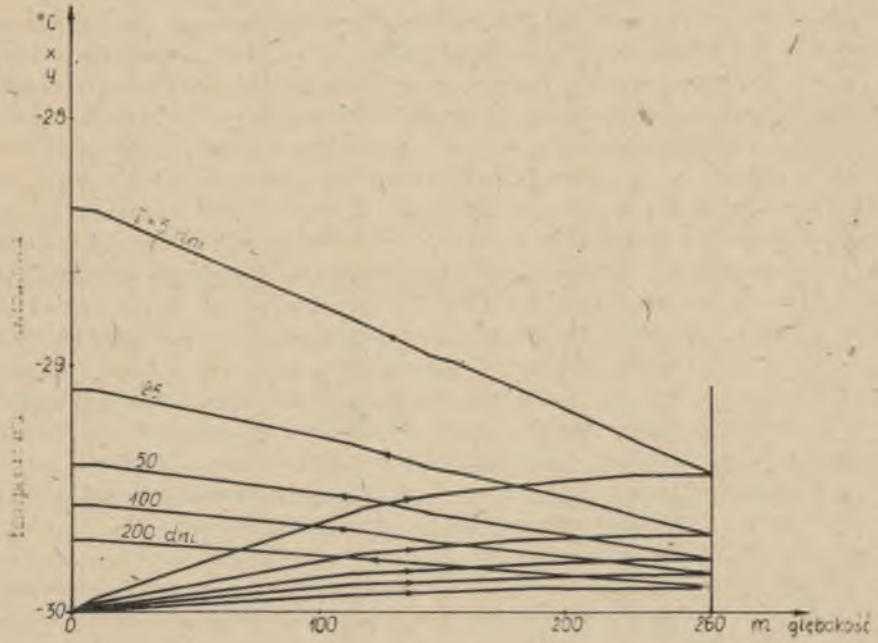
Rys. 8. Granice obszaru zamrożonego w funkcji czasu mrożenia c) w warstwie 1 w wariantach A-E



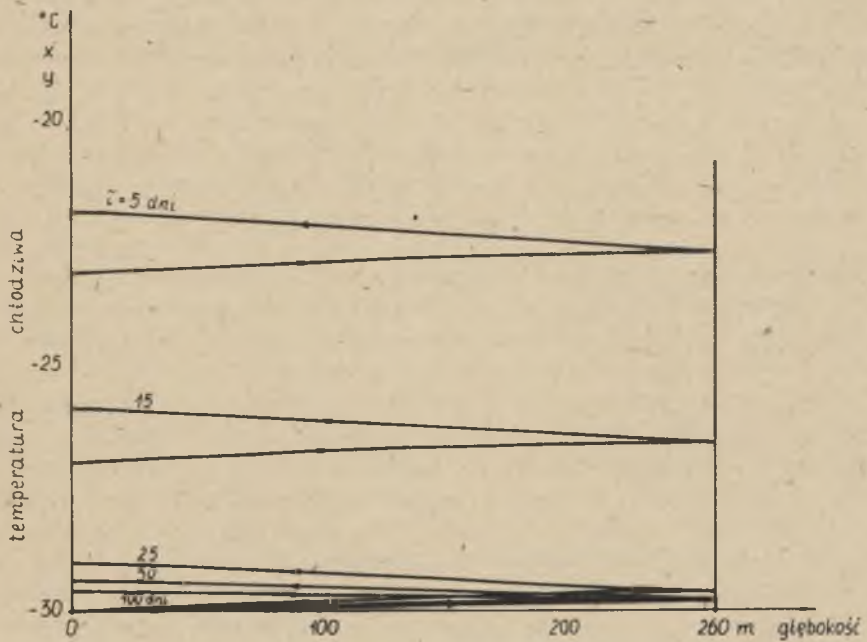
Rys. 9. Przyrost temperatury ΔT chłodziwa podczas przepływu przez element mrozący oraz moc cieplna $q_{0/33}$ odbierana od gorotworu w jednym otworze w funkcji czasu mrożenia

W oparciu o wyniki przeprowadzonych obliczeń wykonano wykresy przedstawione na rys. 8, 9, 10 i 11 [28]. Na rys. 8 zaznaczone są granice obszaru zamrożonego w przypadku A we wszystkich warstwach oraz w warstwie 1 dla wariantów A-E. Minimalną grubość płaszcza mroźeniowego w danej chwili przedstawia pionowy odcinek zawarty pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi. Oś czasu dzieli taki odcinek na dwie części - górna przedstawia grubość płaszcza mroźeniowego na zewnątrz, dolna wewnątrz kręgu otworów mroźeniowych. Z rysunku 8c wynika, że ograniczenie mocy agregatów mroźeniowych do wartości przyjętej w wariantcie C nieznacznie zwiększa czas mrożenia w stosunku do wariantu A. Wyraźne zwiększenie czasu mrożenia, zwłaszcza przy wymaganych małych grubościach płaszcza mroźeniowego, występuje w wariantcie D. Duży wpływ na czas mrożenia ma minimalna temperatura czynnika chłodzącego. Zastosowanie chłodziwa umożliwiającego obniżenie tej temperatury od -30°C do -40°C , jak wynika z przebiegu krzywych B i E, daje znaczne korzyści czasowe. Wariant E, w odniesieniu do warstwy 1, zapewnia uzyskanie większych grubości płaszcza mroźeniowego niż wariant C po czasie mrożenia dłuższym od 86 dni, mimo iż wariant C przewiduje zastosowanie większej o 1/3 liczby agregatów. Z rys. 8c wynika niecelowość instalowania tu więcej agregatów niż 4. Z kolei dalsze ograniczenie mocy stacji, tzn. użycie 2 agregatów mroźeniowych, znacznie wydłużyłoby czas zamrażania i z tego powodu wariantu tego, jako nie mającego praktycznego uzasadnienia, nie rozpatrzono.

Przyrost temperatury czynnika mroźącego oraz moc cieplna odbierana w jednym otworze, równa iloczynowi tego przyrostu i pojemności cieplnej strumienia chłodziwa, pokazane są na rys. 9. Utrzymanie stałej temperatury czynnika chłodzącego przy dopływie do rury opadowej wymaga, w początkowym okresie zamrażania, agregatów mroźeniowych o bardzo dużych mocach. W celu oszacowania relacji pomiędzy tymi mocami a wielkościami przyjętymi w wariantach C, D i E, wykonano obliczenia za pomocą zależności (7) i (8). Dla początkowego momentu procesu, gdy z rurą mroźeniową styka się górotwór o temperaturze naturalnej równej $T_g = (8,7 + 0,0023 z)^{\circ}\text{C}$, otrzymano przyrosty temperatury czynnika chłodzącego równe 27,3 K oraz 34,3 K przy temperaturze chłodziwa przed rurą opadową -30°C oraz -40°C . Są to wartości znacznie większe od przyrostów 1,136 K oraz 0,852 K odpowiadających sumarycznym mocom przyjętym w wariantach C oraz D. Mimo tych dysproporcji maksymalna moc agregatów jest wykorzystywana jedynie przez dość krótki okres czasu: 17 dni w wariantcie C, 42 dni w przypadku D. Po upływie tego czasu w wariantach C i D moc cieplna odbierana od górotworu jest mniejsza od maksymalnej mocy agregatów mroźeniowych, temperatura zaś chłodziwa dopływającego do rury opadowej przyjmuje minimalną wartość. Nieco inaczej przebiega proces w wariantcie E, ze względu na możliwość dalszego obniżenia temperatury czynnika chłodzącego przy równoczesnym spadku mocy agregatów. Temperatura ta jeszcze przez dość długi okres czasu (do 133 dni mrożenia) kształtuje się na takim poziomie, że moc cieplna odbierana od górotworu jest równa mocy netto agregatów mroźeniowych.



Rys. 10. Zmienność temperatury chłodziwa przy zamrażaniu wg wariantu A



Rys. 11. Zmienność temperatury chłodziwa przy zamrażaniu wg wariantu C

Obliczenia mające na celu zbadanie wpływu temperatury zamarzania wody, wykonane dla temperatury tej równej -2°C oraz dla danych jak w wariantcie A wykazały, że ma ona znaczny wpływ na wyniki obliczeń i tym samym pożądana jest jej znajomość z dużą dokładnością.

Moc agregatów zaznaczone na rys. 7 są mocami netto. Agregaty mrozeniowe w rzeczywistym procesie muszą zapewnić odebranie od chłodziwa oprócz ciepła oddanego przez górotwór (rys. 9) również ciepła tarcia oraz ciepła dopływającego do czynnika z otoczenia. Całkowita moc agregatów powinna być zatem odpowiednio większa. Moc ciepła tarcia na sam proces wymiany ciepła z górotworem nie ma wpływu w rozpatrywanym przypadku, gdyż wynosi ona $5,54 \text{ kW/rurę}$, co odpowiada przyrostowi temperatury chłodziwa o $0,139 \text{ K}$.

Rys. 10 i 11 pokazują przebieg temperatury czynnika w rurach opadowych (dolne części krzywych) i w przestrzeni międzyrurowej, dla wybranych momentów czasu, w wariantach A i C. Ze względu na stosunkowo małą głębokość nie występuje w obrębie rur maksimum górnych krzywych. Ekstremum to, znane w klasycznych elementach Fielda [11, 12], pojawiło się natomiast przy rozpatrywaniu, nie omawianego w pracy, przypadku zamrażania górotworu rurami o długości 598 m .

Metoda różnicowa umożliwia wyznaczenie ilości Q_{mr} ciepła odebranego od górotworu podczas procesu mrożenia trwającego przez określony czas. Wielkość tę można wyznaczyć przez dodanie ilości ciepła pobranego od każdego z elementów. Ilość ta jest sumą ciepła odebranego podczas oziębiania elementu oraz ewentualnie podczas zamrażania i następnie ochładzania do temperatury niższej od temperatury zamarzania wody. Sposób ten umożliwia określenie ilości ciepła odebranego od każdej warstwy. Prostsza metoda polega na obliczeniu całki względem czasu τ :

$$Q_{mr} = \int_0^{\tau} \dot{Q}_{mr} d\tau. \quad (32)$$

Moc cieplna \dot{Q}_{mr} odbierana od górotworu jest iloczynem przyrostu temperatury chłodziwa, pojemności cieplnej jego strumienia przypadającej na jedną rurę oraz liczby otworów mrozeniowych. Dla jednej rury mrozeniowej ilość ciepła odebranego od górotworu przedstawia pole pod krzywą na rys.9.

Ilość ciepła odebraną od górotworu określono dla czasu, po którym płaszcz mrozeniowy osiąga w warstwie 1 grubość 3 m . Ilość ta, wyznaczona przez numeryczne obliczenie całki (32), wynosi w wariantach A i E $8510 \pm 20 \text{ GJ}$. Różnice pomiędzy wynikami osiągniętymi dla rozpatrywanych pięciu przypadków są bardzo małe. Wielkość Q_{mr} nie zależy zatem od sposobu prowadzenia procesu zamrażania górotworu. Istotny wpływ na tę ilość ciepła ma natomiast temperatura zamarzania wody. Obliczenia przeprowadzone dla danych jak w przypadku A przy $T_z = -2^{\circ}\text{C}$ dały $Q_{mr} = 9100 \text{ GJ}$.

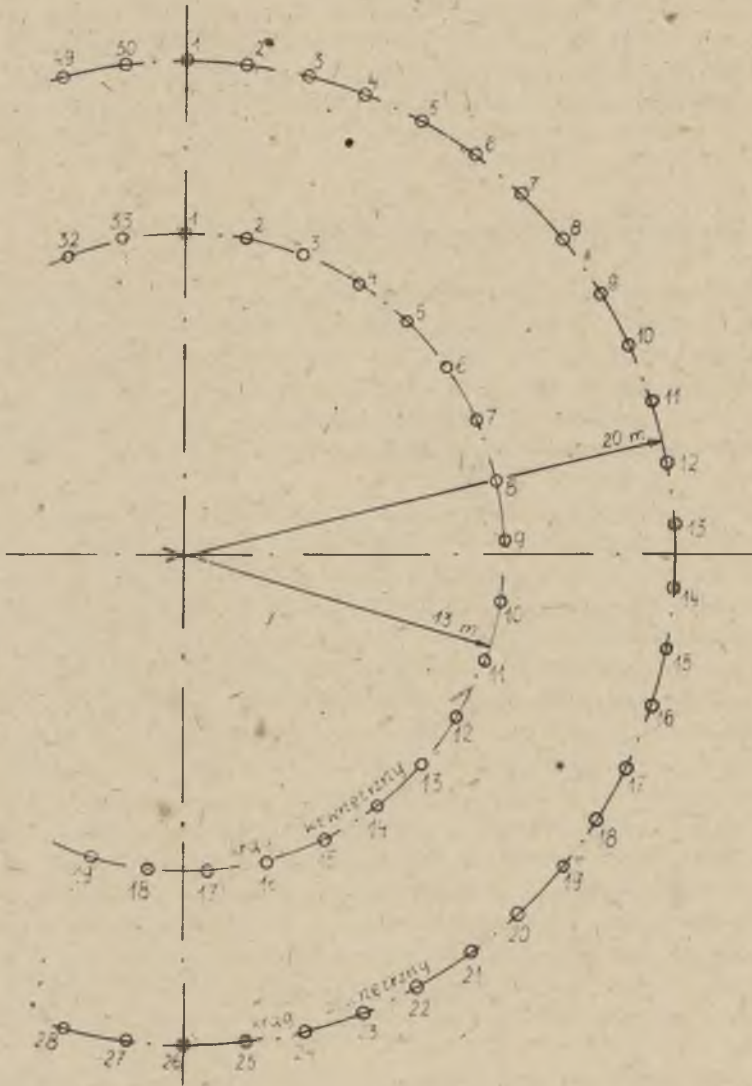
Dla wariantu B, dla czasu $\tau = 65$ dni, wyznaczono ciepło Q_{mr} w oparciu o wzór (32) oraz z bilansu wszystkich elementów różnicowych. Otrzymało odpowiednio 7740 GJ i 7820 GJ (ok. 1% różnicy), przy czym 45% = 1% ciepła pobranego przez chłodziwo w każdej warstwie zostało oddane przez elementy położone wewnątrz powierzchni walcowej kręgu otworów mroźniowych.

2.2. Zamrażanie dwoma kręgami otworów mroźniowych

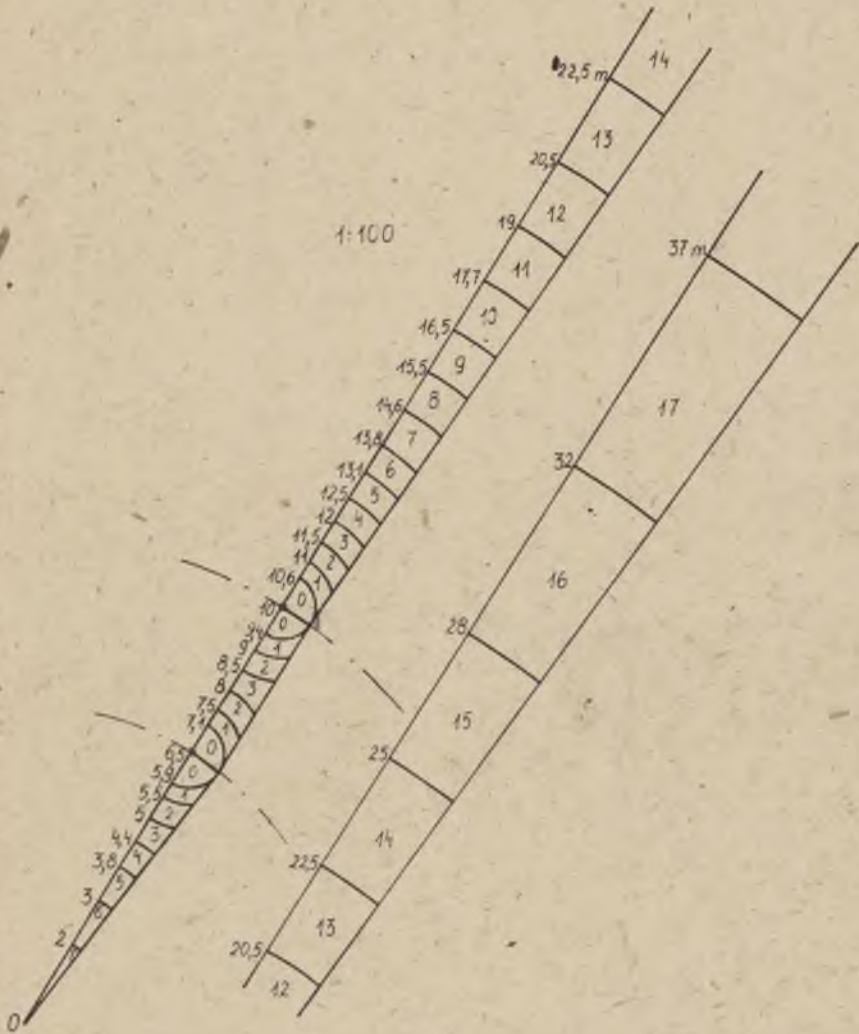
W celu zbadania przebiegu procesu zamrażania w przypadku istnienia dodatkowego kręgu rur, wykonano obliczenia dla danych jak w wariantcie A oraz przy założeniu, że istnieje drugi krąg o średnicy 20 m zawierający 50 elementów mroźnych (rys. 12). Elementy te mają takie same parametry pracy jak w kręgu wewnętrznym, m.in. temperaturę chłodziwa przy dopływie do rur opadowych elementów zewnętrznych przyjmowano również stałą, równą -30°C .

Rozpatrywanie powtarzalnego fragmentu górotworu jest możliwe tylko przy jednakowej liczbie otworów w obu kręgach. Sytuacja taka występuje w p. 2.3. W przypadku różnej liczby otworów zachodzi potrzeba postępowania przybliżonego, w celu uniknięcia rozpatrywania całego obszaru. W obliczeniach uwzględniono fragment jak na rys. 13, który ograniczony jest elementami pionowych płaszczyzn przechodzących przez oś szybu oraz pionowym prostokątem, którego poziomy bok przebiega między środkami odcinków łączących sąsiednie otwory obu kręgów. Takie postępowanie jest równoznaczne założeniu, że pomiędzy kręgami istnieje w pewnym miejscu walcowa powierzchnia adiabatyczna. Każdemu otworowi przypisany jest w przestrzeni międzykręgowej obszar, którego przekrojem poziomym jest wycinek pierścienia. Powierzchnie rozdzielające te obszary są też adiabatyczne. Fragment jak na rys. 13 otrzymuje się po zastąpieniu, w miejscu najbardziej oddalonym od otworów, łamanej powierzchni adiabatycznej powierzchnią prostokątną. W rozpatrywanym przypadku jest to też równoznaczne założeniu, iż walcowa powierzchnia adiabatyczna między kręgami przebiega w takim miejscu, że każdemu otworowi przypisany jest obszar o jednakowej, dla obu kręgów, objętości.

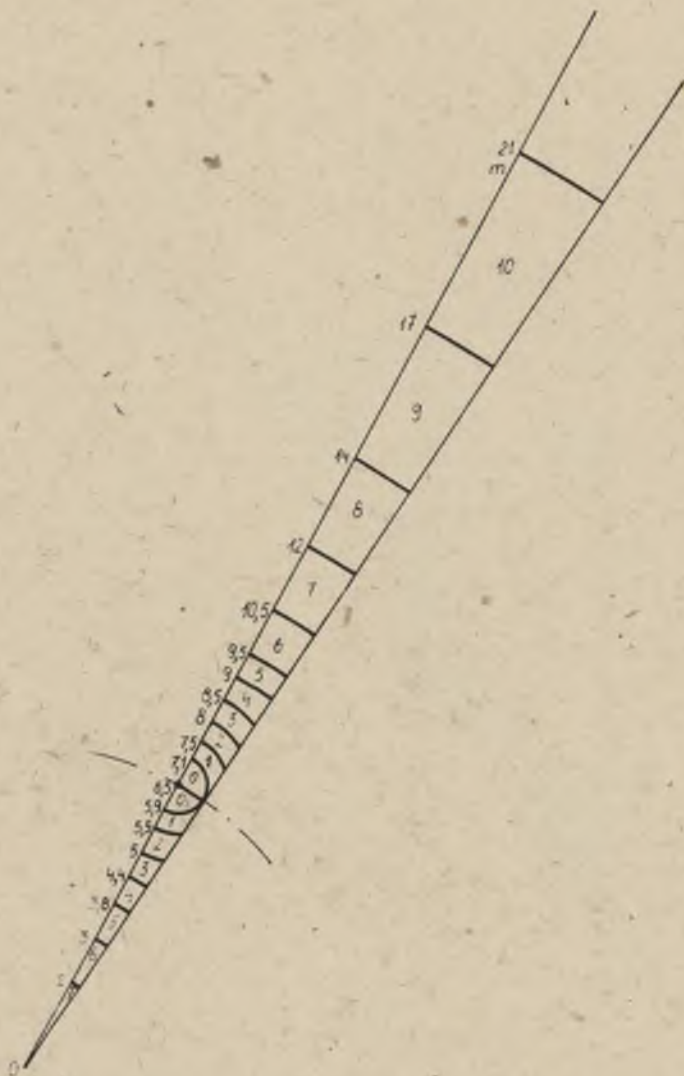
Zastosowany podział rozpatrywanego fragmentu górotworu w płaszczyźnie poziomej na elementy różnicowe przedstawia rys. 13. W celu uzyskania porównywalnych wyników wykonano dodatkowe obliczenia dla danych jak w wariantcie A lecz przy podziale pokazanym na rys. 14. W rezultacie obliczeń otrzymano przebieg granic obszaru zamrożonego pokazany, dla warstwy 1, na rys. 15 [30]. Krzywe górne dotyczą kręgu zewnętrznego, dolne zaś kręgu wewnętrznego. Obszar zamrożony przedstawia na wykresie pole pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi. Pionowe odcinki zawarte w tym polu pomiędzy krzywymi tworzącymi parę określają grubość w danej chwili płaszcza mroze-



Rys. 12. Rozmieszczenie otworów mroźniowych

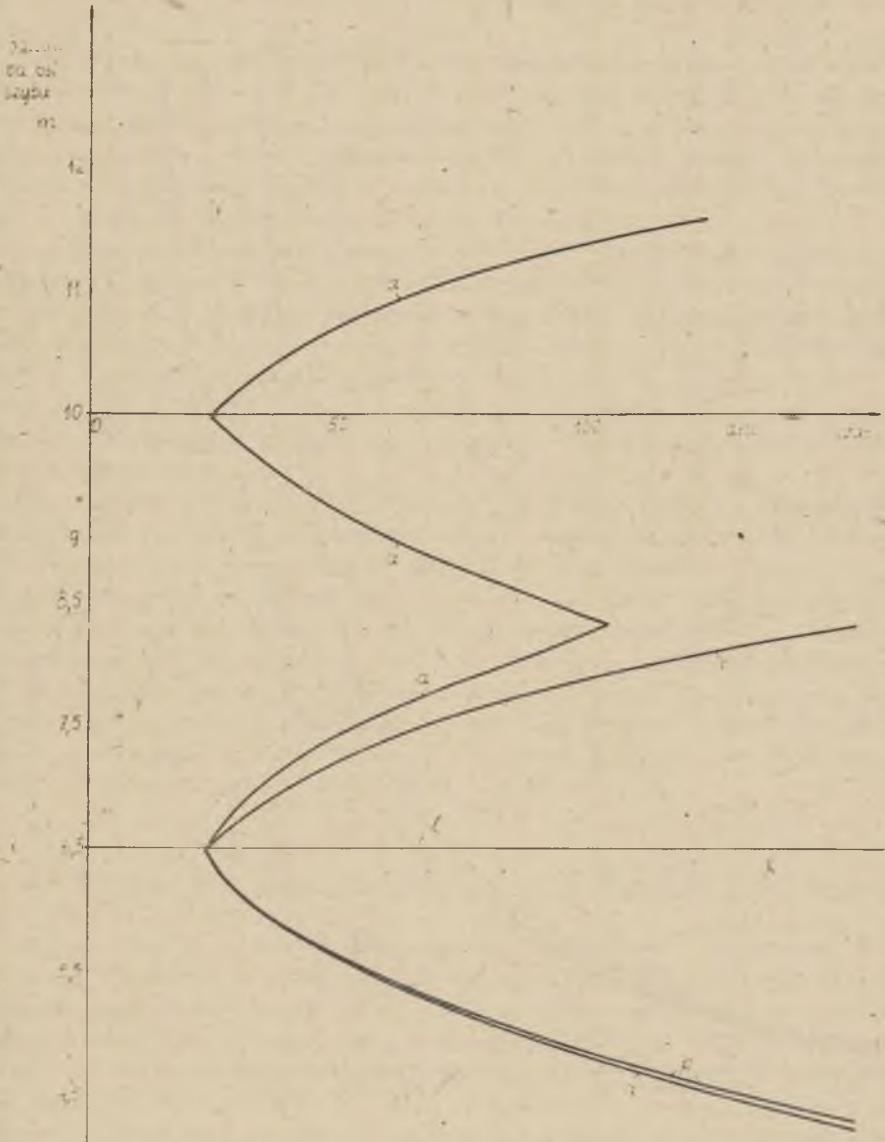


Rys. 13. Podział górotworu 1 na elementy różnicowe przy zamrażaniu dwoma kręgami otworów

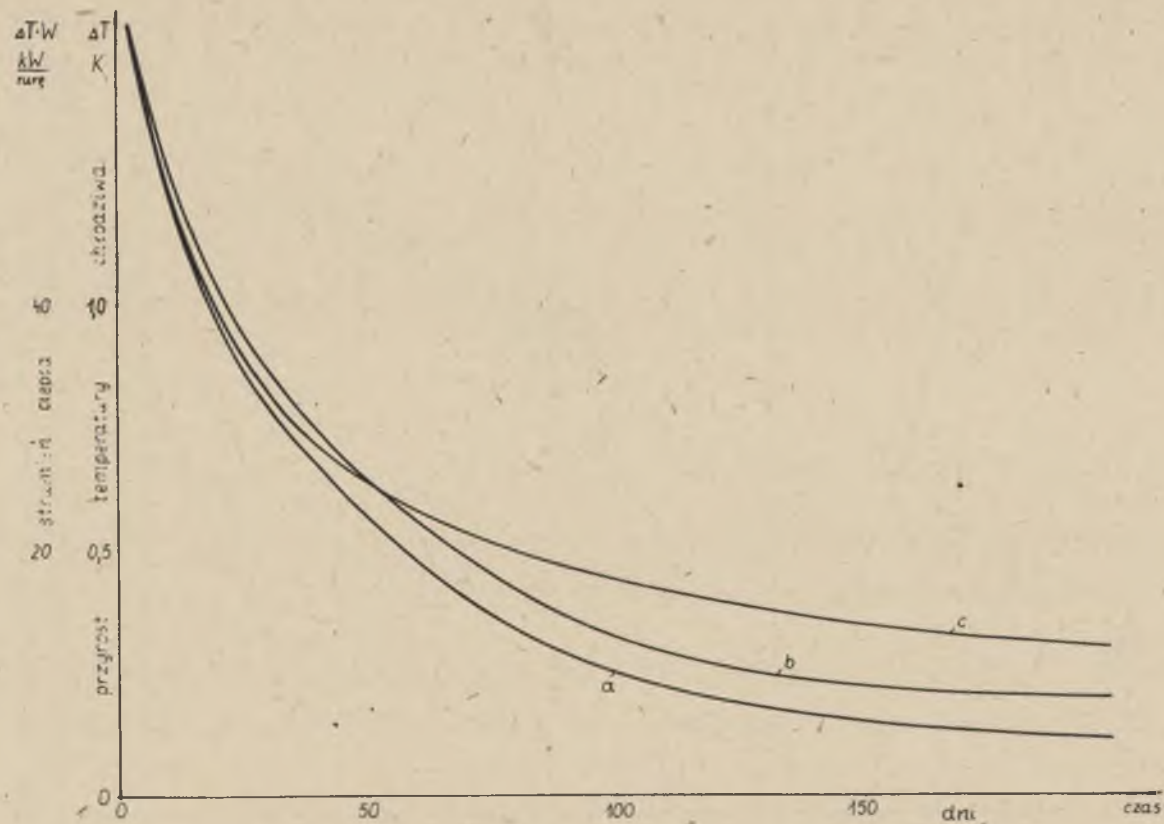


Rys. 14. Podział górotworu 1 na elementy różnicowe przy zamrażaniu jednym kręgiem otworów (obliczenia dodatkowe)

niowego. Z rys. 15 wynika, że zamknięcie w warstwie 1 płaszcz mroźniowego narastającego wokół rur ma miejsce po 25 dniach w kręgu zewnętrznym oraz po 23 dniach w kręgu wewnętrznym. Całkowite zamrożenie przestrzeni między kręgami w warstwie 1 następuje po 105 dniach mrożenia dwoma kręgami otworów i całkowita grubość płaszcz mroźniowego wynosi wtedy 6,6 m, a więc nieco mniej niż dwukrotna odległość pomiędzy kręgami. Przy zamra-



Rys. 15. Granice obszaru zamrożonego w warstwie 1
a) zamrażanie dwoma kręgami otworów, b) zamrażanie jednym kręgiem otworów
(obliczenia dodatkowe)



Rys. 16. Przyrost temperatury czynnika chłodzącego ΔT

- a) mrozenie dwoma kręgami otworów, krąg wewnętrzny, b) mrozenie dwoma kręgami otworów, krąg zewnętrzny,
 c) mrozenie wyłącznie kręgiem wewnętrznym (obliczenia dodatkowe)

zaniu jedynie kręgiem wewnętrznym grubość płaszczka wynosi tu po tym samym czasie mrożenia 3,1 m. Mrożenie dwoma kręgami umożliwia więc szybkie osiągnięcie płaszczka o dużej grubości, nawet w przypadku warstw silnie zawodnionych.

Nieco inny w obu przypadkach przebieg granicy obszaru zamrożonego wewnątrz kręgu wewnętrznego jest spowodowany głównie [30] różnymi strumieniami ciepła przepływającego przez powierzchnię walcową tego kręgu.

Przyrost temperatury chłodziwa oraz moc cieplna odbierana w jednym elemencie od górotworu pokazane są na rys. 16. Pojemność cieplna strumienia czynnika W wynosi każdorazowo $39,8 \frac{\text{kW}}{\text{K} \cdot \text{rure}}$.

Porównanie wyników otrzymanych po przyjęciu podziałów różnicowych przedstawionych na rys. 6 i na rys. 14 wykazuje, że przy podziale na elementy drobniejsze czas mrożenia potrzebny do uzyskania płaszczka mrożeniowego o założonej grubości jest krótszy, przy czym różnica jest niewielka (poniżej 1% w przypadku płaszczka o grubości 3 m). Dzieje się tak mimo faktu, że przy podziale jak na rys. 14 w pobliżu rury mrożeniowej, a więc w miejscu występowania największych gradientów temperatury, elementy różnicowe są stosunkowo duże.

Dla procesu zamrażania dwoma kręgami, po czasie 105 dni, potrzebnym do całkowitego zamrożenia przestrzeni między kręgami we wszystkich warstwach (warstwa 1 zamarza najwolniej ze względu na dużą zawartość wody), ilość ciepła odebranego od górotworu Q_{mr} wynosi ok. 20 000 GJ. Rury kręgu zewnętrznego odbierają 12400 GJ, rury kręgu wewnętrznego 7500 GJ. W przypadku zamrażania w takich samych warunkach tylko kręgiem wewnętrznym (warian A) nastąpiłoby odebranie w tym czasie 8740 GJ ciepła. Zastosowanie dwóch kręgów powoduje więc możliwość otrzymania w stosunkowo krótkim czasie płaszczka mrożeniowego o dużej grubości, lecz równocześnie zmniejsza się efektywność oddziaływania rur.

2.3. Zamrażanie do dużej głębokości dwoma kręgami otworów mrożeniowych

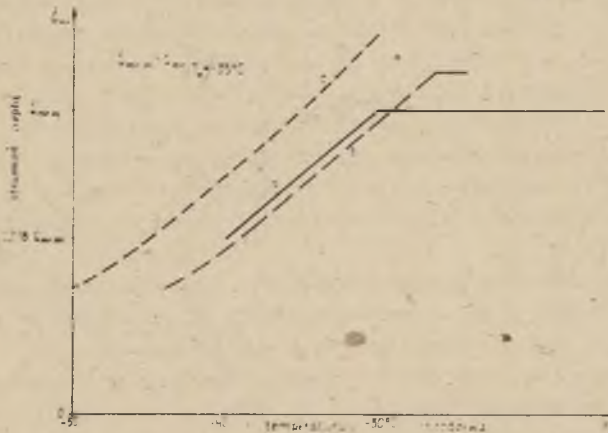
Rozpatrzony przykład dotyczy zamrażania górotworu złożonego z 35 warstw o własnościach jak w zestawieniu 3. Przyjęto, że w każdej warstwie temperatura zamrażania wody wynosi -2°C . W całym rozpatrywanym obszarze $0 \div 853,8$ m znajdują się dwa kręgi otworów mrożeniowych. Rozpatrzono 9 wariantów mrożenia scharakteryzowanych w zestawieniu 4. Okręgi, na których znajdują się otwory mrożeniowe, mają średnice 16 m i 20 m. Współczynniki wnikania ciepła w rurze opadowej i w pierścieniowej przestrzeni międzyrurkowej przyjęto odpowiednio $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$: w wariantach A \div E - 1500 i 653, w przypadku F - 1960 i 938, w G - 1560 i 746, w H - 1130 i 539 oraz w I - 650 i 240. Współczynnik przewodzenia ciepła materiału rur założono $40 \frac{W}{m \cdot K}$.

Parametry termiczne górotworu 2

Numer warstwy	Temperatura naturalna górotworu °C	Grubość m	Obszar występowania m	Współczynnik przewodzenia ciepła górotworu W/(m K)		Objętościowa pojemność cieplna właściwa górotw. kJ/(m ³ K)		Zawartość wilgoci kg/m ³
				niezamrożonego	zamrożonego	niezamrożonego	zamrożonego	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	9,2	168,7	0±168,7	1,26	2,18	3100	2300	390
2	9,3	9,3	168,7±178,0	2,36	0,88	2800	2100	320
3	9,3	1,0	178,0±179,0	2,16	1,36	2800	2100	320
4	9,3	39,0	179,0±218,0	2,06	1,23	2400	2100	150
5	9,3	32,1	218,0±250,1	1,42	0,96	2600	2200	190
6	9,3	10,4	250,1±260,5	2,50	1,49	1800	1600	140
7	9,3	1,8	260,5±262,3	2,27	0,61	2500	2000	250
8	9,3	1,9	262,3±264,2	1,26	0,98	3000	2100	400
9	9,3	5,7	264,2±269,9	2,02	1,32	3000	2100	400
10	9,3	54,3	269,9±324,2	0,61	0,48	3000	2100	400
11	9,3	52,4	324,2±376,6	0,62	0,50	2800	2100	360
12	9,3	65,7	376,6±442,3	0,55	0,43	2700	2000	320
13	9,3	1,5	442,3±443,8	1,31	0,80	2500	2300	120
14	9,3	16,9	443,8±460,7	3,15	1,84	2200	1700	250
15	9,3	4,0	460,7±464,7	3,97	2,24	2300	1700	250
16	9,4	44,8	464,7±509,5	1,28	0,59	2200	1800	200
17	9,4	2,0	509,5±511,5	1,08	0,68	3300	2400	460
18	9,6	38,0	511,5±549,5	1,19	0,84	2700	2200	260
19	9,6	19,0	549,5±568,5	0,61	0,44	2700	2000	350
20	9,8	50,0	568,5±618,5	3,33	1,98	2500	1900	300
21	9,9	13,7	618,5±632,2	0,63	0,33	2500	1900	300
22	10,3	17,4	632,2±649,6	4,27	1,47	2700	2000	300
23	10,3	2,2	649,6±651,8	1,80	1,14	2600	2100	260
24	10,3	4,2	651,8±656,0	1,18	0,78	2600	2100	260
25	10,3	4,3	656,0±660,3	1,08	0,83	2600	2100	260
26	10,5	19,0	660,3±679,3	1,08	0,71	2800	2400	210
27	10,6	11,2	679,3±690,5	2,85	1,91	3000	2400	270
28	10,9	20,8	690,5±711,3	1,23	0,71	2900	2400	270
29	10,9	2,0	711,3±713,3	1,34	0,86	3000	2400	270
30	11,2	6,0	713,3±718,3	1,86	1,28	2700	2200	210
31	11,7	60,2	719,3±779,3	1,12	0,71	3100	2400	340
32	12,1	28,0	779,3±807,3	1,85	1,20	2900	2400	320
33	12,3	13,5	807,3±820,8	1,75	1,15	2800	2200	310
34	12,4	13,0	820,8±837,8	2,20	1,63	2900	2700	150
35	12,6	10,0	833,8±853,8	1,71	1,21	2800	2700	80

Parametry zamrażania w rozpatrywanych wariantach

Oznaczenie wariantu	Liczba rur w kręgu		Średnice rur, mm		Pojemność cieplna strumienia chłodziwa, W/(K, rurę)	Temperatura chłodziwa przy dopływie do rury opadowej, x_0 °C	Sumaryczna maksymalna moc netto agregatów mroźniowych, \dot{Q}_{mr} m MW
	wewnętrznym	zewnątrznym	mroźniowych	opadowych			
A	40	40	168/140	89/79	39,8	-	4,652
B	40	40	168/149	89/79	39,8	-	5,815
C	40	40	168/149	89/79	39,8	-	6,978
D	40	40	168/149	89/79	39,8	-40	-
E	30	40	168/149	89/79	39,8	-40	-
F	40	40	140/124	76/68	39,8	-40	-
G	40	40	140/124	76/68	29,9	-40	-
H	40	40	140/124	76/68	19,9	-40	-
I	40	40	140/124	76/68	10,0	-40	-



Rys. 17. Zależność mocy \dot{Q}_{mr} agregatów mroźniowych od temperatury chłodziwa y_0 przy dopływie do parowacza

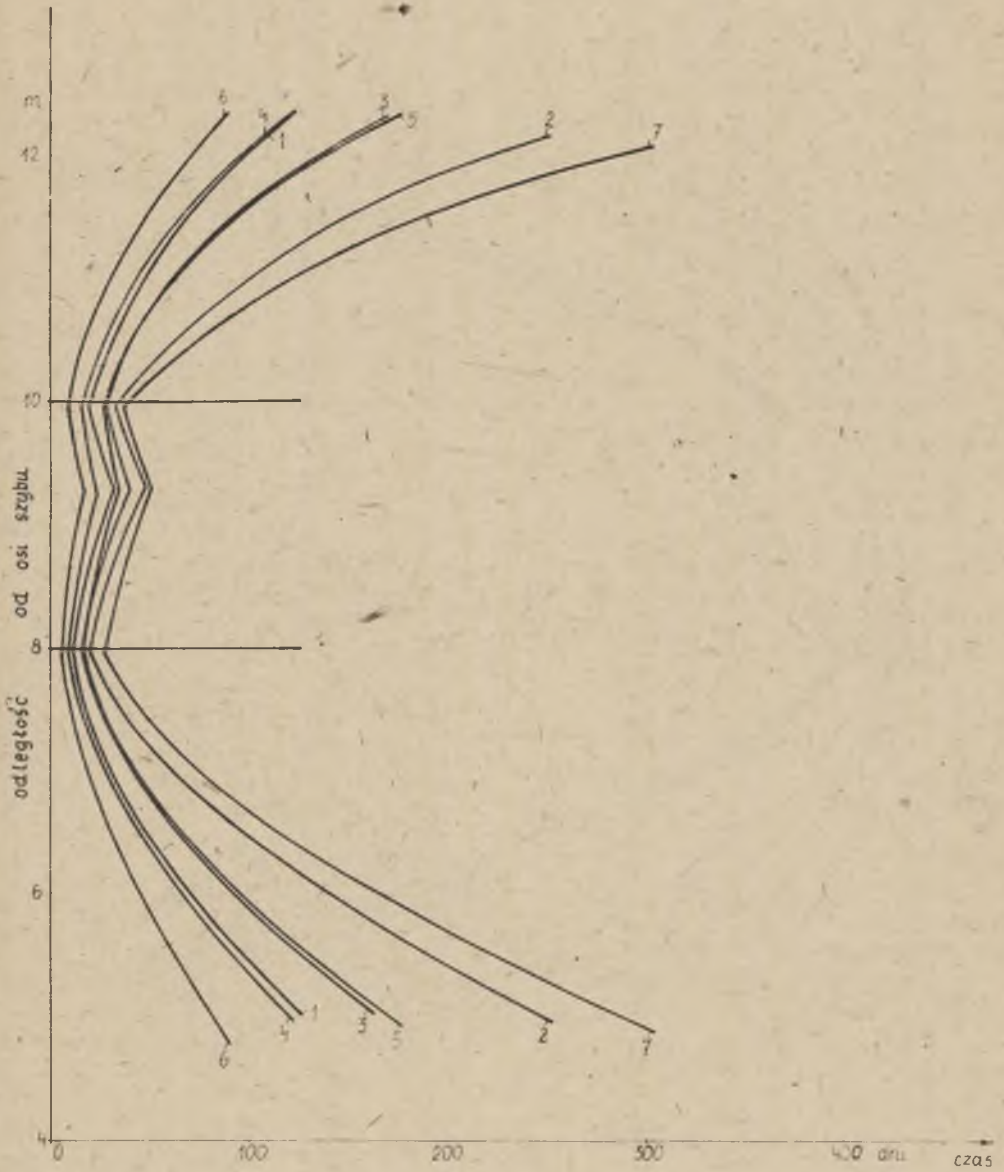
a) charakterystyka uproszczona (przyjęta do obliczeń), b) przykładowa charakterystyka znamionowa agregatu rzeczywistego ($y_0 - x_0 = 2$ K, $y_0 - T_w = 6$ K), c) przykładowa charakterystyka graniczna agregatu rzeczywistego ($y_0 = x_0 \approx T_w$), x_0 - temperatura chłodziwa przy wypływie z parowacza, T_w - temperatura wrzenia amoniaku w parowaczu

W wariantach A+C istnieje ograniczenie mocy agregatów. Temperatura chłodziwa przy dopływie do rur opadowych x_0 ustala się na takim poziomie, iż moc agregatów netto jest równa mocy cieplnej odbieranej od górotworu. Temperatura ta, ze względu na własności czynnika chłodzącego, nie może być mniejsza od -40°C . Przyjęto uproszczoną charakterystykę pracy agregatów mrozeniowych (rys. 17), analogicznie jak w przykładzie poprzednim. W przypadkach D+I przyjmuje się, iż moc agregatów jest tak duża, że umożliwia utrzymanie stałej temperatury x_0 . Warianty A+C rozpatrzono w celu zbadania wpływu maksymalnej mocy nominalnej \dot{Q}_{mr} na czas mrożenia; przypadki F+I służą do określenia wpływu pojemności cieplnej strumienia chłodziwa. Wariant E ma za zadanie zbadanie efektu zmniejszenia liczby rur w kręgu wewnętrznym. Ewentualność taka była brana pod uwagę przy opracowywaniu projektu budowy szybu, którego dotyczy rozpatrywany przykład. Brano również pod uwagę dwa rodzaje zestawów rur. Wpływ pojemności W zbadano dla rur o mniejszych średnicach, gdyż w tym przypadku większą rolę odgrywa tarcie, co powoduje konieczność ograniczenia w większym stopniu strumienia czynnika mrozącego.

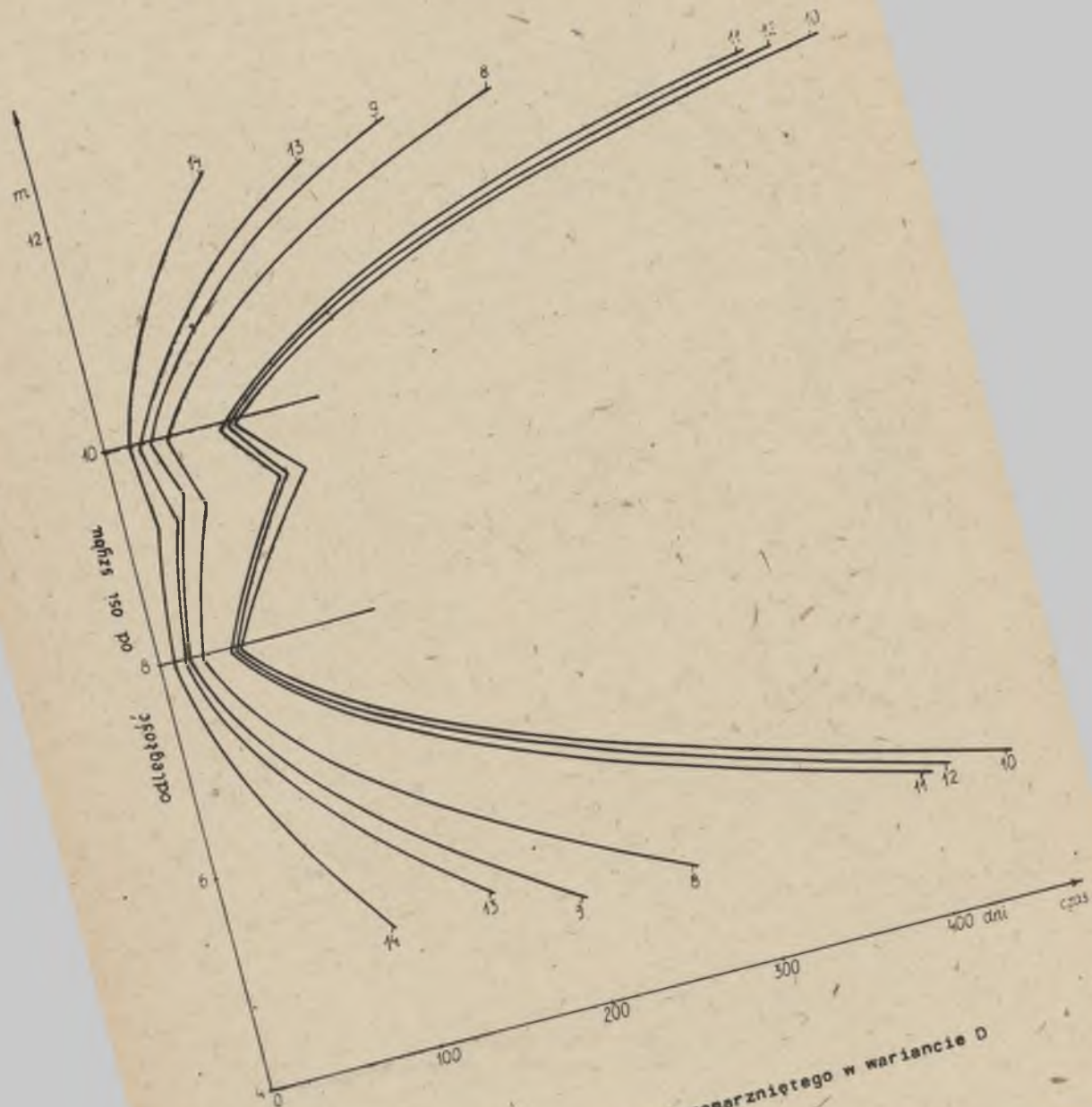
Przy wykonywaniu obliczeń w każdej warstwie rozpatrzono 15 elementów różnicowych wewnątrz kręgu wewnętrznego, 6 w obszarze między kręgami oraz 18 na zewnątrz kręgu zewnętrznego w odległości do 30 m od osi szybu. Jedynie w wariantcie E uwzględniono 14 elementów wewnątrz kręgu wewnętrznego w każdej warstwie. W pobliżu rur mrozeniowych wprowadzono drobniejszy podział niż na rys. 13, w wyniku czego do powierzchni walcowych obu kręgów przylegają po dwa elementy z każdej strony (na rys. 13 po jednym). Nie brano pod uwagę elementów położonych w odległości większej niż 30 m od osi szybu, gdyż obliczenia wykonane dla górotworu wg schematu na rys. 13 wykazały, że w trzech ostatnich elementach temperatura w żadnej z 10 rozpatrzonych wówczas warstw nie uległa zmianie, przy czasie mrożenia 200 dni, o więcej niż o 0,005 K.

Wyniki obliczeń, podające położenie granicy obszaru zamrożonego w funkcji czasu dla każdej z 35 warstw w przypadku D, pokazano na rys. 18. Liczby przy krzywych podają numery warstw w zestawieniu 3, do których krzywe te się odnoszą. Pionowy odcinek zawarty pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi przedstawia grubość, w danej chwili, płaszcza mrozeniowego. Zetknięcie się środkowych krzywych oznacza zakończenie procesu zamrażania górotworu w obszarze między kręgami. Z rys. 18 wynika, że najwolniej zamraża warstwa 21, następnie warstwy 10 i 19 oraz 12 i 11. Czas, po którym płaszcz mrozeniowy osiąga określoną grubość, zmienia się w dość dużym przedziale. Płaszcz ten np. ma grubość 6 m w warstwie 21 po 420 dniach, w najszybciej zaś zamrażających warstwach 6 i 15 już po 16 dniach mrożenia.

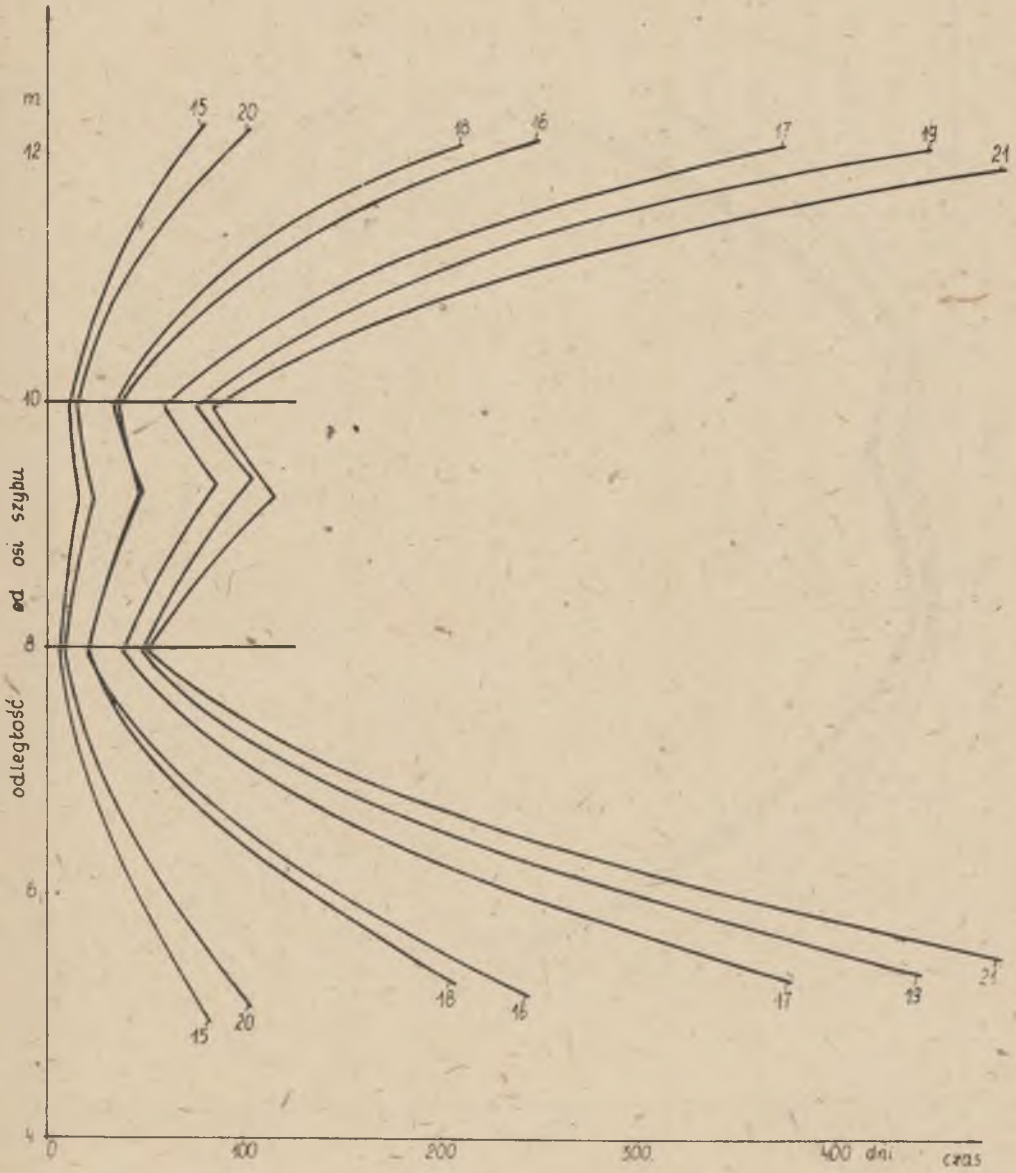
Przebieg granic obszaru zamrożonego w przypadkach A+D w warstwie 19 i 21 pokazany jest na rys. 19. Czas, po którym płaszcz mrozeniowy w tych warstwach osiąga grubość 6 m podany jest w zestawieniu 5 (wymagana



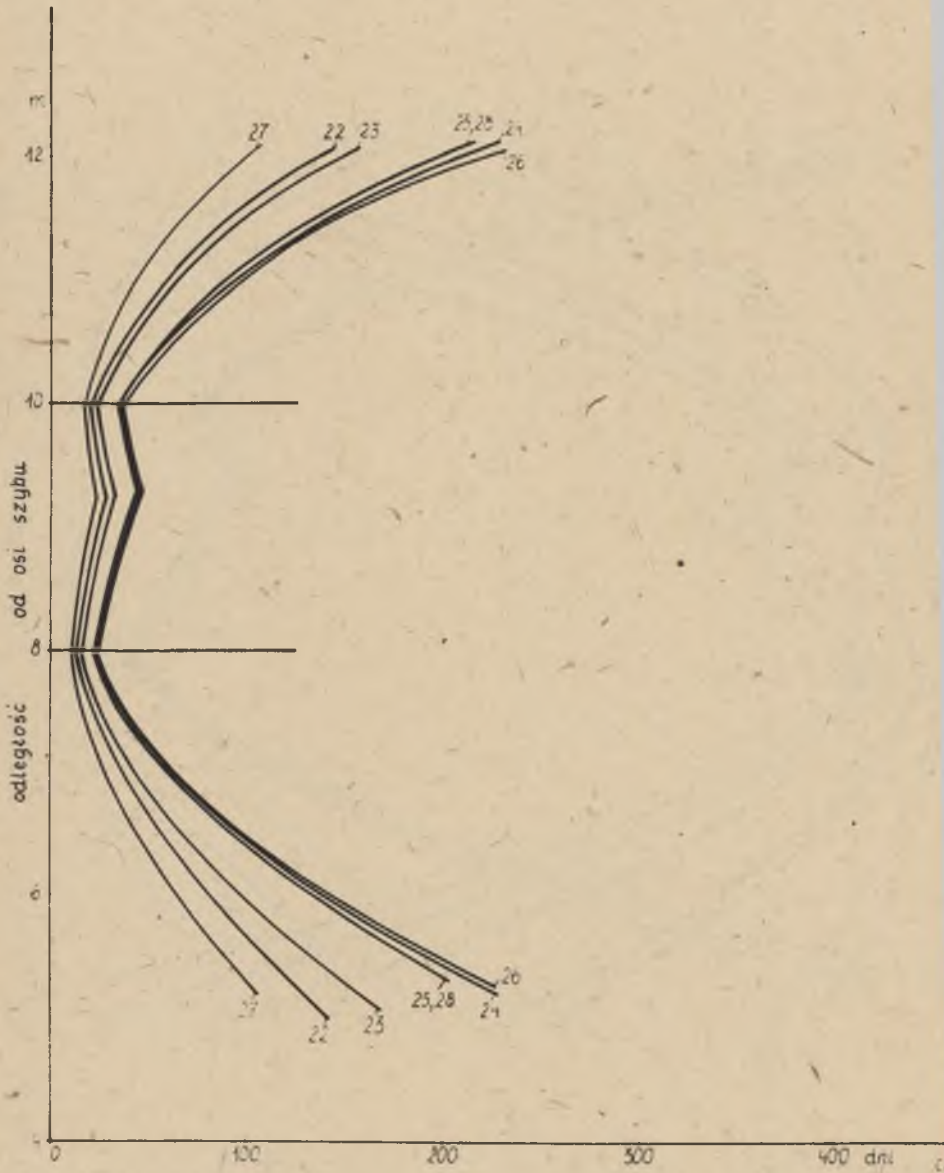
Rys. 18a. Granice obszaru zamrożonego w wariancie U



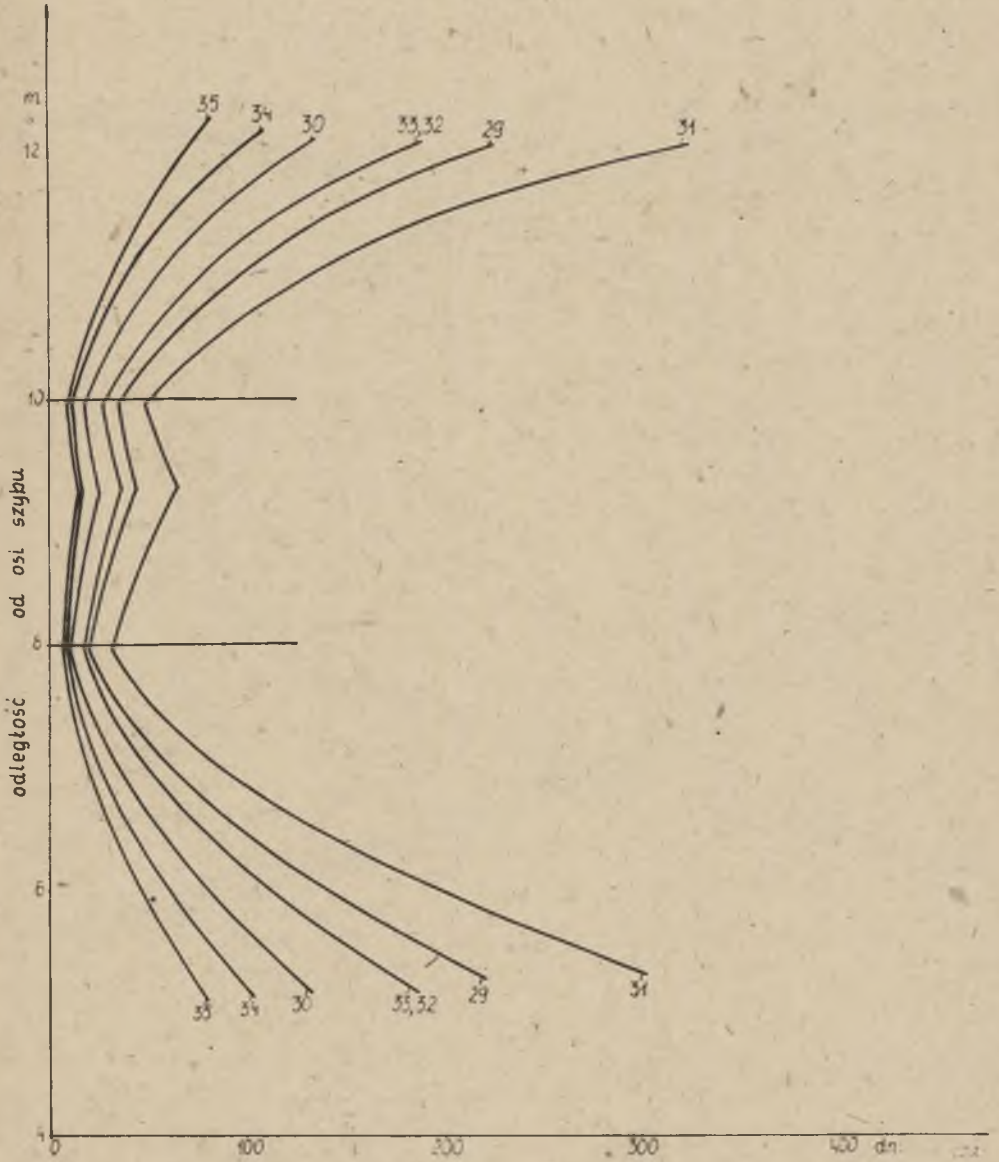
Rys. 18b. Granice obszaru zamrożonego w wariancie D



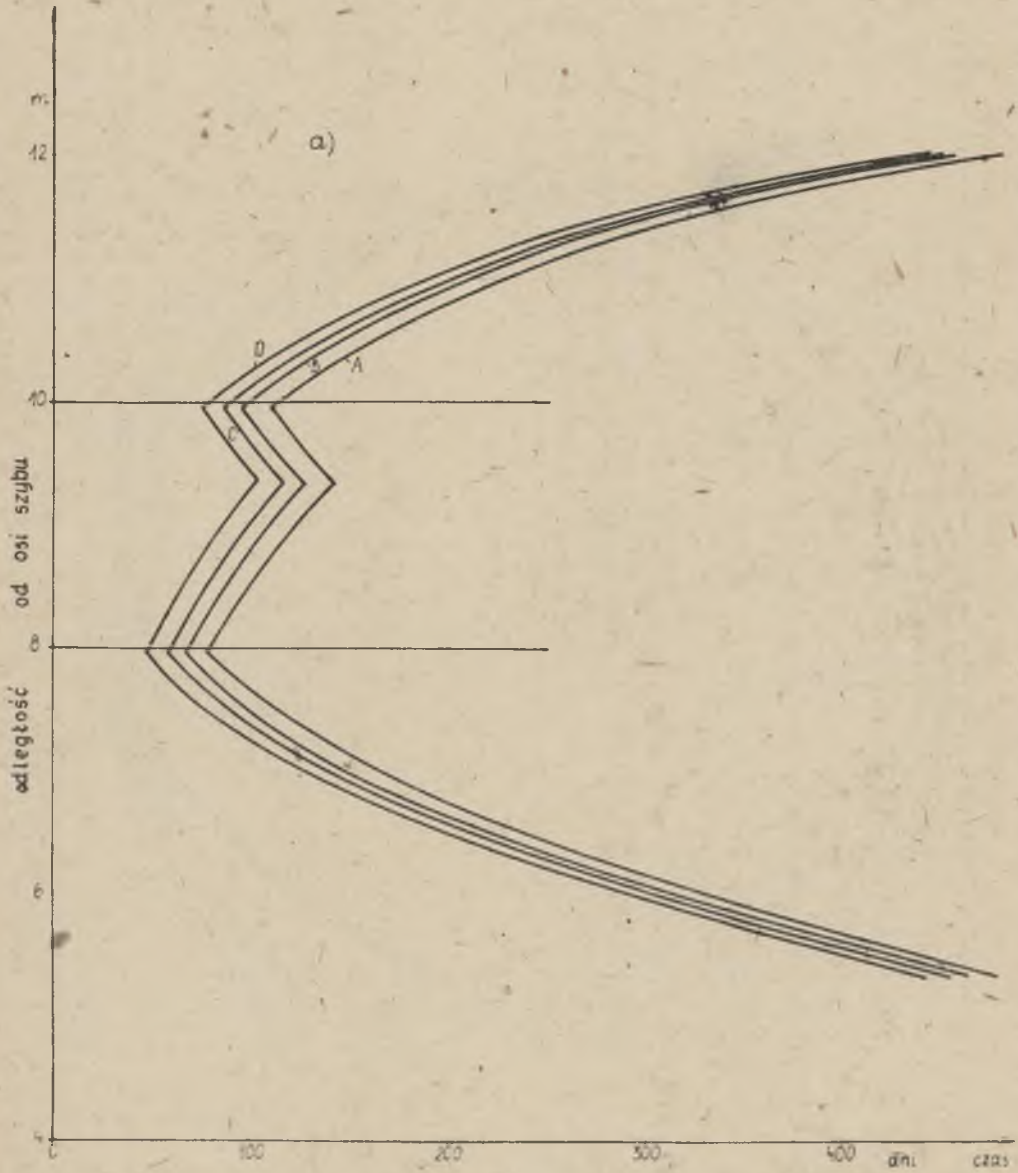
Rys. 18c. Granice obszaru zamrożonego w wariancie D



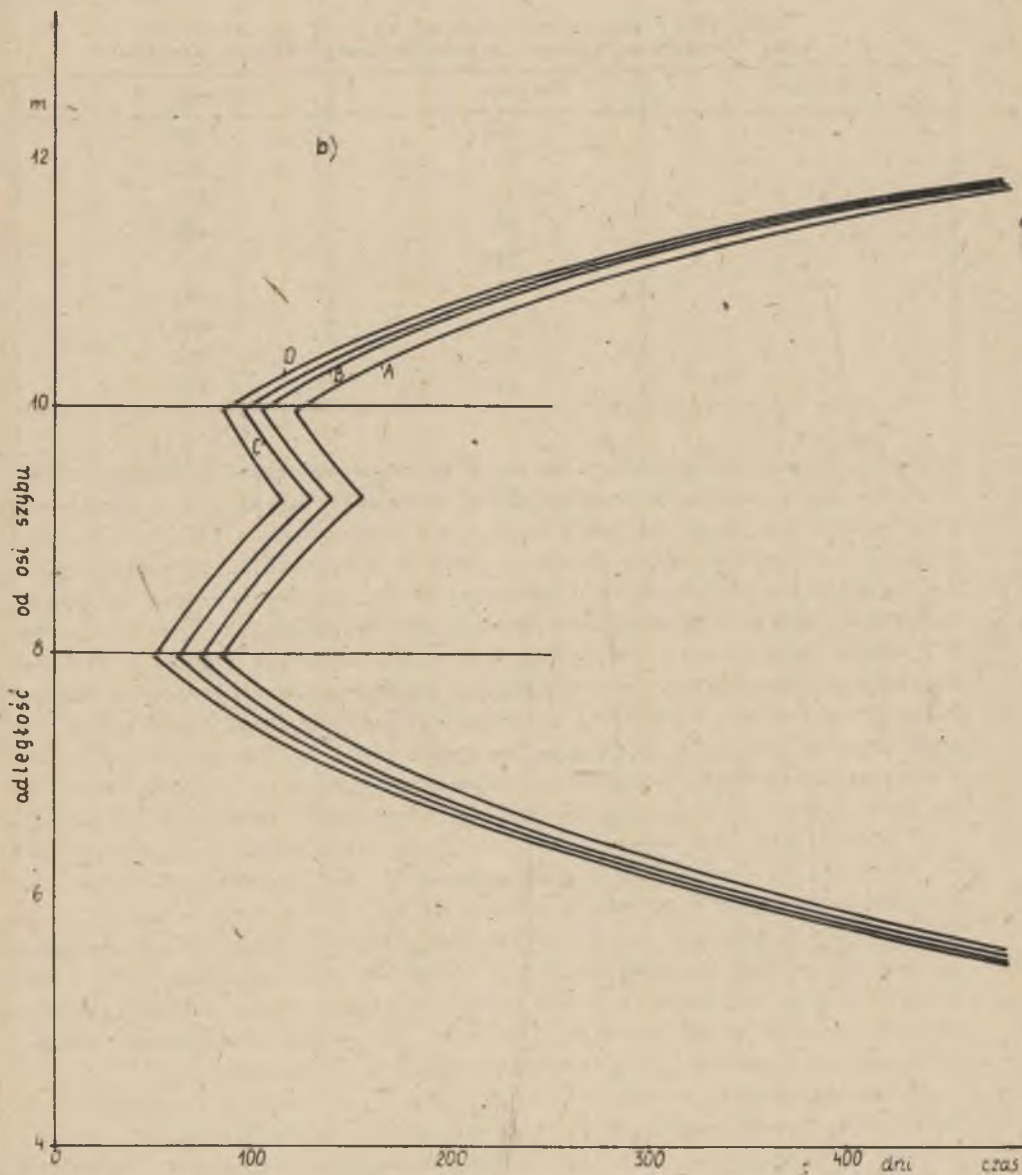
Rys. 18d. Granice obszaru zamrożonego w wariantcie D



Rys. 18e. Granice obszaru zamrożonego w wariancie D



Rys. 19. Granice obszaru zamrożonego w wariantach A+B
a) w warstwie 19



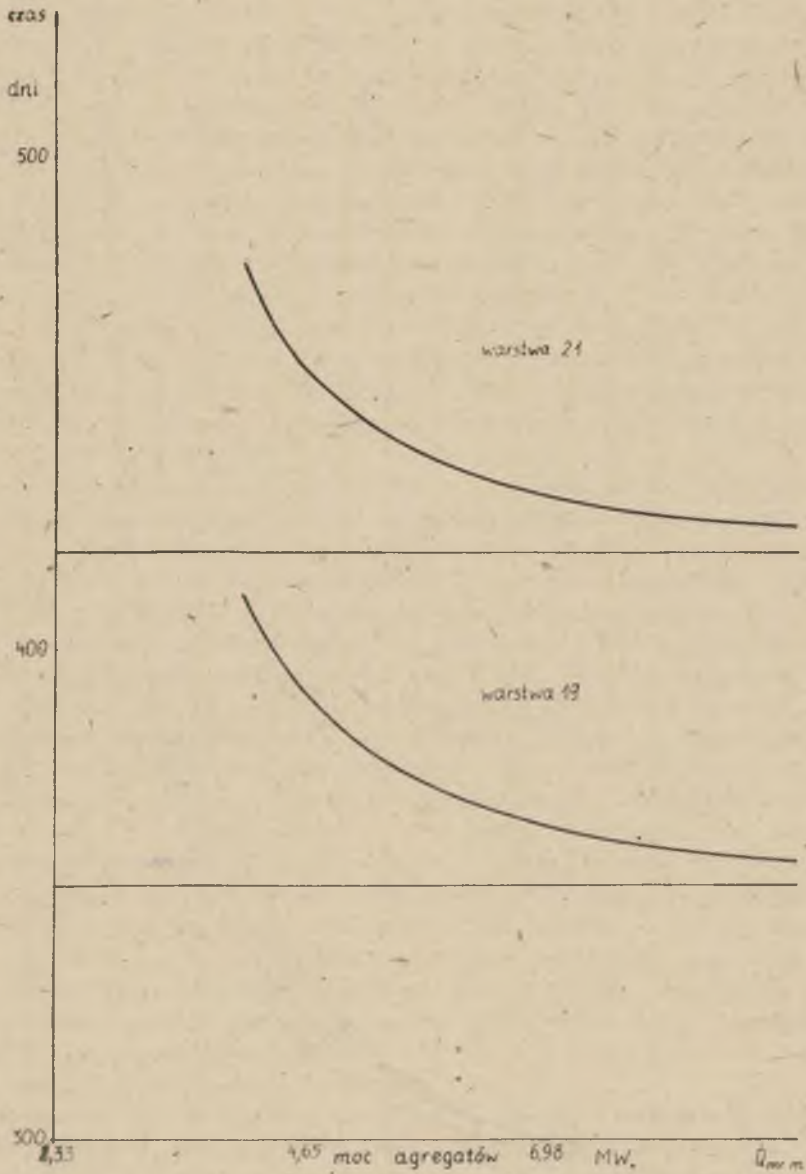
Rys. 19. Granice obszaru zamrożonego w wariantach A-D
b) w warstwie 21

Czas (dni) zamrażania warstwy 19 i 21 górotworu 2 przy różnych wariantach mrożenia dwoma kręgami otworów

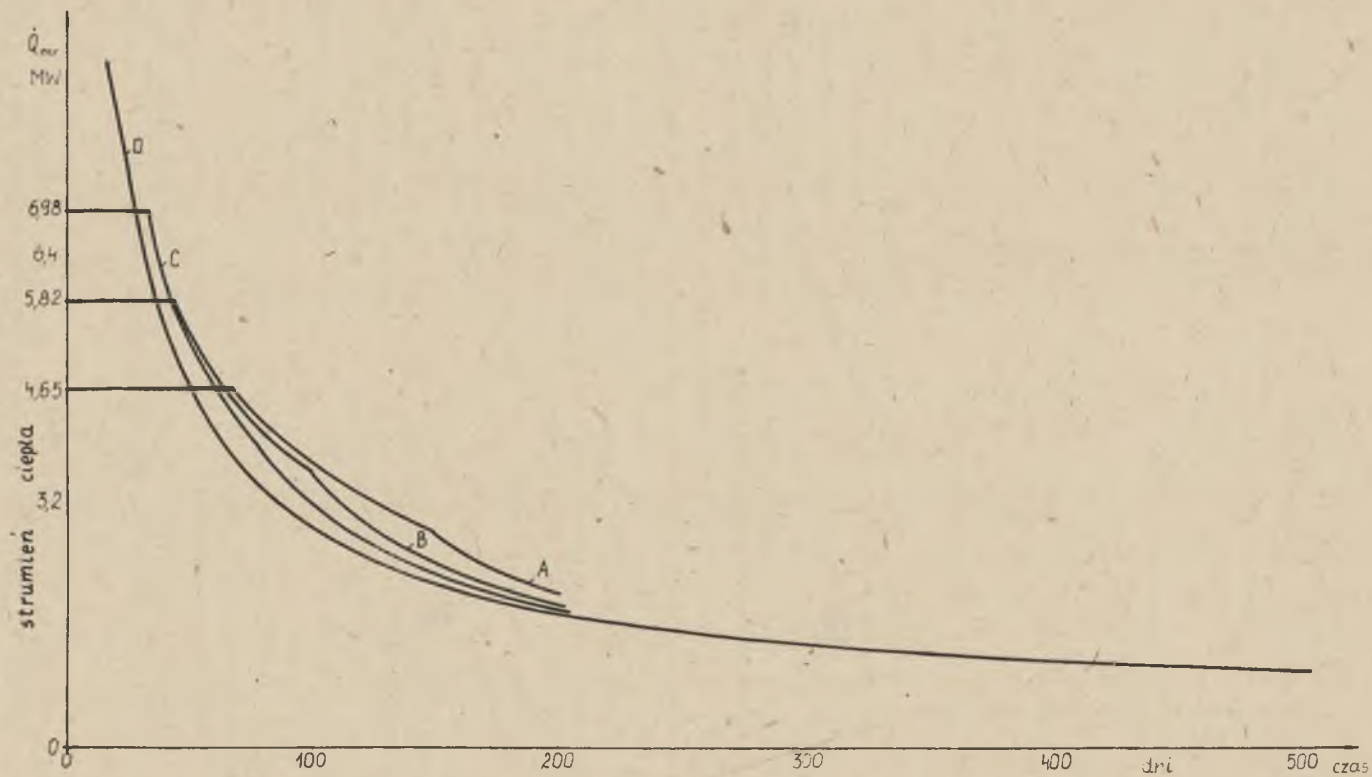
Wariant	Warstwa 19	Warstwa 21
A	391	458
B	373	440
C	364	431
D	352	420
E	390	462
F	371	442
G	377	448
H	388	460
I	416	489

grubość płaszcza mrożeniowego wynika z warunków wytrzymałościowych). Zależność czasu zamrażania od maksymalnej mocy netto agregatów mrożeniowych, przy parametrach mrożenia jak w wariantach A+D, pokazana jest na rys. 20. Poziome proste odpowiadają czasom mrożenia w przypadku D. Utrzymanie stałej temperatury chłodziwa przy dopływie do rur opadowych wymaga tu zastosowania agregatów mrożeniowych o maksymalnej teoretycznie mocy netto 118 Mł. Wynik ten otrzymuje się po wykorzystaniu zależności (7) i (8) dla początkowego momentu, gdy rury mrożeniowe stykają się z górotworem o temperaturze naturalnej. Mimo dużej dysproporcji pomiędzy mocą potrzebną do zrealizowania wariantu D a mocą agregatów przyjętą w przypadku C, różnice pomiędzy czasami mrożenia są nieznaczne. Wynika to z bardzo krótkiego okresu wykorzystania mocy maksymalnej w przypadku instalacji o dużej mocy mrożeniowej. Jak wynika z rys. 21, podającego zależność pomiędzy mocą odbieraną od górotworu i czasem mrożenia, moc maksymalna agregatów jest wykorzystywana w wariacie A przez 68 dni, w przypadku B przez 44 dni, w C zaś zaledwie przez 33 dni. Temperatura chłodziwa osiąga minimalną wartość -40°C przy dopływie do rur opadowych w wariacie A po 148 dniach, w B po 99 dniach, w C zaś już po 78 dniach mrożenia. Analiza rys. 20 i 21 prowadzi zatem do wniosku, że nie jest celowe instalowanie zespołu agregatów mrożeniowych o zbyt dużej mocy.

Z rys. 18 wynika, że odstęp między okręgami, na których znajdują się otwory mrożeniowe, jest za mały przy wymaganej grubości płaszcza mrożeniowego 6 m. Średnice obu kręgów zostały uwarunkowane względami technologicznymi. Gdyby względy te dopuszczały zmniejszenie średnicy kręgu wewnętrzznego, wówczas czas zamrażania uległby wyraźnemu skróceniu. Jak wynika bowiem z analizy krzywych pokazanych na rys. 18 oraz krzywych jak na rys. 15 dla wszystkich 10 warstw rozpatrzonych w p. 21, zawsze grubość płaszcza mrożeniowego w każdej z warstw w momencie zakończenia zamrażania w niej przestrzeni między kręgami była mniejsza od dwukrotnej różnicy pro-



Rys. 20. Zależność czasu zamrażania od maksymalnej mocy netto agregatów mroźniowych



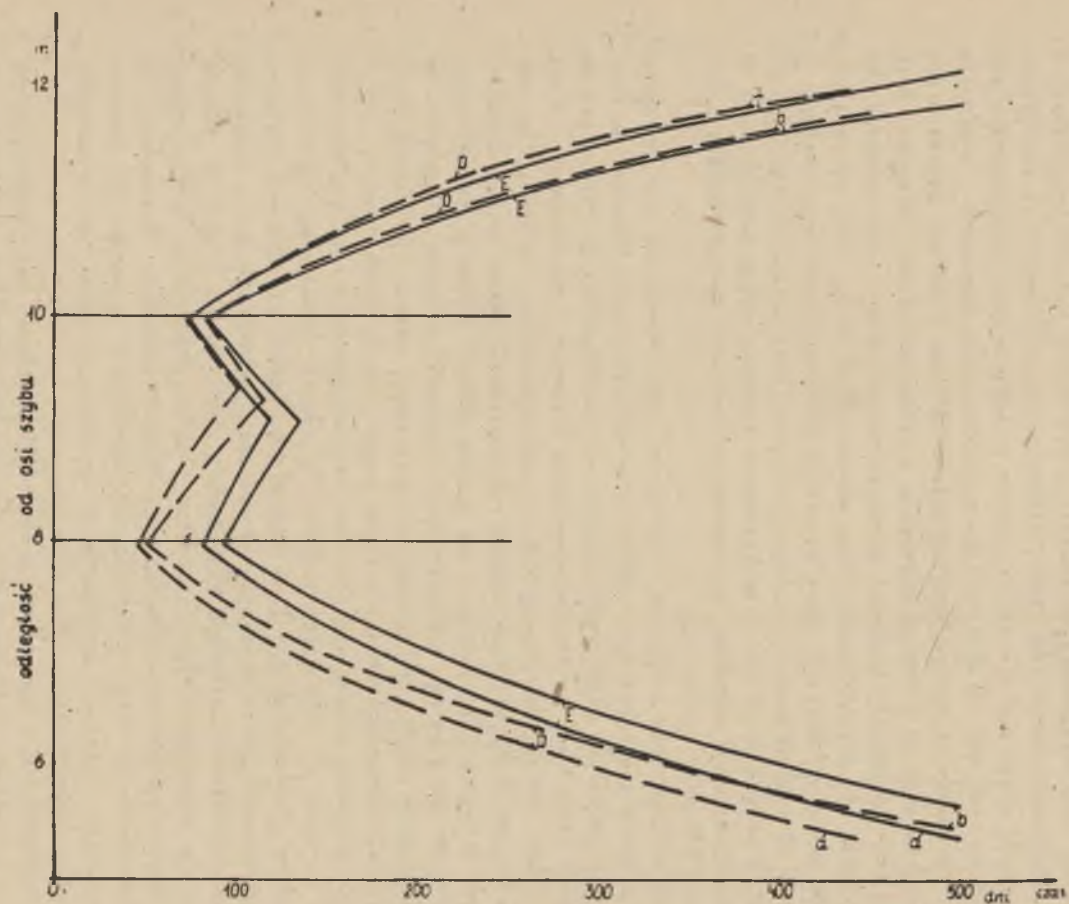
Rys. 21. Moc cieplna odbierana od górotworu w funkcji czasu mrożenia

mieni kręgów. Stosunek tej grubości do odległości pomiędzy kręgami wahał się w przykładzie w p. 2.1 w granicach $1,83 \pm 1,89$ oraz w zakresie $1,41 \pm 1,79$ dla krzywych na rys. 18. Optymalna, ze względu na czas mrożenia, różnica promieni kręgów jest więc tu nieco większa od 3 m. Korzyści czasowe wynikające ze zmniejszenia średnicy kręgu wewnętrznego można określić z dość dużą dokładnością w oparciu o wykresy na rys. 18 bez rozpatrywania dodatkowych wariantów. Jeśli przyjmie się, że niewielkie zmniejszenie średnicy kręgu wewnętrznego w sposób znikomy zmieni przebieg dolnych krzywych na rys. 18, to wówczas czas mrożenia można oszacować znajdując na rys. 18 moment, w którym suma odległości górnych i dolnych części krzywych od promienia 10 i 8 m, powiększona o odległość między kręgami, daje wartość równą założonej grubości płaszczki mrozeniowej. Postępowanie takie wykazuje, że przy średnicy kręgu wewnętrznego 15 m, dla pozostałych warunków jak w wariancie D, czas po którym płaszcz mrozeniowy osiąga w warstwach 19 i 21 grubość 6 m ulega skróceniu, w stosunku do przypadku D, o ponad 60 oraz o ok. 80 dni. Zmniejszenie średnicy kręgu wewnętrznego do 14 m zmniejsza czas mrożenia, w stosunku do wariantu D, odpowiednio o ok. 120 dni i 140 dni, a więc o $\frac{1}{3}$.

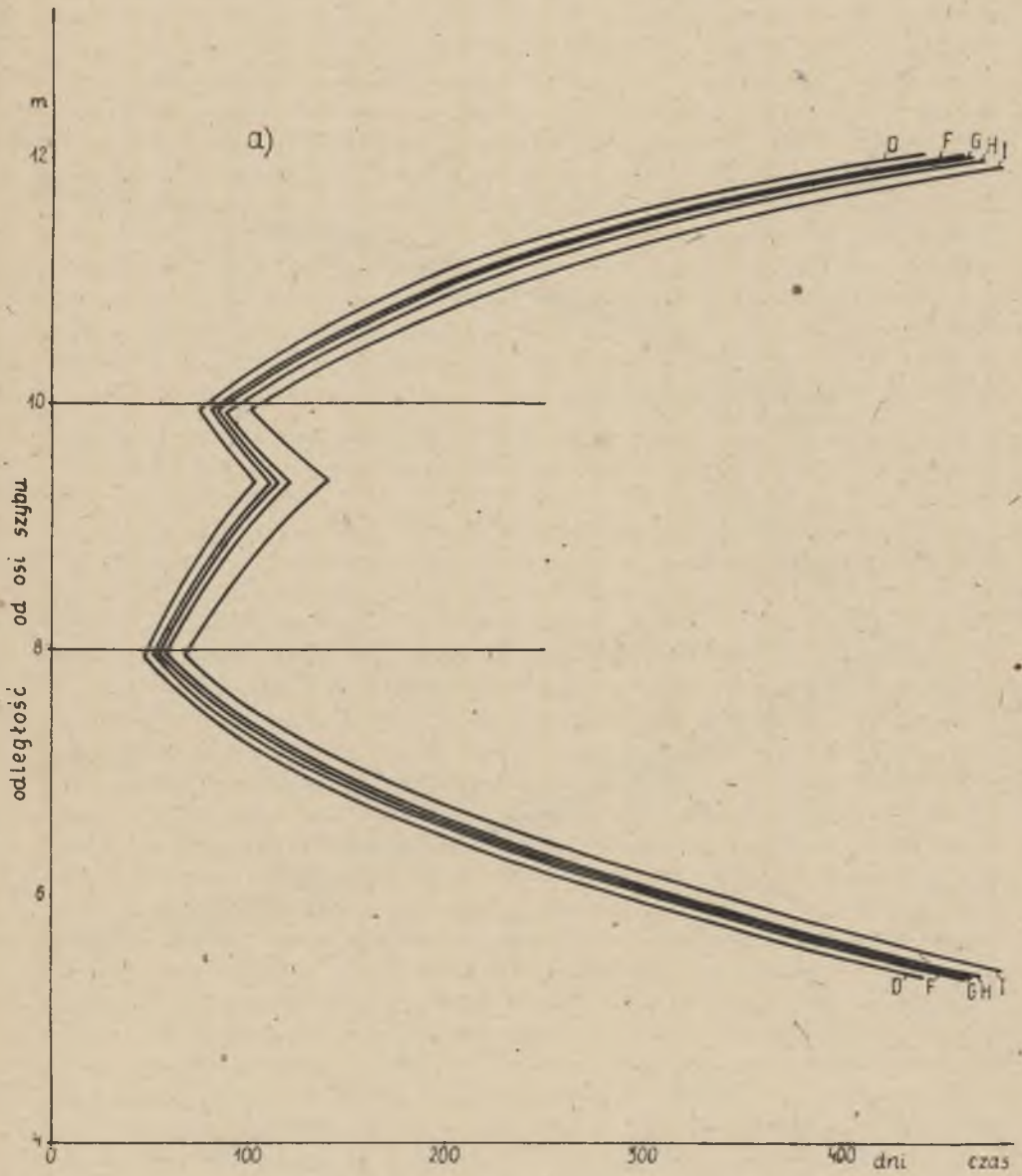
Wpływ zmniejszenia liczby rur tworzących krąg wewnętrzny na przebieg granic obzaru zamrożonego w dwóch warstwach górotworu pokazano na rys. 22, na którym krzywe przerywane odnoszą się do przypadku D, ciągle zaś do wariantu E (zest. 4). Wyraźne przesunięcie krzywych dotyczących kręgu wewnętrznego, zwłaszcza w początkowym okresie mrożenia, dowodzi, że nie można w celach obliczeniowych kręgów rur zastępować dwoma powierzchniami walcowymi o osiach pokrywających się z osią szybu. Różne przebiegi krzywych górnych wywołane są, podobnie jak w przypadku dolnych krzywych na rys. 15, przede wszystkim różnymi strumieniami ciepła przepływającymi przez odpowiednią powierzchnię walcową kręgu otworów mrozeniowych.

W celu zbadania wpływu wymiarów rur na czas mrożenia wykonano obliczenia dla wariantu F różniącego się od D jedynie średnicami rur. Rury rozpatrzone w wariantach F \pm I są typowe dla obecnie stosowanych instalacji. Zastosowanie rur o większych średnicach przewiduje się w przypadku zamrażania górotworu do dużych głębokości. Jak wynika z rys. 23 zmiana wymiarów rur powoduje tu pewne, niezbyt znaczne, wydłużenie czasu mrożenia do momentu osiągnięcia płaszczki o założonej grubości. Wydłużenie to jest spowodowane głównie koniecznością zamrożenia w wariancie F dodatkowej niewielkiej objętości zajmowanej w wariancie D przez rury oraz wzrostem oporów przewodzenia ciepła w pobliżu rur.

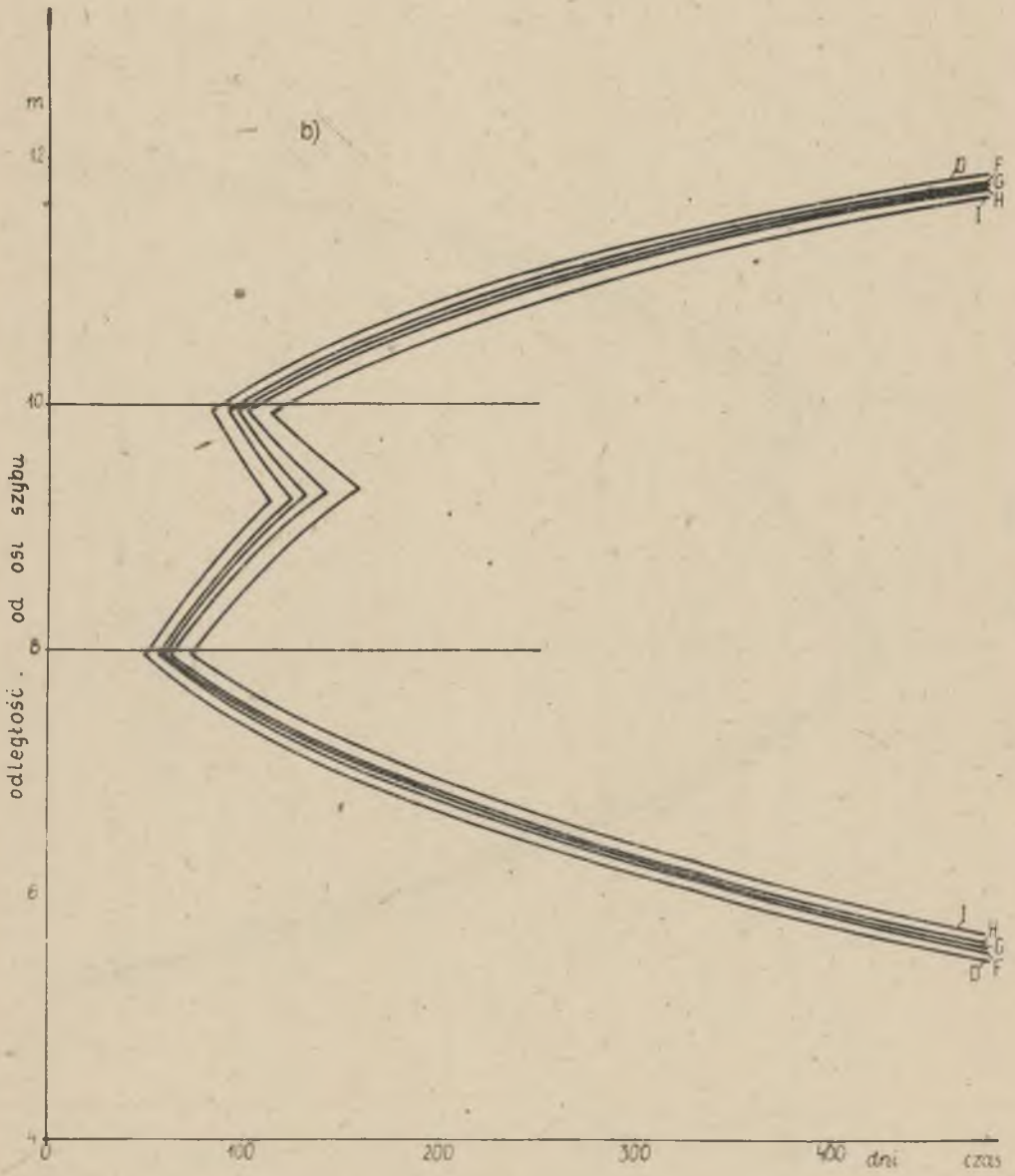
Zastosowanie rur o mniejszych średnicach powoduje zwiększenie oporów przepływu chłodziwa. Obliczenia wykonane dla wariantów A \pm E wykazują, że spadek ciśnienia w elemencie wynosi 1,61 MPa, co odpowiada mocy tarcia $18,6 \frac{\text{kW}}{\text{rurę}}$. W przypadku F odpowiednie liczby wynoszą 3,52 MPa oraz $40,8 \frac{\text{kW}}{\text{rurę}}$ (wszystkie wyniki dotyczą tu temperatury chłodziwa - 30°C). Łączne moce tarcia w elementach mrozeniowych w wariantach A \pm D i G, E oraz



Rys. 22. Granice obszaru zamarzniętego w wariantach D i E
 a) w warstwie 19, b) w warstwie 21



Rys. 23. Granice obszaru zamrożonego w wariantach D oraz F+I
a) w warstwie 19



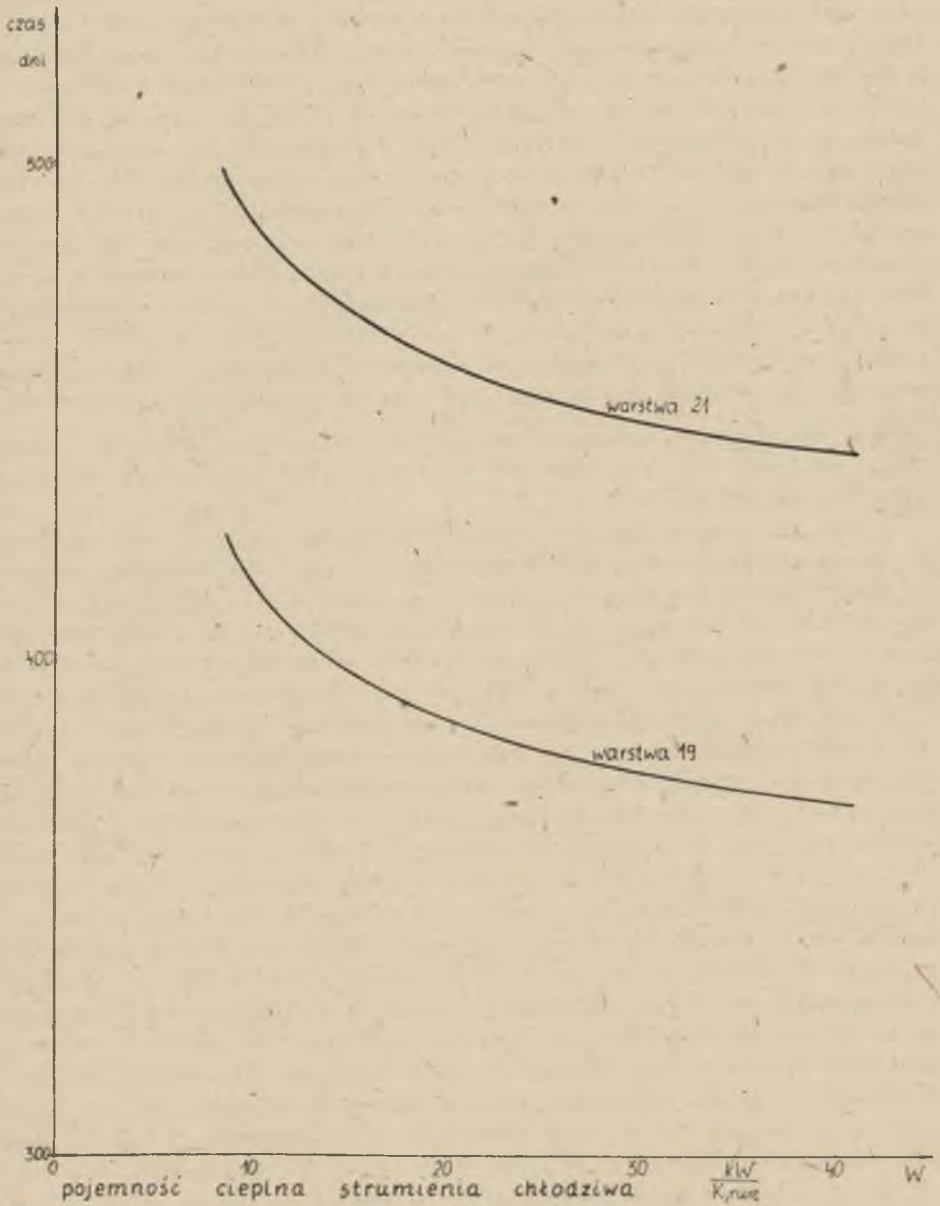
Rys. 23. Granice obszaru zamrożonego w wariantach D oraz F+I
b) w warstwie 21

F wynoszą odpowiednio: 1,49 MW, 1,30 MW oraz 3,26 MW. Wielkości te powiększone o moce ciepła tarcia wynikające ze spadków ciśnienia w rurociągach i parowaczu oraz podzielone przez sprawność wewnętrzną pomp dają całkowity efekt cieplny wywołany tarcie. Efekt ten musi być neutralizowany przez odpowiednie powiększenie mocy agregatów mrozeniowych. Jak widać z podanych liczb moc tarcia jest porównywalna z mocami netto agregatów mrozeniowych przyjmowanych w wariantach A+C. Po zmniejszeniu wymiarów rur bez zmiany strumienia chłodziwa moc tarcia jest zbliżona do mocy mrozeniowej w wariantcie A. Tarcie powoduje więc konieczność zwiększenia mocy agregatów, lecz podobnie jak w p. 2.1 ma ono znikomą wpływ na proces przepływu ciepła. Wynika to stąd, że przyrost temperatury chłodziwa wywołany tarcie podczas przepływu przez rurę opadową i przez pierścieniową przestrzeń międzyrurową wynosi 0,468 K w wariantach A+E, 1,025 K w przypadku F i 0,622 K w wariantcie G. Przypadek G dotyczy takich samych warunków jak F, lecz zmniejszony jest o 25% strumień chłodziwa do 0,0087

³
s, rurę. Strumień ten, pomnożony przez spadek ciśnienia wynoszący w elemencie mrozącym 2,14 MPa, daje taką samą moc tarcia dla jednego elementu jak w wariantach A+E.

W celu zbadania wpływu strumienia chłodziwa na czas zamrażania wykonano obliczenia dla warunków jak w przypadku F oraz dla strumieni czynnika chłodzącego zmniejszonych o połowę - wariant H i o 75% - wariant I. Wyniki obliczeń dla warstw 19 i 21 pokazane są na rys. 23 i 24. Rys. 24 podaje czas niezbędny do otrzymania płaszcza mrozeniowego o grubości w najwęższym miejscu 6 m. Czas ten dopiero przy stosunkowo małych strumieniach chłodziwa zaczyna gwałtownie rosnąć. Przebieg krzywych, jak na rys. 24, wynika z nakładania się na siebie dwóch przeciwnych efektów. Spadek strumienia chłodziwa powoduje występowanie wyższej temperatury czynnika chłodzącego, jak również zmniejszenie się współczynników wnikania ciepła. Obniżenie wartości współczynnika wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej w znikomą sposób w rozpatrywanym przykładzie wpływa na przepływ ciepła od górotworu, gdyż decydujące znaczenie mają tu opory przewodzenia ciepła w samym górotworze. Następuje jednak wyraźny spadek współczynnika przenikania ciepła przez rurę opadową, co działa w kierunku zmniejszenia temperatury chłodziwa w przestrzeni międzyrurowej, zwłaszcza w dolnych warstwach. Niecelowe, a nawet szkodliwe ze względu na tarcie, jest więc stosowanie zbyt dużych strumieni czynnika chłodzącego. Stosowanie małych strumieni chłodziwa powoduje szybki spadek mocy tarcia - poniżej 0,5 MW w wariantcie H oraz poniżej 0,1 MW w przypadku I. Należy również, jeśli pozwalają na to względy technologiczne, wykonywać rury opadowe z materiałów o małym współczynniku przewodzenia ciepła.

Całkowita ilość ciepła, którą należy odebrać od górotworu do momentu otrzymania w każdej warstwie płaszcza mrozeniowego o grubości minimum 6 m, obliczona za pośrednictwem numerycznego całkowania przyrostu temperatury chłodziwa, wynosi 95000 GJ.



Rys. 24. Zależność czasu zamrażania od pojemności cieplnej strumienia chłodziwa odniesionego do jednego elementu

3. BEZWYMIAROWA ANALIZA CIEPLNA MROŻENIA GÓROTWORU

3.1. Bezwymiarowe zmienne i parametry mrożenia

Jak wynika z przykładów obliczeniowych zamieszczonych w p. 2, temperatura chłodziwa wzdłuż elementu mroźniowego zmienia się na ogół nieznacznie. Przy dużych mocach agregatów mroźniowych temperatura czynnika chłodzącego przy dopływie do rur opadowych dość szybko osiąga wartość minimalną. We wstępnych, szacunkowych, obliczeniach jest zatem dopuszczalne założenie, że każda warstwa górotworu kontaktuje się przez cały czas trwania procesu z chłodziwem o niezmienną temperaturze. Można wówczas rozpatrywać pojedynczą warstwę. Jeśli zamrażanie odbywa się za pomocą rur mroźniowych równomiernie rozmieszczonych na jednym kręgu, to wtedy grubość, w najważniejszym miejscu, płaszcza mroźniowego E jest funkcją czasu τ , przy czym istnieje 14 parametrów mających wpływ na przebieg procesu mrożenia:

- liczba rur n ,
- promień kręgu otworów mroźniowych R_0 ,
- promień zewnętrzny rury mroźniowej r_o ,
- promień wewnętrzny rury mroźniowej r_w ,
- współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury λ_m ,
- współczynnik wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej α_z ,
- temperatura chłodziwa T_{chl} ,
- temperatura zamrażania wody T_z ,
- temperatura naturalna górotworu T_g ,
- współczynnik przewodzenia ciepła górotworu niezamrożonego λ_n ,
- współczynnik przewodzenia ciepła górotworu zamrożonego λ_z ,
- objętościowa pojemność cieplna właściwa górotworu niezamrożonego C_n ,
- objętościowa pojemność cieplna właściwa górotworu zamrożonego C_z ,
- objętościowa entalpia zamrażania wody w górotworze I_k .

Wymienione wielkości występują w sposób bezpośredni lub w postaci uwikłanej, np. za pośrednictwem wymiarów elementów różnicowych. Część z tych parametrów pojawia się w ściśle określonych konfiguracjach. Temperatury występują w postaci różnic, wielkości r_w , λ_m i α_z zaś pojawiają się tylko za pośrednictwem współczynnika przenikania ciepła od zewnętrznej powierzchni rury mroźniowej do chłodziwa w przestrzeni międzyrurowej. Oprócz czasu istnieje zatem jedynie 11 niezależnych parametrów wpływających na grubość płaszcza mroźniowego. Zgodnie z teorią podobieństwa

można utworzyć parametry bezwymiarowe, których liczba jest mniejsza o liczbę wymiarów podstawowych, a więc w tym przypadku o 4. Bezwymiarowe zmienne i parametry mrożenia zdefiniowano w oparciu o analizę układu równań różnicowych, rozważania sprawdzające zaś przeprowadzono korzystając z układu równań różniczkowych tworzących zagadnienie początkowo-brzegowe. Zagadnienie to składa się z równań przewodzenia ciepła dla obszaru górotworu niezamrożonego i zamrożonego, z warunku początkowego oraz z warunków brzegowych na granicach rozpatrywanego fragmentu górotworu i na granicy faz.

Bezwymiarowa grubość płaszcza mrożeniowego e

$$e = \frac{E}{R_0} \quad (33)$$

jest, jak stwierdzono, funkcją bezwymiarowego czasu mrożenia f , będącego odpowiednikiem liczby Fouriera

$$f = \frac{\tau \lambda_n}{C_n R_0^2}, \quad (34)$$

przy siedmiu bezwymiarowych parametrach mrożenia. Są to:

- liczba rur n ,
- bezwymiarowa entalpia zamarzania k

$$k = \frac{I_k}{C_n (T_g - T_{chł})}, \quad (35)$$

- bezwymiarowa temperatura zamarzania t

$$t = \frac{T_z - T_{chł}}{T_g - T_{chł}}, \quad (36)$$

- bezwymiarowy opór przenikania ciepła od górotworu do chłodziwa p

$$p = \lambda_n \left(\frac{1}{\lambda_m} \ln \frac{r_0}{r_w} + \frac{1}{\alpha_z r_w} \right), \quad (37)$$

- stosunek współczynników przewodzenia ciepła górotworu l

$$l = \frac{\lambda_n}{\lambda_z}, \quad (38)$$

- stosunek pojemności cieplnych górotworu c

$$c = \frac{C}{C_n} \quad (39)$$

- bezwymiarowy promień rury mrozeniowej b

$$b = \frac{r_o}{R_o} \quad (40)$$

Zatem dla jednego kręgu rur:

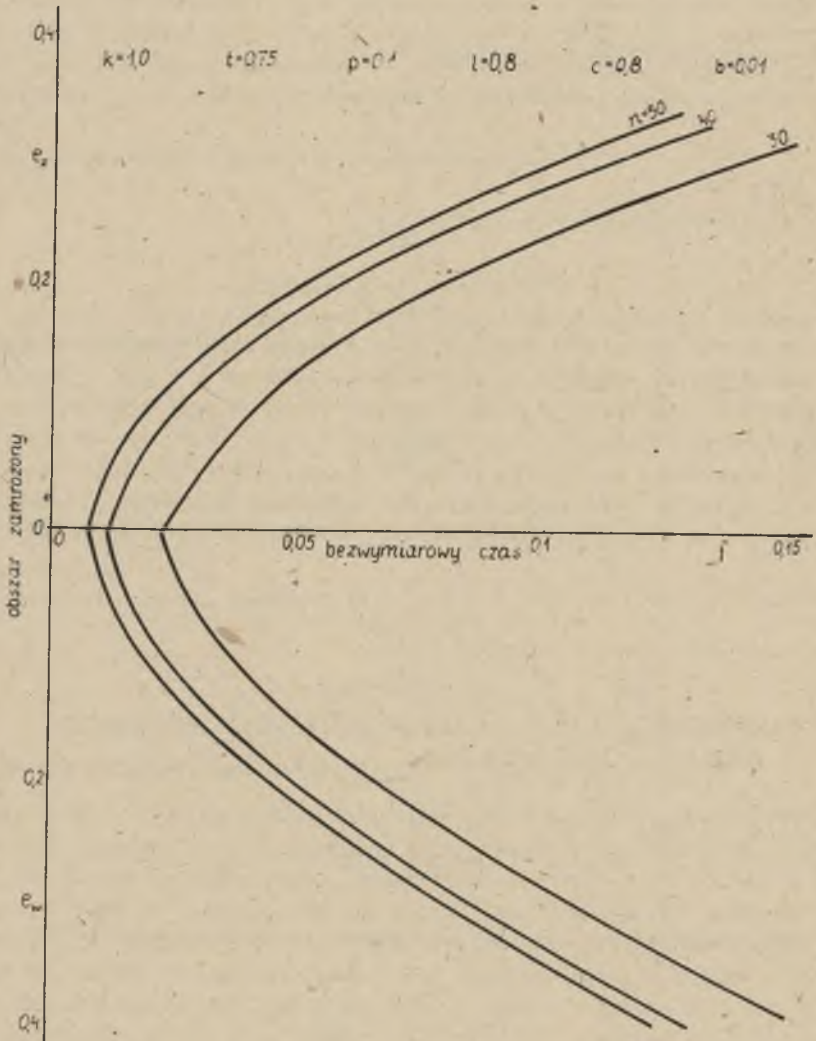
$$e = e(f, n, k, t, p, l, c, b). \quad (41)$$

W przypadku zamrażania dwoma kręgami otworów mrozeniowych występują dodatkowe parametry mrożenia, a mianowicie liczba rur w kręgu zewnętrznym n_d , średnica tego kręgu R_d oraz ewentualnie inne mogą być w rurach kręgu zewnętrznego wielkości $r_o, r_w, \lambda_m, \alpha_z$ i T_{chl} . Przy takich samych warunkach mrożenia w rurach obu kręgów pojawiają się tylko dwie nowe wielkości - n_d i R_d . Występują zatem dwa dodatkowe parametry bezwymiarowe, tj. liczba rur w kręgu zewnętrznym n_d i bezwymiarowy promień tego kręgu b_d

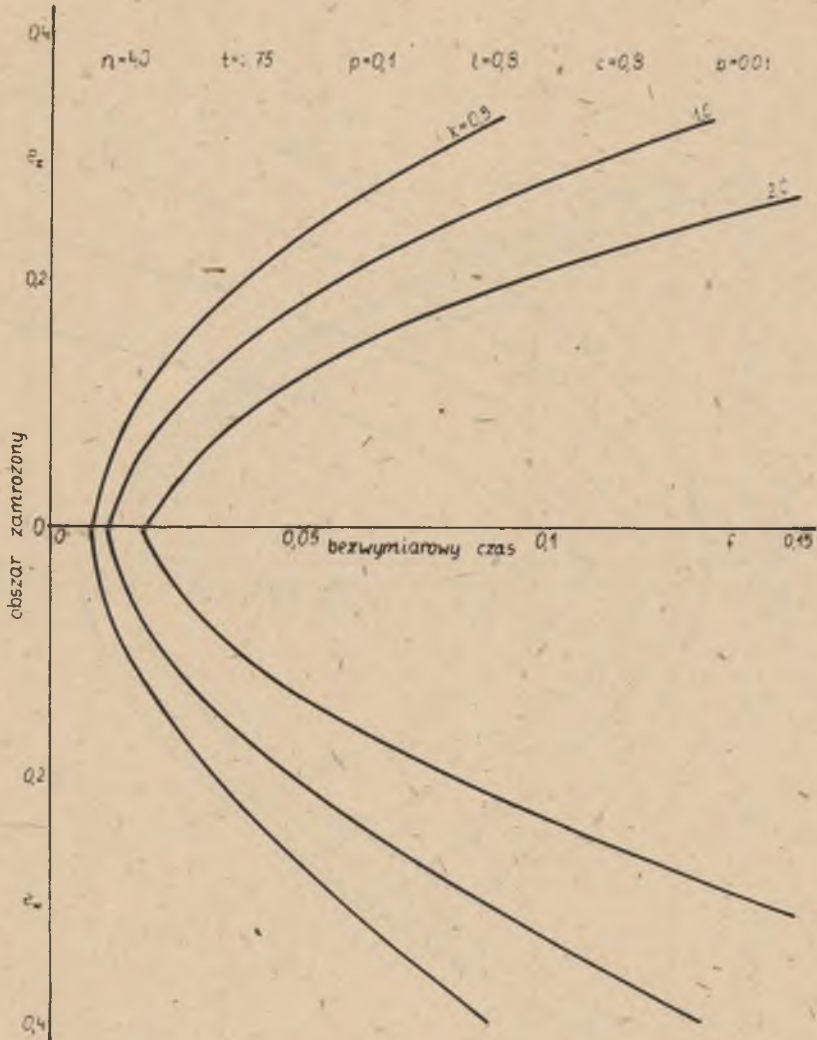
$$b_d = \frac{R_d}{R_o} \quad (42)$$

3.2. Wyznaczenie bezwymiarowej grubości płaszcza mrozeniowego przy jednym kręgu otworów

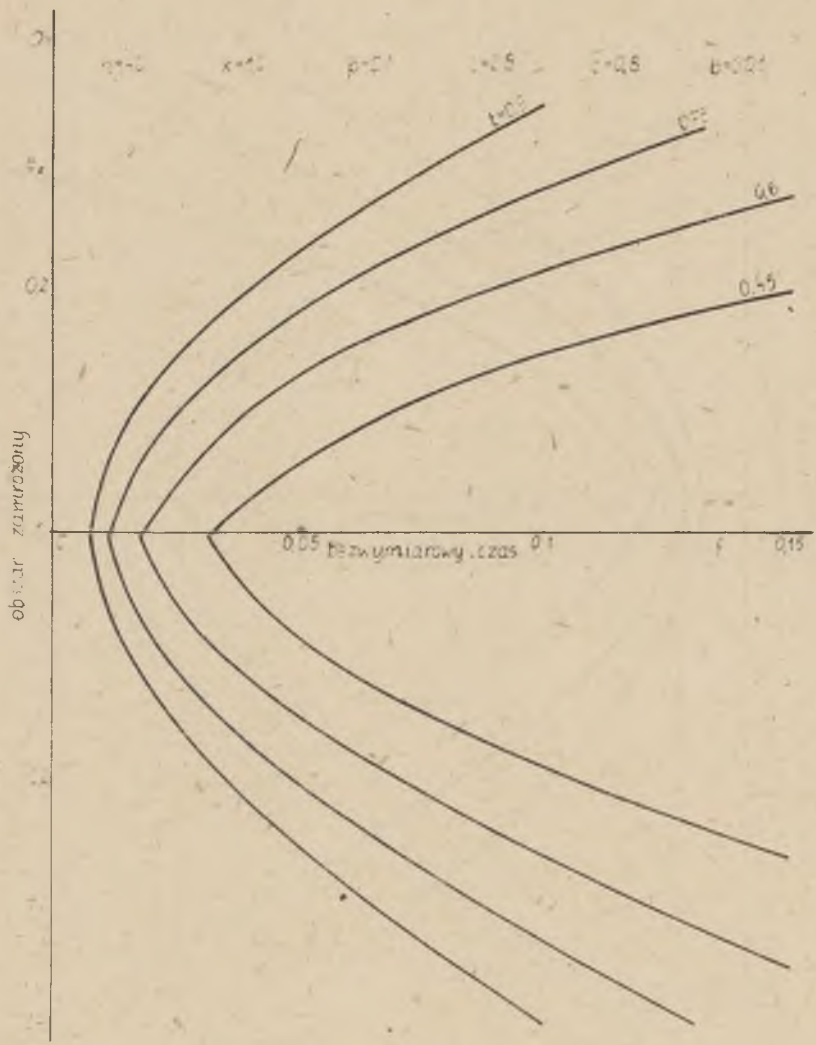
W celu zbadania wpływu poszczególnych bezwymiarowych parametrów na przebieg krzywych charakteryzujących położenie granic obszaru zamrożonego w funkcji czasu wykonano obliczenia, których wyniki przedstawiono na rys. 25 [26]. Obliczenia zrealizowano dla spotykanego na ogół w praktyce zakresu zmienności badanych parametrów. Z podanych wyników obliczeń wynika, że w sposób istotny wpływają na przebieg procesu mrożenia parametry n, k, t i l . Wielkości p, c i b mają mniejsze znaczenie. Szczególnie ważne są kolejno: bezwymiarowa temperatura zamrażania t , stosunek współczynników przewodzenia ciepła górotworu l , bezwymiarowa entalpia zamrażania k . Wyraźny jest, choć nie tak istotny dla $n > 40$, wpływ liczby rur. Mniejsze znaczenie ma bezwymiarowy promień zewnętrzny rury mrozeniowej b oraz bezwymiarowy opór przenikania ciepła od górotworu do chłodziwa p . Ten ostatni parametr dla $p < 0,1$ praktycznie nie wpływa na przebieg procesu mrożenia. Opór przewodzenia ciepła przez rurę mrozeniową oraz opór wnikania do chłodziwa jest wtedy znikomo mały w porównaniu do oporów przewodzenia



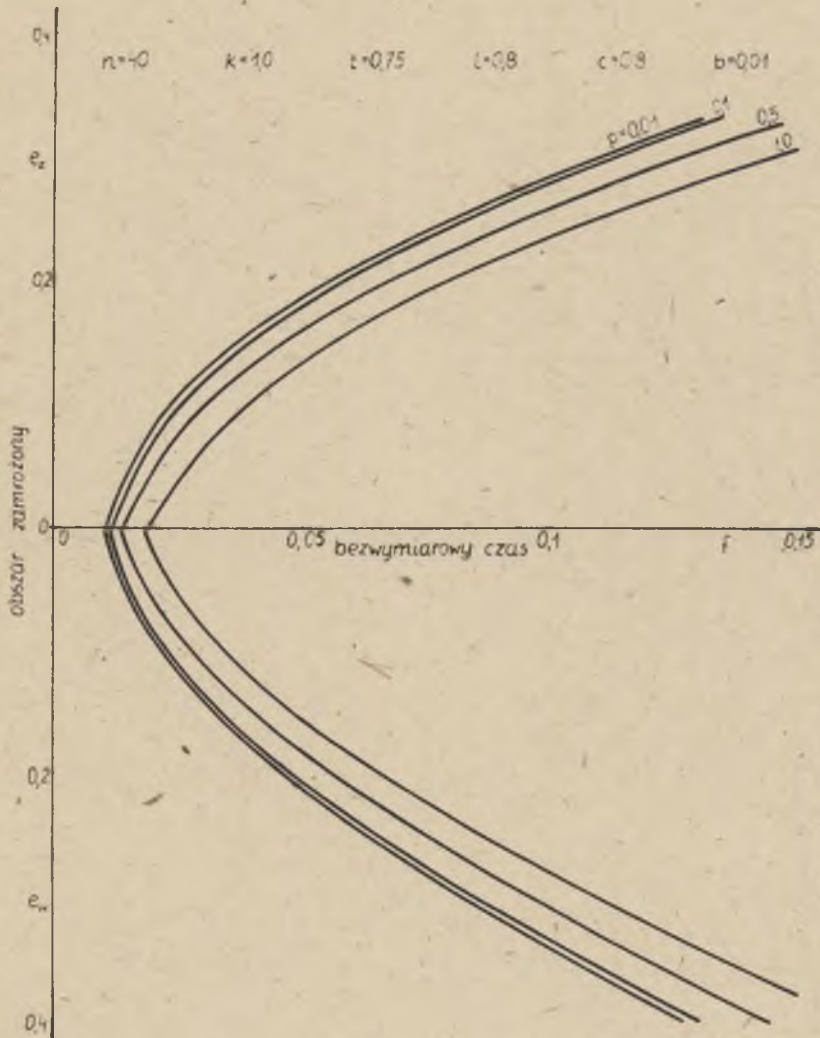
Rys. 25a. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mroźniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mroźnienia



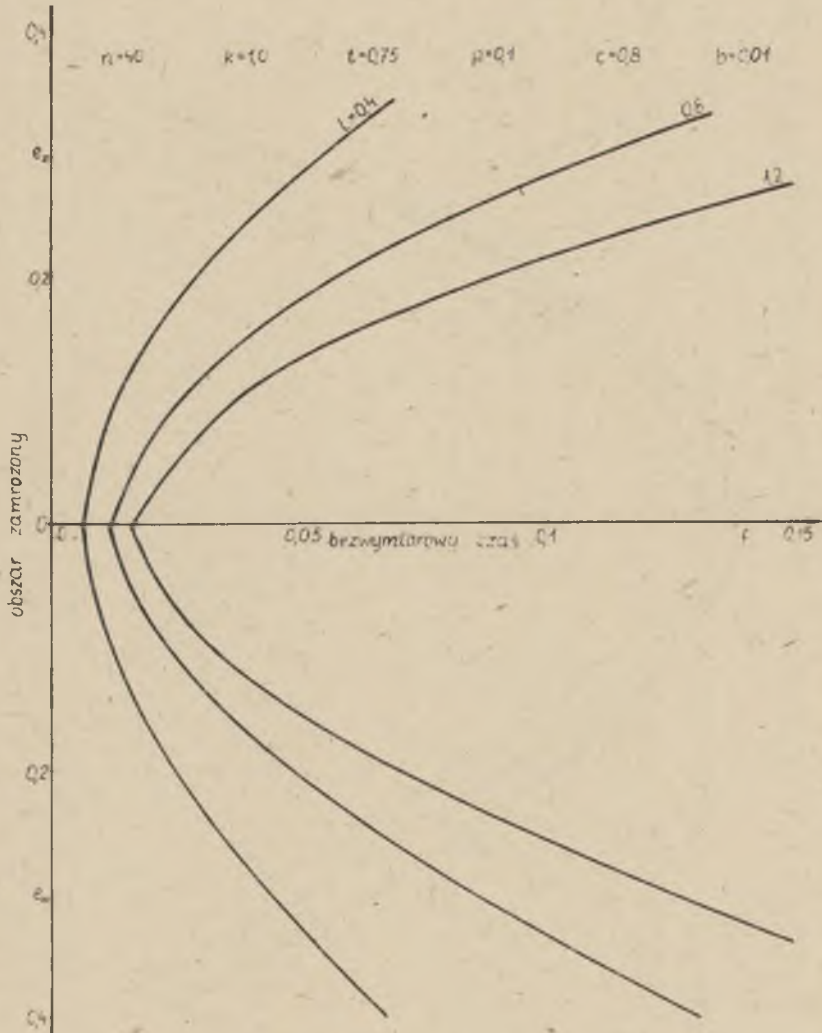
Rys. 25b. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mroźniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrożenia



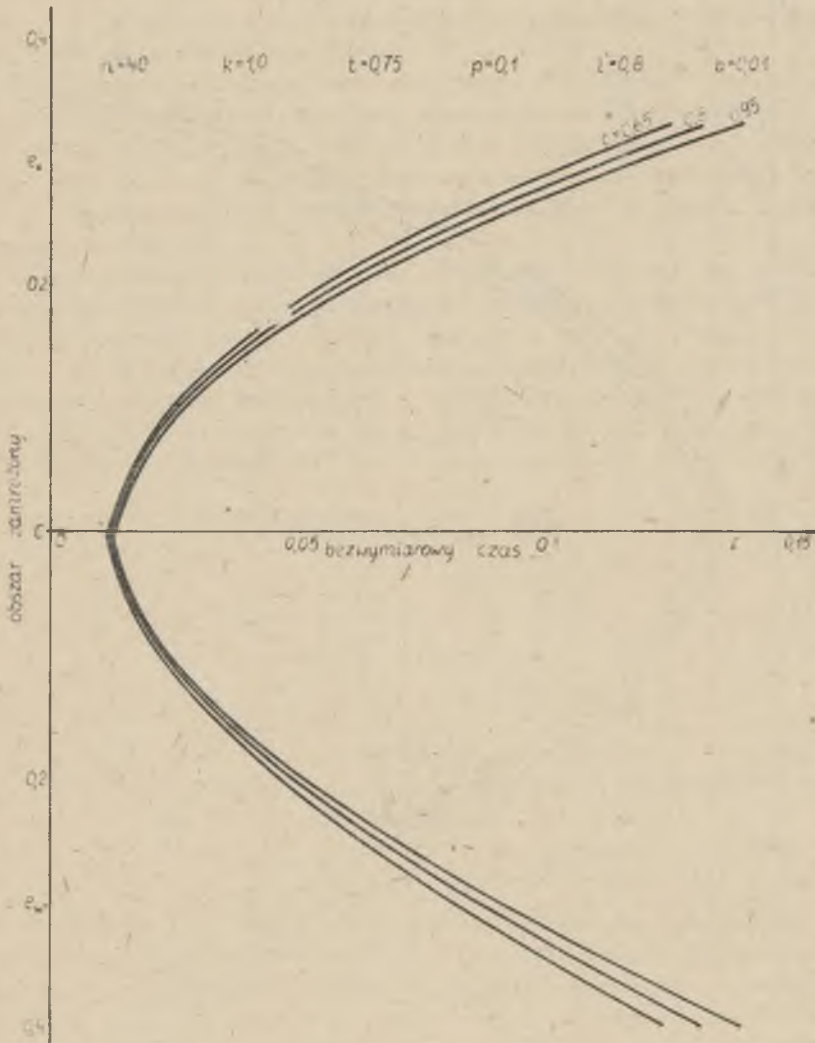
Rys. 25c. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mrozeniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrożenia



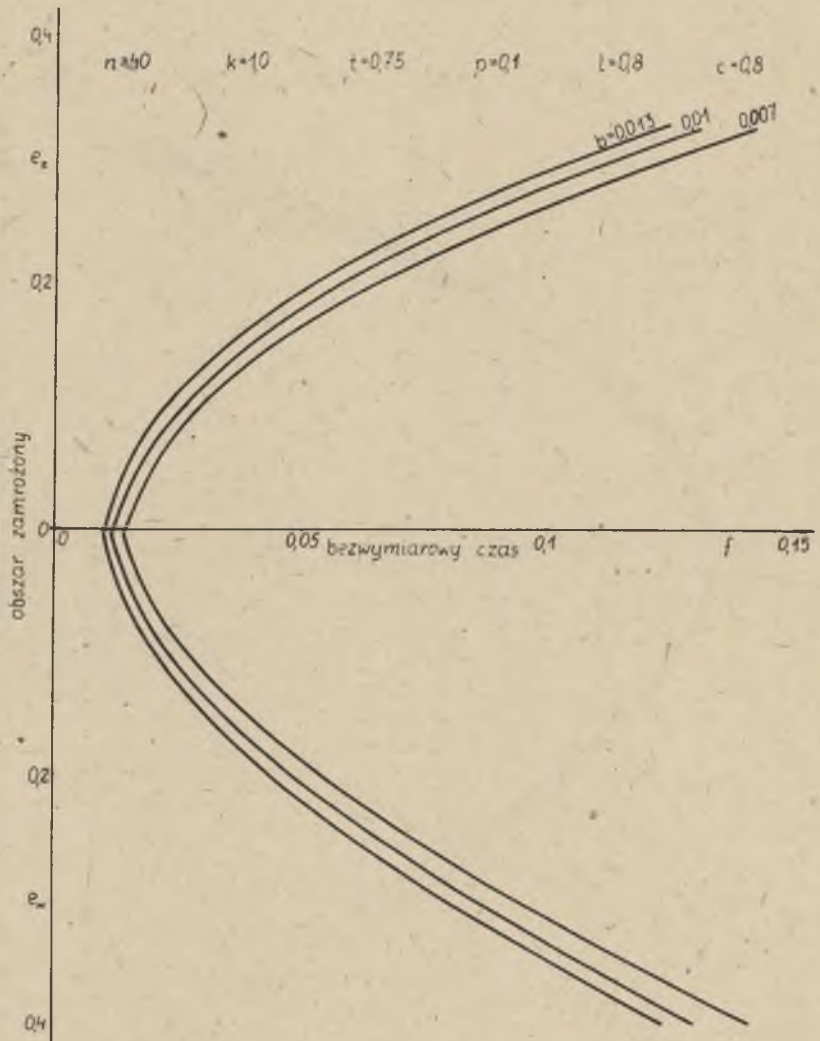
Rys. 25d. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mrozeniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrozenia



Rys. 25e. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mroźeniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrożenia.



Rys. 25f. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mroźeniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrożenia



Rys. 25g. Zależność bezwymiarowej grubości płaszczu mroźniowego od bezwymiarowego czasu przy różnych wartościach bezwymiarowych parametrów mrożenia

ciepła występujących w górotworze. Najmniejszy wpływ ma stosunek pojemności cieplnych górotworu c . Spowodowane to jest małym stosunkiem ilości ciepła odebranego od górotworu po jego zamrożeniu do całkowitej entalpii zamrażania wody. Spośród wymienionych wielkości przyspieszająco na proces mrożenia oddziałuje zwiększenie parametrów n, t oraz b . Wzrost liczb k, p, l i c powoduje zmniejszenie grubości płaszczka mroźniowego lub wydłużenie czasu zamrażania.

Przedstawione wyniki obliczeń spowodowały podzielenie bezwymiarowych parametrów na dwie grupy. Działanie parametrów bardziej istotnych, do których należą n, k, t i l , zbadano w sposób szczegółowy. Wpływ pozostałych liczb, tzn. p, c i b , określono tylko dla przypadków skrajnych mrożenia oraz w sytuacji, gdy inne parametry miały typowe wartości, najczęściej spotykane w praktyce.

Analiza krzywych przedstawionych na rys. 25 prowadzi do wniosku, że składowe grubości płaszczka mroźniowego wewnątrz i na zewnątrz kręgu otworów są w przybliżeniu funkcjami typu $Af + B\sqrt{f} + C$, gdzie wielkości A, B i C są stałe dla każdej krzywej. Aproksymacja taka nie jest słuszna dla płaszczki mroźniowych o małych grubościach jak również dla przypadku, gdy granica strefy zamrożonej zbliża się do osi szybu. Można zatem dla pewnego przedziału czasu mrożenia napisać

$$e = e_z + e_w, \quad (43a)$$

$$e_z = A_z f + B_z \sqrt{f} + C_z, \quad (43b)$$

$$e_w = A_w f + B_w \sqrt{f} + C_w, \quad (43c)$$

gdzie:

e_z, e_w

- bezwymiarowa grubość części płaszczka mroźniowego na zewnątrz i wewnątrz kręgu otworów mroźniowych.

$A_z, B_z, C_z, A_w, B_w, C_w$ - stałe dla danego przypadku, tzn. przy przyjętych parametrach mrożenia.

W pracy [22, 23] proponuje się podobną zależność, przyjmując jednak $C = 0$. Jak wynika z rys. 25 założenie takie nie ma uzasadnienia. Przed rozpatrzeniem zależności (43) zbadano możliwość zastosowania aproksymacji typu $A\sqrt{f} + B$, przy stałych A i B . Krzywa tego typu jednak niezbyt dokładnie oddaje przebieg granicy obszaru zamrożonego wewnątrz kręgu otworów.

Stałe A_z, B_z, C_z oraz A_w, B_w i C_w określono dla 129 przypadków. Za pomocą równań różnicowych z ilorazem przednim wyznaczono przebieg granicy obszaru zamrożonego, a następnie z warunku minimum sumy kwadratów różnic pomiędzy wartościami obliczonymi i wynikającymi z równań (43) określono poszukiwane stałe. Wyniki obliczeń podaje zestawienie 6. Zakres zmienności bezwymiarowego czasu mrożenia f , dla którego można korzystać

Wartości stałych w równaniu (43) dla $n = 30$

Wariant			Wartości stałych						Zakres zmienności f	
			po stronie zewnętrznej			po stronie wewnętrznej				
			A_z	B_z	C_z	A_w	H_w	C_w		
$c = 0,8$	$1 = 0,4$	$k = 0,5$	0,45	-0,898	1,783	-0,214	0,180	1,786	-0,225	0,054 \pm 0,124
			0,60	0,089	1,555	-0,121	0,459	1,910	-0,162	0,030 \pm 0,082
			0,75	-0,579	2,162	-0,134	1,057	1,996	-0,114	0,018 \pm 0,056
			0,90	-2,232	2,995	-0,149	0,748	2,486	-0,108	0,011 \pm 0,039
		$k = 1,0$	0,45	-0,964	1,732	-0,249	0,427	1,277	-0,183	0,071 \pm 0,171
			0,60	-0,629	1,680	-0,173	0,655	1,382	-0,132	0,041 \pm 0,117
			0,75	-0,509	1,818	-0,141	0,694	1,628	-0,116	0,027 \pm 0,084
			0,90	-1,205	2,300	-0,147	0,513	1,963	-0,111	0,018 \pm 0,063
		$k = 2,0$	0,45	-0,629	1,392	-0,242	0,423	0,873	-0,140	0,103 \pm 0,262
			0,60	-0,498	1,395	-0,182	0,429	1,067	-0,126	0,078 \pm 0,186
			0,75	-0,504	1,527	-0,159	0,348	1,301	-0,123	0,043 \pm 0,140
			0,90	-0,712	1,760	-0,153	0,277	1,510	-0,119	0,031 \pm 0,109
$b = 0,01$	$1 = 0,8$	$k = 0,5$	0,45	-1,135	1,669	-0,284	1,321	0,388	-0,059	0,104 \pm 0,218
			0,60	-0,849	1,586	-0,193	0,627	1,168	-0,135	0,056 \pm 0,148
			0,75	-0,094	1,386	-0,112	0,674	1,380	-0,107	0,034 \pm 0,104
			0,90	-1,056	2,070	-0,139	0,326	1,805	-0,106	0,020 \pm 0,074
		$k = 1,0$	0,45	-0,610	1,250	-0,246	0,666	0,578	-0,111	0,138 \pm 0,302
			0,60	-0,658	1,384	-0,204	0,560	0,868	-0,113	0,078 \pm 0,214
			0,75	-0,381	1,333	-0,143	0,445	1,129	-0,110	0,050 \pm 0,156
			0,90	-0,534	1,577	-0,135	0,275	1,404	-0,107	0,034 \pm 0,118
		$k = 2,0$	0,45	-0,288	0,898	-0,214	0,242	0,681	-0,161	0,202 \pm 0,370
			0,60	-0,382	1,072	-0,196	0,292	0,733	-0,121	0,122 \pm 0,340
			0,75	-0,295	1,090	-0,155	0,246	0,895	-0,116	0,082 \pm 0,260
			0,90	-0,347	1,230	-0,144	0,146	1,084	-0,116	0,058 \pm 0,204
$d = 0,1$	$1 = 1,2$	$k = 0,5$	0,45	-0,151	0,748	-0,148	1,173	0,172	-0,048	0,171 \pm 0,306
			0,60	0,284	0,615	-0,070	0,733	0,782	-0,112	0,090 \pm 0,213
			0,75	-0,594	1,418	-0,154	0,622	1,053	-0,099	0,051 \pm 0,153
			0,90	-0,592	1,621	-0,128	0,319	1,433	-0,100	0,030 \pm 0,108
		$k = 1,0$	0,45	-0,217	0,784	-0,180	0,581	0,385	-0,096	0,222 \pm 0,429
			0,60	-0,128	0,826	-0,140	0,424	0,720	-0,124	0,123 \pm 0,306
			0,75	-0,463	1,220	-0,167	0,404	0,869	-0,103	0,075 \pm 0,228
			0,90	-0,410	1,316	-0,138	0,175	1,165	-0,110	0,048 \pm 0,174
		$k = 2,0$	0,45	-0,310	0,868	-0,263	0,094	0,640	-0,186	0,321 \pm 0,675
			0,60	-0,210	0,807	-0,180	0,159	0,669	-0,143	0,186 \pm 0,492
			0,75	-0,286	0,961	-0,171	0,175	0,742	-0,119	0,120 \pm 0,378
			0,90	-0,247	1,013	-0,143	0,096	0,897	-0,116	0,084 \pm 0,300
$1 = 1,2, k = 2,0, c = 0,8$	$b = 0,01$	$p = 0,1$	-0,315	0,870	-0,257	0,095	0,642	-0,181	0,309 \pm 0,660	
		$p = 0,5$	-0,278	0,846	-0,285	0,093	0,624	-0,204	0,375 \pm 0,741	
		$p = 1,0$	-0,208	0,761	-0,287	0,094	0,602	-0,222	0,450 \pm 0,828	
	$b = 0,1$	$p = 0,007$	-0,279	0,849	-0,288	0,092	0,623	-0,205	0,378 \pm 0,747	
	$b = 0,8$	$p = 0,013$	-0,329	0,873	-0,240	0,096	0,649	-0,169	0,279 \pm 0,624	
	$b = 0,1$	$c = 0,65$	-0,315	0,877	-0,266	0,094	0,645	-0,188	0,318 \pm 0,669	
$b = 0,01$	$c = 0,95$	-0,314	0,872	-0,265	0,089	0,641	-0,180	0,321 \pm 0,681		

Wartości stałych w równaniu (43) dla $n = 40$

Wariant		Wartości stałych						Zakres zmienności f		
		po stronie zewnętrznej			po stronie wewnętrznej					
		A_z	B_z	C_z	A_w	B_w	C_w			
$c = 0,8$	$l = 0,4$	$k = 0,5$	$t = 0,45$	-0,257	1,308	-0,086	0,342	1,566	-0,123	0,033 ± 0,103
			$t = 0,60$	-0,399	1,687	-0,083	0,838	1,680	-0,083	0,019 ± 0,069
			$t = 0,75$	-0,943	2,183	-0,087	1,347	1,874	-0,061	0,012 ± 0,048
			$t = 0,90$	0,042	2,281	-0,060	1,571	2,228	-0,053	0,008 ± 0,034
		$k = 1,0$	$t = 0,45$	-0,304	1,198	-0,098	0,466	1,178	-0,099	0,044 ± 0,143
			$t = 0,60$	-0,488	1,514	-0,096	0,519	1,415	-0,084	0,027 ± 0,099
			$t = 0,75$	-0,758	1,837	-0,093	0,560	1,661	-0,076	0,018 ± 0,072
			$t = 0,90$	-0,671	2,038	-0,081	0,534	1,933	-0,070	0,012 ± 0,054
		$k = 2,0$	$t = 0,45$	-0,239	1,000	-0,104	0,388	0,870	-0,083	0,066 ± 0,221
			$t = 0,60$	-0,379	1,244	-0,102	0,349	1,093	-0,080	0,042 ± 0,158
			$t = 0,75$	-0,514	1,458	-0,098	0,320	1,293	-0,077	0,029 ± 0,120
			$t = 0,90$	-0,508	1,601	-0,088	0,284	1,486	-0,074	0,021 ± 0,094
	$l = 0,8$	$k = 0,5$	$t = 0,45$	0,411	0,476	-0,013	0,904	0,682	-0,058	0,066 ± 0,186
			$t = 0,60$	-0,059	1,047	-0,062	0,586	1,146	-0,079	0,036 ± 0,128
			$t = 0,75$	-0,575	1,549	-0,083	0,722	1,338	-0,059	0,022 ± 0,090
			$t = 0,90$	-0,445	1,771	-0,068	0,530	1,710	-0,059	0,014 ± 0,064
		$k = 1,0$	$t = 0,45$	-0,152	0,778	-0,084	0,594	0,621	-0,064	0,088 ± 0,258
			$t = 0,60$	-0,241	1,018	-0,085	0,489	0,894	-0,067	0,050 ± 0,182
			$t = 0,75$	-0,433	1,300	-0,089	0,383	1,146	-0,068	0,032 ± 0,134
			$t = 0,90$	-0,470	1,493	-0,080	0,278	1,385	-0,065	0,022 ± 0,102
		$k = 2,0$	$t = 0,45$	-0,202	0,739	-0,108	0,272	0,600	-0,083	0,130 ± 0,400
			$t = 0,60$	-0,164	0,825	-0,087	0,286	0,724	-0,071	0,08 ± 0,292
			$t = 0,75$	-0,273	1,023	-0,092	0,225	0,896	-0,071	0,054 ± 0,222
			$t = 0,90$	-0,328	1,171	-0,088	0,137	1,074	-0,072	0,038 ± 0,176
$l = 1,2$	$k = 0,5$	$t = 0,45$	-0,367	0,834	-0,100	1,277	0,080	0,026	0,108 ± 0,264	
		$t = 0,60$	-0,453	1,072	-0,097	0,634	0,823	-0,068	0,057 ± 0,186	
		$t = 0,75$	-0,225	1,153	-0,069	0,566	1,070	-0,059	0,033 ± 0,132	
		$t = 0,90$	-0,455	1,501	-0,072	0,436	1,361	-0,054	0,021 ± 0,093	
	$k = 1,0$	$t = 0,45$	-0,187	0,666	-0,092	0,589	0,385	-0,045	0,141 ± 0,366	
		$t = 0,60$	-0,339	0,934	-0,105	0,434	0,689	-0,066	0,078 ± 0,264	
		$t = 0,75$	-0,246	1,014	-0,081	0,364	0,884	-0,061	0,048 ± 0,198	
		$t = 0,90$	-0,344	1,227	-0,079	0,222	1,120	-0,063	0,033 ± 0,150	
	$k = 2,0$	$t = 0,45$	-0,064	0,491	-0,07	0,159	0,550	-0,104	0,204 ± 0,573	
		$t = 0,60$	-0,205	0,744	-0,105	0,210	0,601	-0,075	0,120 ± 0,420	
		$t = 0,75$	-0,163	0,806	-0,085	0,189	0,717	-0,068	0,081 ± 0,324	
		$t = 0,90$	-0,228	0,956	-0,085	0,117	0,865	-0,067	0,057 ± 0,258	
$l = 0,8$ $k = 1,0$ $t = 0,75$	$b = 0,01$	$p = 0,01$	-0,431	1,297	-0,083	0,354	1,168	-0,066	0,032 ± 0,132	
	$c = 0,8$	$p = 0,5$	-0,330	1,240	-0,102	0,459	1,077	-0,080	0,040 ± 0,150	
	$b = 0,1$	$p = 1,0$	-0,245	1,182	-0,117	0,565	0,975	-0,089	0,048 ± 0,168	
	$c = 0,8$	$b = 0,007$	-0,364	1,261	-0,099	0,436	1,099	-0,078	0,038 ± 0,146	
	$b = 0,1$	$c = 0,013$	-0,448	1,303	-0,077	0,338	1,183	-0,061	0,030 ± 0,128	
	$c = 0,8$	$b = 0,65$	-0,461	1,327	-0,091	0,348	1,162	-0,069	0,032 ± 0,132	
	$b = 0,01$	$c = 0,95$	-0,382	1,260	-0,085	0,362	1,136	-0,068	0,034 ± 0,138	

Wartości stałych w równaniu (43) dla $n = 50$

Wariant		Wartości stałych						Zakres zmienności f		
		po stronie zewnętrznej			po stronie wewnętrznej					
		A _Z	B _Z	C _Z	A _W	B _W	C _W			
c = 0,8	l = 0,4	k = 0,5	0,45	-0,753	1,526	-0,086	0,688	1,381	-0,077	0,024 ± 0,098
			0,60	-0,432	1,691	-0,062	0,792	1,703	-0,066	0,014 ± 0,065
			0,75	-0,101	1,931	-0,049	0,874	2,052	-0,058	0,009 ± 0,045
			0,90	-1,168	2,583	-0,058	0,901	2,437	-0,049	0,006 ± 0,032
	l = 1,0	k = 1,0	0,45	-0,584	1,326	-0,089	0,526	1,138	-0,070	0,033 ± 0,134
			0,60	-0,464	1,483	-0,069	0,498	1,428	-0,065	0,020 ± 0,093
			0,75	-0,391	1,695	-0,059	0,452	1,715	-0,061	0,014 ± 0,067
			0,90	-0,951	2,115	-0,065	0,389	1,995	-0,056	0,010 ± 0,051
	l = 2,0	k = 2,0	0,45	-0,361	1,058	-0,086	0,374	0,877	-0,061	0,050 ± 0,205
			0,60	-0,369	1,216	-0,073	0,324	1,110	-0,061	0,032 ± 0,147
			0,75	-0,297	1,337	-0,061	0,348	1,282	-0,055	0,022 ± 0,111
			0,90	-0,465	1,565	-0,062	0,297	1,484	-0,054	0,017 ± 0,087
p = 0,31	l = 0,5	k = 0,5	0,45	-0,423	0,991	-0,068	0,951	0,643	-0,027	0,046 ± 0,174
			0,60	-0,546	1,271	-0,066	0,601	1,125	-0,052	0,026 ± 0,120
			0,75	-0,077	1,319	-0,038	0,537	1,420	-0,048	0,016 ± 0,084
			0,90	-0,499	1,770	-0,047	0,653	1,659	-0,036	0,010 ± 0,060
	l = 1,0	k = 1,0	0,45	-0,230	0,807	-0,061	0,645	0,573	-0,029	0,062 ± 0,240
			0,60	-0,408	1,091	-0,070	0,460	0,707	-0,047	0,038 ± 0,170
			0,75	-0,270	1,192	-0,052	0,356	1,156	-0,048	0,024 ± 0,126
			0,90	-0,416	1,452	-0,055	0,225	1,409	-0,049	0,018 ± 0,094
	l = 2,0	k = 2,0	0,45	-0,134	0,650	-0,060	0,337	0,530	-0,041	0,094 ± 0,368
			0,60	-0,236	0,855	-0,066	0,285	0,719	-0,046	0,058 ± 0,270
			0,75	-0,226	0,968	-0,059	0,224	0,892	-0,047	0,040 ± 0,206
			0,90	-0,236	1,098	-0,054	0,160	1,054	-0,048	0,030 ± 0,167
p = 0,1	l = 1,2	k = 0,5	0,45	0,119	0,459	-0,007	1,110	0,230	0,018	0,072 ± 0,246
			0,60	0,060	0,740	-0,023	0,689	0,772	-0,034	0,039 ± 0,171
			0,75	-0,360	1,188	-0,048	0,443	1,131	-0,046	0,024 ± 0,123
			0,90	-0,154	1,352	-0,035	0,379	1,387	-0,038	0,015 ± 0,087
	l = 1,0	k = 1,0	0,45	-0,161	0,624	-0,054	0,630	0,336	-0,008	0,099 ± 0,339
			0,60	-0,099	0,733	-0,042	0,481	0,643	-0,032	0,057 ± 0,243
			0,75	-0,208	1,017	-0,056	0,320	0,908	-0,043	0,036 ± 0,183
			0,90	-0,227	1,146	-0,047	0,250	1,098	-0,039	0,024 ± 0,138
	l = 2,0	k = 2,0	0,45	-0,157	0,550	-0,065	0,229	0,460	-0,051	0,144 ± 0,525
			0,60	-0,115	0,637	-0,052	0,241	0,564	-0,041	0,087 ± 0,387
			0,75	-0,188	0,803	-0,059	0,191	0,709	-0,043	0,060 ± 0,300
			0,90	-0,151	0,884	-0,049	0,139	0,843	-0,042	0,042 ± 0,237
a = 0,4 ± 0,15 t = 0,10	b = 0,01	0,01	-2,113	2,844	-0,068	0,113	2,670	-0,057	0,006 ± 0,031	
		0,5	-0,782	2,442	-0,076	1,102	2,298	-0,068	0,008 ± 0,037	
		1,0	0,132	2,090	-0,077	1,798	1,960	-0,070	0,010 ± 0,043	
c = 0,1	b = 0,007	0,007	-1,386	2,645	-0,074	0,695	2,472	-0,064	0,007 ± 0,034	
		0,013	-1,302	2,613	-0,050	1,348	2,374	-0,031	0,005 ± 0,031	
d = 0,1	c = 0,05	0,65	-1,736	2,784	-0,068	0,349	2,663	-0,060	0,006 ± 0,031	
		0,95	-0,852	2,444	-0,051	0,853	2,368	-0,046	0,006 ± 0,034	

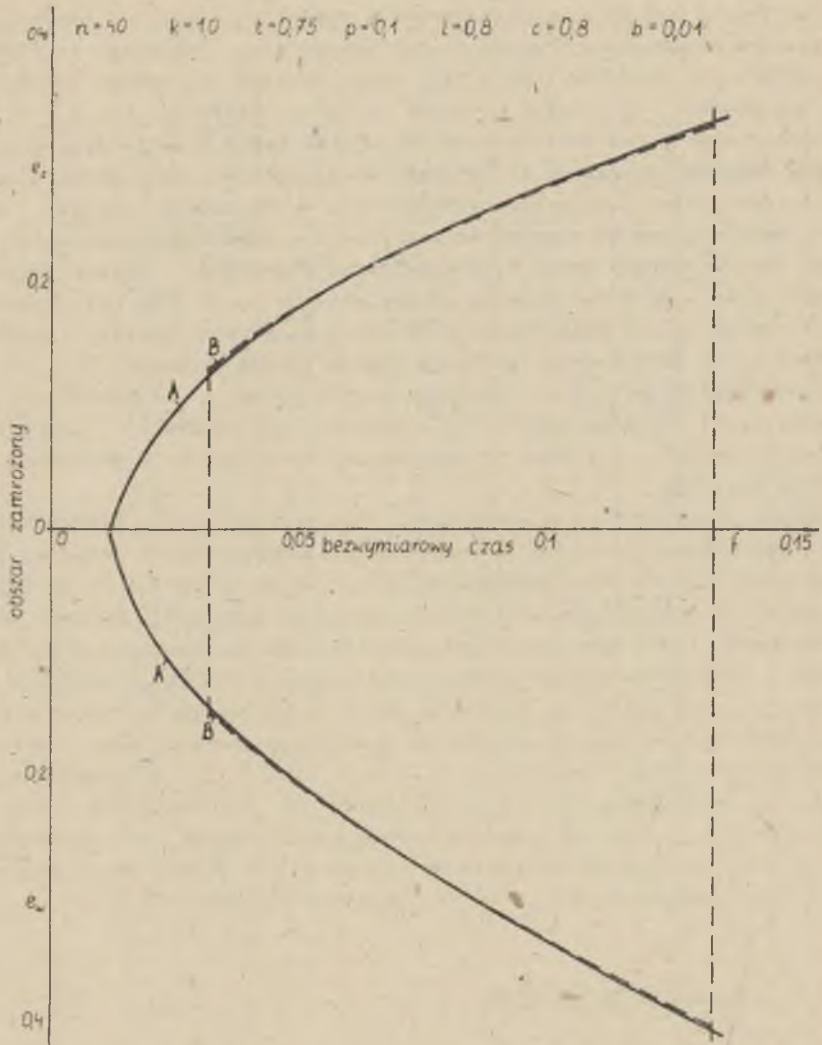
z wyznaczonych stałych został tak dobrany, że uwzględnione są ograniczenia uprzednio wymienione. Dolna granica czasu f dotyczy momentu, gdy wyznaczona numerycznie grubość części zewnętrznej płaszcza mrozeniowego e_z przekracza nieco wartość 0,125. Górna wartość f odnosi się do chwili, gdy grubość e_w osiąga wielkość ok. 0,4. Stałe $A_z, B_z, C_z, A_w, B_w, C_w$, jak wynika z zestawienia 6, przyjmują wartości nie podlegające regularnym zmianom, związanym ze zmianami poszczególnych parametrów. Taki pozornie dość chaotyczny przebieg zmienności wyznaczonych stałych wynika stąd, że służą one do odwzorowania krzywych w dość wąskich zakresach zmienności bezwymiarowego czasu f . W rezultacie niewielka zmiana przebiegu krzywej może spowodować znaczną zmianę stałych A, B i C , przy czym wyniki otrzymane z (43) mimo tego różnią się nieznacznie. Zakresy zmienności f , mimo iż są dość wąskie, obejmują jednak typowe przypadki.

Porównanie rezultatów otrzymanych bezpośrednio z obliczeń oraz z zależności (43) i zestawienia 6 dla przypadku, gdy parametry bezwymiarowe przyjmują wartości zbliżone do najczęściej spotykanych w praktyce, pokazano na rys. 26.

Wyniki przedstawione w zestawieniu 6 dotyczą przypadku zamrażania jednym kręgiem rur. Wyniki te, z pewnym przybliżeniem, można również zastosować przy rozpatrywaniu zamrażania dwoma kręgami otworów. W tym przypadku całkowita grubość płaszcza mrozeniowego, po zamrożeniu przestrzeni między kręgami, jest równa sumie grubości płaszcza na zewnątrz kręgu zewnętrznego, odległości między kręgami oraz grubości płaszcza wewnątrz kręgu wewnętrznego. Grubości te wyznaczyć można na podstawie zestawienia 6, przy czym część bezwymiarowych parametrów oraz bezwymiarowy czas przyjmują różne wartości przy wyznaczaniu e_z i e_w . Wynika to z innego promienia kręgu R_0 oraz ewentualnie z innej liczby rur n . Dodatkowy niewielki błąd wywołany faktem, że przy zamrażaniu dwoma kręgami w nieco inny sposób na przebieg procesu mrożenia wpływa przepływ ciepła przez powierzchnie walcowe kręgów otworów, nie ma istotnego znaczenia.

3.3. Analiza błędów obliczeń

Wyniki otrzymane po zastosowaniu równań różnicowych obarczone są pewnym błędem. Błąd ten wynika z przyjęcia skończonej długości interwału czasu, z zastosowania podziału na elementy o skończonych wymiarach oraz, w przypadku złożonej geometrii jak przy zamrażaniu górotworu, powstanie błędu jest też rezultatem założenia kształtu powierzchni izotermicznych. Wyniki obliczeń przedstawione w p. 3.2 są dodatkowo obarczone błędem wynikającym z przyjęcia aproksymacji opisanej zależnościami (43). Błędy samej metody różnicowej mają charakter systematyczny. W przypadku analizy, za pomocą równań różnicowych z ilorazem przednim, procesu zamrażania górotworu otrzymuje się zbyt długie czasy mrożenia lub zbyt małe grubości



Rys. 26. Zależność bezwymiarowej grubości płaszcza mroźniowego od bezwymiarowego czasu

A - krzywa otrzymane bezpośrednio z obliczeń, B - krzywe otrzymane na podstawie zależności (43) i danych zawartych w zestawieniu 6

płaszcza mroźeniowego. Wynika to stąd, że w momencie rozpoczęcia procesu temperatura całej warstwy jest stała i gradient temperatury powstaje w wyniku oddziaływania rur mroźeniowych. Na początku interwału czasu różnice pomiędzy temperaturami elementów są najmniejsze (z wyjątkiem fazy ochładzania zamrożonej części górotworu), a zatem strumienie ciepła są wyznaczone z niedomiarem. Efekt ten jest szczególnie wyraźny we wstępnym etapie zamrażania warstwy. Z tego też względu przy wykonywaniu obliczeń w p. 3.2 przez okres do momentu otrzymania po stronie zewnętrznej płaszcza o grubości, w zależności od liczby rur n , $e_z = 0,075 \div 0,1$, stosowano interwał czasowy o długości 4 razy mniejszej niż w etapie dalszym. Postępowanie takie pozwoliło na zmniejszenie błędu metody w niektórych przypadkach o ponad 30%.

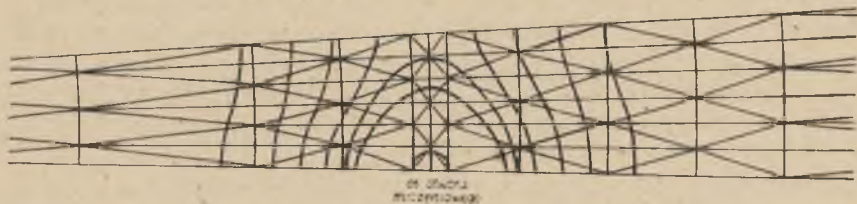
W celu oszacowania błędu metody, wynikającego ze skończonych wartości wymiarów elementów oraz ze skończonej długości kroku czasowego, wykonano dla kilku przypadków obliczenia przy różnych podziałach różnicowych oraz przy różnych długościach interwału czasu. Ekstrapolacja wyników dla przyjętego podziału na elementy różnicowe, przy zmiennych długościach kroku czasowego, pozwoliła oszacować wynik, który odpowiadałby nieskończeniu małemu interwałowi czasowemu. Krzywa otrzymana z tak osiągniętych wyników dla różnych podziałów pozwala z kolei na drodze ekstrapolacji oszacować rezultat, jaki zostałby otrzymany dla nieskończenie małego kroku czasowego i przy podziale na elementy różnicowe o nieskończenie małej szerokości. Takie postępowanie wykazuje, że dla $l = 0,8$ oraz $l = 1,2$ błąd w ocenie grubości płaszcza mroźeniowego wynikający z istoty metody waha się w granicach 0-4%, dla $l = 0,4$ zaś błąd ten dochodzi do 6%. Granica 6% zostaje nieco przekroczona przy małych k i t . Górne wartości błędu dotyczą dolnych wartości czasu f zamieszczonych w zestawieniu 6. Dla czasów mrożenia zbliżonych do maksymalnych podanych w zestawieniu 6 błąd w ocenie grubości e nie przekracza 2% dla $l = 0,8$ i $l = 1,2$ oraz dochodzi do 4% dla $l = 0,4$.

Błąd metody w obliczeniach przedstawionych w p. 2 jest większy ze względu na przyjmowanie stałej długości kroku czasowego. Błąd ten nie jest jednak znaczny, gdyż dyskusja dotyczy stosunkowo dużych grubości płaszcza mroźeniowego. Należy zatem liczyć się z błędem metody ok. 3%, z wyjątkiem obliczeń wykonanych dla przypadku jak na rys. 13 i 14, gdzie błąd jest nieco większy. Istotny jest przy tym fakt, że ze względu na systematyczny charakter rozpatrywanego błędu relacja pomiędzy wynikami otrzymanymi dla różnych wariantów mrożenia jest obciążona błędem znikomym.

Rozważania powyższe dotyczą błędu wynikającego ze skończonej długości kroku czasowego oraz ze skończonej szerokości elementów. Dodatkowy błąd wynika z aproksymacji wyrażonej zależnościami (43). W celu oszacowania tego błędu wykonano dla kilkunastu wariantów obliczenia przy bardzo drobnym podziale na elementy różnicowe. Wyniki obliczeń prowadzą do wniosku, że przyjęta zależność dokładnie oddaje przebieg zmienności grubości pła-

szcza mroźeniowego. Błąd aproksymacji wynosi ok. 1%, przy czym nieco przekracza w pewnych przypadkach 1% dla małych wartości e .

Najtrudniejszy do oszacowania jest błąd spowodowany założonym kształtem izoterm, nieco odbiegającym od rzeczywistości. Izotermy bowiem w pobliżu adiabatycznej płaszczyzny symetrii przestrzeni pomiędzy sąsiednimi otworami mroźeniowymi ulegają takiemu wygięciu, że są do tej płaszczyzny prostopadłe. Przyjęte uproszczenie powoduje, że strumienie ciepła w równaniach bilansu są wyznaczane z dodatkowym błędem. Większa niedokładność wynika jednak ze sposobu określania minimalnej grubości płaszcza mroźeniowego. Przyjęto, że grubość ta występująca w płaszczyznach symetrii jest taka, jak w przypadku, gdy zakrzywienie izoterm pojawia się w nieskończenie małej odległości od płaszczyzn symetrii. W celu oszacowania błędu spowodowanego tym uproszczeniem zostały wykonane pod kierunkiem autora pomocnicze obliczenia, wykorzystujące metodę elementów skończonych, z zastosowaniem ilorazu różnicowego wstecznego^{x)}. Wyniki obliczeń mają charakter jedynie jakościowy, gdyż dotyczą przypadku, gdy entalpia zamarzania górotworu jest znikomo mała. Fragment wyników, w postaci przebiegu izoterm dla określonej chwili w pobliżu otworu mroźeniowego, pokazany jest na rys. 27. Kształt izoterm ulega pewnym zmianom w funkcji czasu i zależy



Rys. 27. Przebieg izoterm w poziomym przekroju ochładzanego górotworu oraz podział na elementy skończone obszaru w pobliżu otworu mroźeniowego

od wielkości entalpii zamarzania. Można się jednak spodziewać, że ogólny charakter izoterm podczas zamrażania będzie zbliżony do przedstawionego na rys. 27. Z rysunku tego wynika, że izotermy mają taki przebieg, jak przyjęto uprzednio (np. w przypadku pokazanym na rys. 6), na ok. 2/3 długości. Należy zatem przypuszczać, że błąd w określeniu strumieni ciepła jest stosunkowo niewielki, istotny jest natomiast błąd wyznaczenia minimalnej grubości płaszcza mroźeniowego, wynikający z pesymistycznego założenia odnośnie do kształtu izoterm w pobliżu miejsca ich zakrzywienia. Szacuje się, że błąd niedomiaru wywołany tym założeniem dochodzi przy

^{x)} Obliczenia wykonała K. Piórkowska w ramach magisterskiej pracy dyplomowej "Wyznaczenie kształtu izoterm w zamrażanym górotworze za pomocą metody elementów skończonych", Politechnika Śląska, ITC, Gliwice 1979.

$n = 40$ dla najmniejszej i największej grubości płaszcza mroźniowego, objętej zakresem uwzględnionym w zestawieniu 6, odpowiednio do 6% i 2% w odniesieniu do e_z oraz do 4% i 1% dla grubości e_w . Analogiczne liczby dla $n = 30$ wynoszą 9% i 3% oraz 6% i 1%, dla $n = 50$ zaś 4% i 1% oraz 3% i 1%.

Obliczenia wykorzystujące metodę elementów skończonych wykazały również, że ze względu na czas obliczeń zastosowanie tej metody do dokładnej analizy procesu mrożenia jest obecnie niezbyt realne. Metoda ta, w celu uzyskania wyników poprawnych fizycznie, wymaga użycia ograniczonego kroku czasowego oraz zastosowania dość drobnego podziału na elementy obszaru w pobliżu otworu mroźniowego.

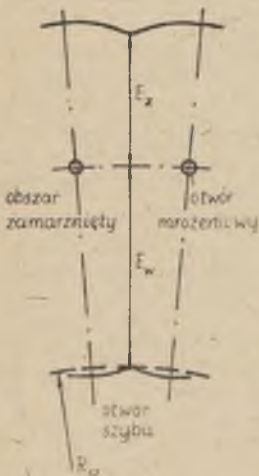
Rozważania powyższe dotyczą błędów wynikających z istoty metody obliczeniowej. Drugim źródłem błędów jest niedokładna znajomość własności fizycznych górotworu. Wielkość wywołanych tym błędów byłaby możliwa do oszacowania, w przypadku gdy znane są błędy określenia tych własności. Prawdopodobnie wpływ niedokładnej znajomości własności fizycznych górotworu jest większy od wpływu podziału różnicowego i długości kroku czasu na dokładność wyników obliczeń.

3.4. Bezwymiarowa optymalizacja wstępna przy jednym kręgu otworów

Promień kręgu otworów mroźniowych powinien być tak dobrany, aby w warstwie determinującej czas zamrażania grubość płaszcza mroźniowego osiągała wymaganą wartość wówczas, gdy jej składowa E_w (rys. 28) jest równa odległości tego kręgu od zewnętrznego promienia otworu szybu R_{sz} .

Optymalna wartość promienia kręgu otworów R_o^{opt} jest funkcją założonej grubości $E = E_z + E_w$ oraz relacji pomiędzy składowymi E_z i E_w . Jak wynika z przykładów rozpatrzonych w p. 2, kształt krzywych określających przebieg zmienności tych składowych w funkcji czasu mrożenia praktycznie nie zależy od mocy agregatów oraz od pojemności cieplnej strumienia chłodziwa. Umożliwia to wyznaczenie optymalnej wartości promienia R_o dla przyjętej liczby otworów bez wykonywania obliczeń wielowariantowych.

Stosunek $E_w/E_z = e_w/e_z$ ($e_z = E_z/R_o$, $e_w = E_w/R_o$) przyjmuje się zwyczajowo równy 1,5. Jak jednak wykazały pomiary dokonane dla przykładowego rzeczywistego szybu [9] stosunek ten zmienia się w dość szerokich granicach. Aby wyznaczyć wartość ilorazu e_w/e_z skorzystano z zestawienia 6, na podstawie którego sporządzono



Rys. 28. Optymalny przebieg granicy obszaru zamrażającego

Stosunek grubości e_w/e_z części płaszczka mroźniowego wewnątrz i na zewnątrz powierzchni walcowej zawierającej rury mroźniowe

		n		30	40	50	
p = 0,01	c = 0,8	l = 0,4	k = 0,5	t = 0,45	1,32 - 1,41	1,21 - 1,35	1,16 - 1,33
				t = 0,60	1,21 - 1,27	1,16 - 1,25	1,11 - 1,23
				t = 0,75	1,19 - 1,21	1,14 - 1,20	1,08 - 1,17
				t = 0,90	1,15 - 1,16	1,10 - 1,14	1,08 - 1,13
			k = 1,0	t = 0,45	1,30 - 1,38	1,21 - 1,33	1,16 - 1,31
				t = 0,60	1,23 - 1,27	1,16 - 1,24	1,12 - 1,23
				t = 0,75	1,18 - 1,21	1,12 - 1,19	1,09 - 1,17
				t = 0,90	1,15 - 1,17	1,10 - 1,14	1,08 - 1,14
			k = 2,0	t = 0,45	1,31 - 1,37	1,21 - 1,31	1,16 - 1,29
				t = 0,60	1,23 - 1,27	1,16 - 1,23	1,12 - 1,22
				t = 0,75	1,19 - 1,21	1,13 - 1,19	1,09 - 1,17
				t = 0,90	1,15 - 1,17	1,10 - 1,15	1,08 - 1,14
b = 0,01	l = 0,6	k = 0,5	t = 0,45	1,49 - 1,65	1,30 - 1,50	1,24 - 1,50	
			t = 0,60	1,31 - 1,40	1,19 - 1,33	1,16 - 1,33	
			t = 0,75	1,21 - 1,25	1,16 - 1,23	1,10 - 1,21	
			t = 0,90	1,17 - 1,18	1,11 - 1,16	1,09 - 1,15	
		k = 1,0	t = 0,45	1,46 - 1,59	1,29 - 1,49	1,22 - 1,46	
			t = 0,60	1,32 - 1,38	1,20 - 1,32	1,16 - 1,31	
			t = 0,75	1,21 - 1,25	1,15 - 1,22	1,11 - 1,21	
			t = 0,90	1,17 - 1,19	1,12 - 1,16	1,09 - 1,15	
		k = 2,0	t = 0,45	1,43 - 1,52	1,28 - 1,45	1,21 - 1,42	
			t = 0,60	1,29 - 1,36	1,18 - 1,30	1,14 - 1,29	
			t = 0,75	1,21 - 1,25	1,14 - 1,22	1,12 - 1,21	
			t = 0,90	1,16 - 1,18	1,12 - 1,16	1,08 - 1,15	
p = 0,1	l = 1,2	k = 0,5	t = 0,45	1,66 - 1,86	1,41 - 1,75	1,28 - 1,62	
			t = 0,60	1,35 - 1,48	1,24 - 1,44	1,16 - 1,37	
			t = 0,75	1,25 - 1,32	1,16 - 1,26	1,10 - 1,25	
			t = 0,90	1,17 - 1,19	1,12 - 1,17	1,07 - 1,15	
		k = 1,0	t = 0,45	1,62 - 1,75	1,39 - 1,66	1,27 - 1,59	
			t = 0,60	1,35 - 1,45	1,24 - 1,41	1,17 - 1,36	
			t = 0,75	1,25 - 1,30	1,16 - 1,26	1,12 - 1,24	
			t = 0,90	1,18 - 1,20	1,12 - 1,17	1,10 - 1,16	
		k = 2,0	t = 0,45	1,60 - 1,67	1,36 - 1,58	1,26 - 1,54	
			t = 0,60	1,36 - 1,43	1,24 - 1,38	1,16 - 1,34	
			t = 0,75	1,25 - 1,29	1,15 - 1,25	1,12 - 1,24	
			t = 0,90	1,17 - 1,20	1,12 - 1,18	1,09 - 1,16	

n, l, k, t		n=30, l=1,2, k=2,0, t=0,45	n=40, l=0,8, k=1,0, t=0,75	n=50, l=0,4, k=0,5, t=0,90
b = 0,01	0,01	1,59 - 1,67	1,14 - 1,22	1,08 - 1,13
	p = 0,5	1,65 - 1,69	1,16 - 1,23	1,08 - 1,14
c = 0,8	1,0	1,73 - 1,73	1,17 - 1,24	1,08 - 1,14
p = 0,1	0,007	1,66 - 1,69	1,15 - 1,23	1,07 - 1,13
c = 0,8	b = 0,013	1,55 - 1,65	1,14 - 1,22	1,09 - 1,14
p = 0,1	c = 0,65	1,60 - 1,67	1,15 - 1,23	1,08 - 1,14
b = 0,01	0,95	1,60 - 1,68	1,14 - 1,22	1,07 - 1,13

Zestawienie 7. Dla każdego z rozpatrzonych wariantów podano dwie liczby. Pierwsza określa stosunek e_w/e_z dla dolnej granicy bezwymiarowej zmiennej f , uwzględnionej w zest. 6, druga zaś dla granicy górnej f , odpowiadającej $e_w \approx 0,4$. Dla pośrednich wartości f dość dobre rezultaty daje interpolacja liniowa.

Przy znanej grubości E i przy zadanym zewnętrznym promieniu otworu szybu R_{sz} oraz przy znanej wartości stosunku e_w/e_z , optymalny promień kręgu otworów $R_{o\ opt}$ wynika z zależności

$$R_{o\ opt} = R_{sz} + \frac{\frac{e_w}{e_z} E}{1 + \frac{e_w}{e_z}} \quad (44)$$

Przykładowe obliczenia wykonano dla warstwy 1 górotworu zamrażanego jednym kręgiem otworów jak w p. 2.1. Dla warstwy tej, przy temperaturze chłodziwa -30°C , parametry bezwymiarowe przyjmują wartości:

$$k = 1,272, \quad t = 0,775, \quad p = 0,0353, \quad l = 0,857, \quad c = 0,698.$$

Oprócz tego występują wartości: $n = 33$, $b \approx 0,013$. Dla parametrów tych poprzez interpolację otrzymuje się, na podstawie zestawienia 7, $e_w/e_z = 1,22$. Dla promienia szybu $R_{sz} = 4,55$ m przy $E = 3$ m dostaje się $R_{o\ opt} = 6,20$ m, przy $E = 3,5$ m zaś $R_{o\ opt} = 6,47$ m. Promień $R_o = 6,5$ m jest optymalny przy $E = 3,55$ m.

3.5. Bezwymiarowa optymalizacja wstępna przy dwóch kręgach otworów

Przy zamrażaniu dwoma kręgami otworów mroźniowych optymalne promienie kręgów wynikają z takiego samego warunku jak przy mrożeniu jednym kręgiem oraz z warunku dotyczącego zamrażania przestrzeni między kręgami. Na

mocy tego dodatkowego warunku promienie kręgu wewnętrznego R_o i zewnętrznego R_d mają wartości optymalne wówczas, gdy w momencie zakończenia zamrażania przestrzeni między kręgami grubość płaszczka mrożeniowego E przyjmuje żadaną wartość. Optymalne promienie kręgów powinny zatem spełniać relacje

$$R_o = \frac{R_{sz}}{1 - e_w} \quad (45)$$

$$R_d = b_d R_o \quad (46)$$

$$E = (e_w + b_d - 1 + e_z) R_o \quad (47)$$

Zależność (45) wynika z warunku dotyczącego wewnętrznej granicy strefy zamrożonej. Granica ta, podobnie jak na rys. 28, powinna tak przebiegać, aby rzeczywista grubość części płaszczka mrożeniowego wewnątrz kręgu wewnętrznego była równa różnicy $R_o - R_{sz}$ w chwili zakończenia zamrażania.

Bezwymiarowe grubości $e_w = E_w/R_o$ i $e_z = E_z/R_o$ części płaszczka mrożeniowego zawartych wewnątrz kręgu wewnętrznego i na zewnątrz kręgu zewnętrznego (E_w i E_z oznaczają odpowiednie rzeczywiste grubości elementów płaszczka) w momencie zakończenia zamrażania przestrzeni między kręgami oraz odpowiadający tej chwili bezwymiarowy czas f zawarte są w zestawieniu 8. Część 8a dotyczy przypadku $n = n_d = 40$, część 8b zaś sześciu innych wariantów rozmieszczenia otworów. Wartość $e_z = 0$ występująca w kilku pozycjach zestawienia 8 oznacza, że zamknięcie płaszczka mrożeniowego w kręgu zewnętrznym ma miejsce, w granicach dokładności metody, równocześnie z zakończeniem zamrażania przestrzeni między kręgami.

W celu zilustrowania przedstawionej metody wyznaczania optymalnych wartości promieni R_o i R_d wykonano obliczenia dla warstwy 21 górotworu rozpatrzonego w p. 2.3. Przyjęto stałą temperaturę chłodziwa -40°C oraz przyjęto liczby rur $n = n_d = 40$, a następnie $n = 35$, $n_d = 45$ i $n = 30$, $n_d = 50$. Przy wyznaczeniu parametrów t , k , l , c oraz p wykorzystano wartości podane w p. 2.3, stosunek b zaś określano iteracyjnie, gdyż związany jest on z promieniem R_o . Stosunek ten ma niezbyt duży wpływ na optymalne wartości promieni R_o i R_d , w sposób widoczny natomiast oddziałuje na czas zamrażania w przypadku zastosowania dwóch kręgów rur. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 29 w postaci wykresów podających zależność promieni R_o i R_d oraz grubości płaszczka E , w momencie zakończenia zamrażania przestrzeni między kręgami, od stosunku b_d przy $R_{sz} = 4,55$ m. Z rysunku tego wynika, że dla $E = 6$ m przy $n = n_d = 40$ optymalne promienie kręgów wynoszą $R_o = 6,20$ m, $R_d = 9,55$ m, czas zamrażania zaś jest tu równy $\tau = 228$ dni. Wyniki otrzymane za pośrednictwem rozważań bezwymiarowych można porównywać z rezultatami otrzymanymi w wariantach

Bezwymiarowy czas oraz bezwymiarowe składowe grubości płaszcza mroźniowego
w momencie zakończenia zamrażania przestrzeni między kręgami

$n = n_d = 40$				$b_d = 1,25$			$b_d = 1,40$			$b_d = 1,55$			
				f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	
c = 0,8	l = 0,4	k = 0,5	t	0,45	0,0178	0,0777	0,0000	0,0342	0,1733	0,0652	0,0555	0,2538	0,1237
			"	0,60	0,0116	0,0981	0,0000	0,0227	0,1870	0,0979	0,0381	0,2732	0,1599
			"	0,75	0,0081	0,1067	0,0529	0,0163	0,1914	0,1254	0,0276	0,2826	0,1838
			"	0,90	0,0058	0,1149	0,0712	0,0119	0,2064	0,1473	0,0204	0,2937	0,2137
		k = 1,0	t	0,45	0,0258	0,0935	0,0000	0,0502	0,1870	0,0833	0,0825	0,2741	0,1477
			"	0,60	0,0175	0,1067	0,0201	0,0346	0,1904	0,1088	0,0583	0,2828	0,1752
			"	0,75	0,0128	0,1099	0,0612	0,0258	0,2005	0,1287	0,0438	0,2916	0,1922
			"	0,90	0,0097	0,1185	0,0727	0,0199	0,2119	0,1476	0,0340	0,3028	0,2137
		k = 2,0	t	0,45	0,0418	0,1059	0,0082	0,0823	0,1940	0,1002	0,1368	0,2873	0,1613
			"	0,60	0,0292	0,1091	0,0407	0,0584	0,2003	0,1213	0,0985	0,2935	0,1821
			"	0,75	0,0221	0,1151	0,0655	0,0447	0,2083	0,1343	0,0759	0,3014	0,2000
			"	0,90	0,0174	0,1213	0,0740	0,0356	0,2156	0,1484	0,0609	0,3090	0,2141
	l = 0,8	k = 0,5	t	0,45	0,0278	0,0729	0,0000	0,0562	0,1557	0,0151	0,0954	0,2459	0,0947
			"	0,60	0,0192	0,0851	0,0000	0,0393	0,1739	0,0786	0,0680	0,2589	0,1421
			"	0,75	0,0139	0,1067	0,0242	0,0291	0,1878	0,1127	0,0505	0,2812	0,1777
			"	0,90	0,0103	0,1136	0,0680	0,0219	0,2038	0,1408	0,0381	0,2923	0,2073
		k = 1,0	t	0,45	0,0426	0,0841	0,0000	0,0865	0,1759	0,0652	0,1474	0,2659	0,1188
			"	0,60	0,0300	0,0989	0,0007	0,0617	0,1871	0,0978	0,1064	0,2797	0,1540
			"	0,75	0,0225	0,1081	0,0430	0,0469	0,1971	0,1235	0,0812	0,2886	0,1824
			"	0,90	0,0174	0,1174	0,0700	0,0368	0,2103	0,1435	0,0638	0,3012	0,2104

$n = n_d = 40$				$b_d = 1,25$			$b_d = 1,40$			$b_d = 1,55$		
				f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z
$p = 0,1$	$l = 1,2$	$k = 2,0$	$t = 0,45$	0,0718	0,0994	0,0000	0,1465	0,1907	0,0857	0,2506	0,2886	0,1446
			$t = 0,60$	0,0515	0,1072	0,0236	0,1063	0,1978	0,1098	0,1828	0,2927	0,1711
			$t = 0,75$	0,0394	0,1132	0,0559	0,0822	0,2060	0,1287	0,1420	0,2998	0,1915
			$t = 0,90$	0,0315	0,1207	0,0721	0,0661	0,2146	0,1453	0,1146	0,3080	0,2130
	$k = 0,5$	$t = 0,45$	0,0382	0,0694	0,0000	0,0786	0,1539	0,0000	0,1353	0,2379	0,0742	
		$t = 0,60$	0,0268	0,0791	0,0000	0,0560	0,1666	0,0653	0,0975	0,2538	0,1202	
		$t = 0,75$	0,0198	0,1009	0,0103	0,0418	0,1870	0,1028	0,0732	0,2750	0,1631	
		$t = 0,90$	0,0147	0,1119	0,0657	0,0318	0,2019	0,1365	0,0557	0,2906	0,2014	
	$k = 1,0$	$t = 0,45$	0,0599	0,0798	0,0000	0,1234	0,1715	0,0336	0,2127	0,2665	0,1020	
		$t = 0,60$	0,0426	0,0939	0,0000	0,0889	0,1863	0,0855	0,1545	0,2771	0,1451	
		$t = 0,75$	0,0322	0,1069	0,0308	0,0681	0,1952	0,1154	0,1185	0,2871	0,1784	
		$t = 0,90$	0,0250	0,1163	0,0680	0,0536	0,2087	0,1401	0,0936	0,3003	0,2065	
	$k = 2,0$	$t = 0,45$	0,1024	0,0963	0,0000	0,2121	0,1912	0,0720	0,3658	0,2941	0,1270	
		$t = 0,60$	0,0740	0,1067	0,0119	0,1543	0,1968	0,1016	0,2676	0,2948	0,1599	
		$t = 0,75$	0,0569	0,1120	0,0470	0,1198	0,2050	0,1254	0,2082	0,3001	0,1856	
		$t = 0,90$	0,0456	0,1201	0,0706	0,0966	0,2140	0,1432	0,1683	0,3078	0,2103	
$l=0,4 \quad k=0,5 \quad t=0,90$	$b = 0,01$ $c = 0,8$	$p = 0,5$	0,01	0,0053	0,1140	0,0712	0,0111	0,2057	0,1491	0,0191	0,2916	0,2137
			0,0078	0,1145	0,0681	0,0154	0,2082	0,1404	0,0257	0,3014	0,2076	
			0,0102	0,1141	0,0659	0,0195	0,2090	0,1335	0,0322	0,3076	0,1997	
	$p = 0,1$ $c = 0,8$	$b = 0,01$	0,007	0,0065	0,1142	0,0694	0,0132	0,2070	0,1444	0,0224	0,2966	0,2123
			0,013	0,0052	0,1146	0,0719	0,0109	0,2052	0,1492	0,0189	0,2914	0,2137
	$p = 0,1$ $b = 0,01$	$c = 0,8$	0,65	0,0056	0,1150	0,0705	0,0115	0,2073	0,1461	0,0197	0,2960	0,2137
			0,95	0,0059	0,1139	0,0709	0,0123	0,2049	0,1478	0,0212	0,2921	0,2137

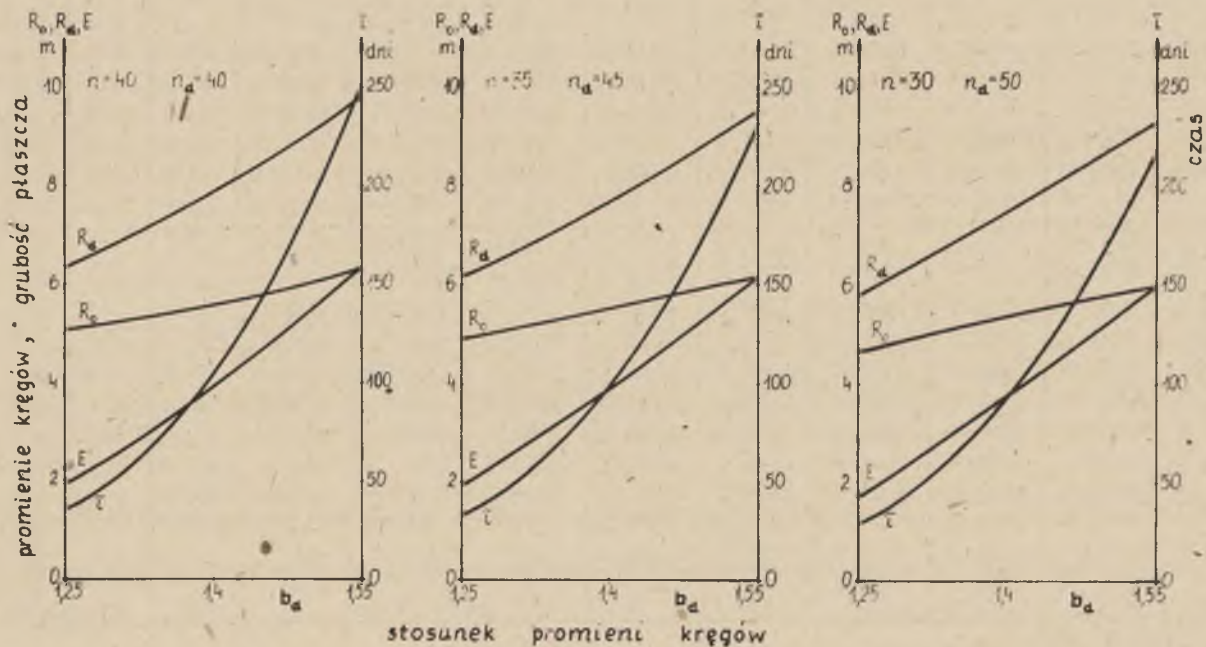
cd. zestawienia 8a

$n = n_d = 40$			$b_d = 1,25$			$b_d = 1,40$			$b_d = 1,55$		
			f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z
l=0,8 k=1,0 t=0,75	b = 0,01	p = 0,01	0,0214	0,1082	0,0453	0,0450	0,1967	0,1250	0,0783	0,2876	0,1834
	c = 0,8	p = 0,5	0,0274	0,1076	0,0341	0,0552	0,1980	0,1170	0,0937	0,2923	0,1787
		p = 1,0	0,0337	0,1075	0,0260	0,0657	0,1993	0,1106	0,1092	0,2963	0,1731
	p = 0,1	b = 0,007	0,0261	0,1078	0,0369	0,0529	0,1977	0,1188	0,0902	0,2911	0,1795
	c = 0,8	b = 0,013	0,0198	0,1081	0,0474	0,0425	0,1966	0,1254	0,0745	0,2865	0,1851
	p = 0,1	c = 0,65	0,0221	0,1082	0,0416	0,0460	0,1977	0,1228	0,0795	0,2893	0,1820
	b = 0,01	c = 0,95	0,0229	0,1081	0,0445	0,0478	0,1966	0,1243	0,0828	0,2878	0,1827
l=1,2 k=2,0 t=0,45	b = 0,01	p = 0,01	0,0984	0,0961	0,0000	0,2054	0,1903	0,0734	0,3562	0,2925	0,1288
		p = 0,5	0,1203	0,0971	0,0000	0,2424	0,1950	0,0664	0,4092	0,3013	0,1199
	c = 0,8	p = 1,0	0,1432	0,0983	0,0000	0,2808	0,1999	0,0550	0,4641	0,3101	0,1140
	p = 0,1	b = 0,007	0,1216	0,0978	0,0000	0,2446	0,1956	0,0666	0,4123	0,3020	0,1198
	c = 0,8	b = 0,013	0,0887	0,0955	0,0000	0,1890	0,1886	0,0771	0,3324	0,2884	0,1333
	p = 0,1	c = 0,65	0,1017	0,0961	0,0000	0,2108	0,1914	0,0718	0,3631	0,2943	0,1267
	b = 0,01	c = 0,95	0,1030	0,0964	0,0000	0,2134	0,1910	0,0722	0,3687	0,2939	0,1274

Bezwymiarowy czas oraz bezwymiarowe składowe grubości płaszcza mroźeniowego
w momencie zakończenia zamrażania przestrzeni między kręgami
($p = 0,1$, $b = 0,013$, $c = 0,8$)

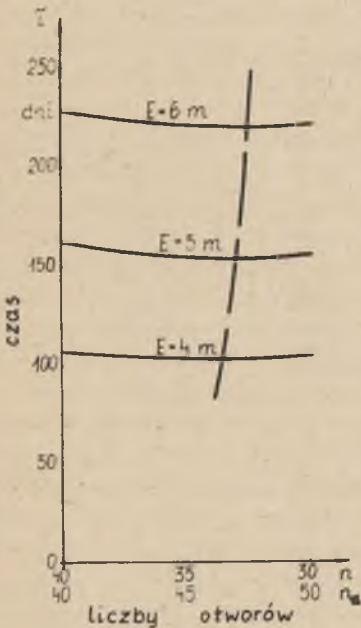
b_d	l	k	t	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z
				n = 35 $n_d = 45$			n = 30 $n_d = 50$			n = 35 $n_d = 35$		
1,4	0,4	0,5	0,90	0,0109	0,1923	0,1654	0,0110	0,1764	0,1765	0,0120	0,2029	0,1315
	0,4	1,0	0,75	0,0232	0,1833	0,1518	0,0237	0,1642	0,1673	0,0262	0,2010	0,1172
	0,8	0,5	0,75	0,0261	0,1719	0,1361	0,0267	0,1522	0,1554	0,0296	0,1902	0,0969
	0,8	1,0	0,90	0,0330	0,1937	0,1641	0,0337	0,1756	0,1775	0,0371	0,2080	0,1302
	0,8	1,0	0,75	0,0419	0,1797	0,1431	0,0428	0,1593	0,1645	0,0477	0,1994	0,1096
	0,8	1,0	0,45	0,0758	0,1529	0,1038	0,0776	0,1270	0,1216	0,0880	0,1741	0,0094
	0,8	2,0	0,75	0,0733	0,1879	0,1507	0,0748	0,1673	0,1681	0,0835	0,2057	0,1167
	1,2	1,0	0,75	0,0606	0,1775	0,1383	0,0618	0,1564	0,1576	0,0692	0,1982	0,0993
	1,2	2,0	0,45	0,1857	0,1707	0,1054	0,1898	0,1462	0,1274	0,2158	0,1922	0,0271
1,55	0,4	0,5	0,90	0,0187	0,2799	0,2326	0,0187	0,2651	0,2438	0,0209	0,3018	0,2030
	0,4	1,0	0,75	0,0396	0,2763	0,2126	0,0396	0,2552	0,2296	0,0447	0,2975	0,1834
	0,8	0,5	0,75	0,0456	0,2581	0,1992	0,0456	0,2389	0,2117	0,0513	0,2801	0,1595
	0,8	1,0	0,90	0,0577	0,2824	0,2289	0,0578	0,2652	0,2422	0,0648	0,3055	0,1986
	0,8	1,0	0,75	0,0729	0,2703	0,2037	0,0731	0,2497	0,2231	0,0824	0,2918	0,1720
	0,8	1,0	0,45	0,1303	0,2432	0,1496	0,1304	0,2193	0,1717	0,1491	0,2682	0,0975
	0,8	2,0	0,75	0,1273	0,2800	0,2123	0,1277	0,2603	0,2294	0,1441	0,3034	0,1824
	1,2	1,0	0,75	0,1060	0,2674	0,1992	0,1063	0,2470	0,2145	0,1200	0,2895	0,1621
	1,2	2,0	0,45	0,3223	0,2679	0,1567	0,3234	0,2458	0,1753	0,3700	0,2969	0,1086

b_d	l	k	t	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z	f	e_w	e_z
				n = 30 $n_d = 40$			n = 30 $n_d = 30$			n = 25 $n_d = 35$		
1,4	0,4	0,5	0,90	0,0120	0,1845	0,1562	0,0137	0,2097	0,1196	0,0136	0,1735	0,1511
	0,4	1,0	0,75	0,0259	0,1818	0,1450	0,0299	0,2024	0,0890	0,0297	0,1655	0,1378
	0,8	0,5	0,75	0,0292	0,1642	0,1280	0,0339	0,1857	0,0607	0,0336	0,1503	0,1168
	0,8	1,0	0,90	0,0368	0,1866	0,1559	0,0427	0,2105	0,1128	0,0423	0,1758	0,1508
	0,8	1,0	0,75	0,0471	0,1757	0,1391	0,0548	0,1973	0,0793	0,0544	0,1637	0,1262
	0,8	1,0	0,45	0,0865	0,1476	0,0833	0,1022	0,1732	0,0000	0,1010	0,1286	0,0564
	0,8	2,0	0,75	0,0824	0,1824	0,1450	0,0964	0,2075	0,0890	0,0955	0,1692	0,1359
	1,2	1,0	0,75	0,0683	0,1719	0,1312	0,0796	0,1944	0,0639	0,0790	0,1591	0,1194
	1,2	2,0	0,45	0,2116	0,1629	0,0911	0,2518	0,1925	0,0000	0,2482	0,1496	0,0711
1,55	0,4	0,5	0,90	0,0204	0,2768	0,2247	0,0230	0,2996	0,1831	0,0228	0,2739	0,2163
	0,4	1,0	0,75	0,0433	0,2702	0,2082	0,0497	0,2973	0,1617	0,0490	0,2648	0,1992
	0,8	0,5	0,75	0,0499	0,2565	0,1866	0,0571	0,2811	0,1294	0,0563	0,2505	0,1802
	0,8	1,0	0,90	0,0632	0,2805	0,2217	0,0724	0,3066	0,1784	0,0711	0,2757	0,2150
	0,8	1,0	0,75	0,0801	0,2668	0,1985	0,0922	0,2939	0,1441	0,0907	0,2596	0,1873
	0,8	1,0	0,45	0,1442	0,2393	0,1386	0,1710	0,2745	0,0185	0,1657	0,2319	0,1172
	0,8	2,0	0,75	0,1400	0,2766	0,2079	0,1620	0,3060	0,1575	0,1589	0,2715	0,1973
	1,2	1,0	0,75	0,1167	0,2653	0,1894	0,1345	0,2926	0,1327	0,1323	0,2575	0,1817
		1,2	2,0	0,45	0,3576	0,2674	0,1458	0,4243	0,3064	0,0428	0,4099	0,2639



Rys. 29. Optymalne promienie kręgów i optymalne grubości płaszczka mrożeniowego oraz odpowiadający im czas zamrażania przy dwóch kręgach otworów

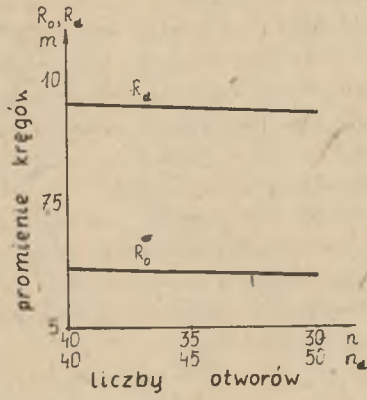
cie D p. 2.3, ze względu na przyjęty tam duży strumień chłodziwa. W celu sprawdzenia tej możliwości porównano czasy do momentu zamrożenia przestrzeni między kręgami oraz odpowiadające im grubości E płaszcz mroźniowego otrzymane w wariancie D i na drodze bezwymiarowej dla stałej temperatury chłodziwa. Czasy zamrażania różniły się o ułamek dnia, a więc o ułamek procenta, różnica zaś w grubości E wynosiła ok. 1%. Porównywanie zatem wyników otrzymanych w wariancie D i przedstawionych na rys. 29 jest uzasadnione i prowadzi do wniosku, że odpowiedni dobór promieni R_0 i R_d ma bardzo duży wpływ na czas mrożenia. Przy $R_0 = 8$ m, $R_d = 10$ m, uzyskanie płaszcz mroźniowego o grubości 6 m wymaga czasu $\tau = 420$ dni, a więc zastosowanie optymalnych promieni kręgów przy tych samych liczbach n i n_d skraca ten czas o ponad 45%.



Rys. 30. Zależność czasu zamrażania od liczby otworów na poszczególnych kręgach przy $n + n_d = 80$

W celu zbadania wpływu rozdziału rur na poszczególne kręgi, przy tej samej sumie otworów $n + n_d = 80$, powtórzono obliczenia dla $n = 35$, $n_d = 45$ oraz dla $n = 30$ i $n_d = 50$, wyznaczając czas, po którym płaszcz mroźniowy osiąga założoną grubość przy optymalnych wartościach promieni R_0 i R_d . Czas ten, dla trzech grubości płaszcz mroźniowego, pokazany jest na rys. 30. Linia przerywana łączy minima krzywych. Z wykresu przedstawionego na rys. 30 wynika, że relacja pomiędzy liczbą otworów na obu kręgach ma, w rozpatrywanym zakresie, niewielki wpływ na czas mrożenia, przy czym w zasadzie im większa jest wymagana grubość E, tym bardziej nierównomierny powinien być rozdział rur na kręgi. Dla $E = 6$ m najkorzystniejszy, przy $n + n_d = 80$, jest przypadek $n = 32$ i $n_d = 48$ lub $n = 33$ i $n_d = 47$, przy czym w zakresie $n = 30 \div 35$ nie ma praktycznie zmian w czasie zamrażania. Czas ten przy rozdziale optymalnym wynosi 220 dni, a więc dobór optymalnej liczby rur tworzących poszczególne kręgi, przy stałej ich sumie, powoduje dalsze zmniejszenie

nie czasu mrożenia jedynie o niecałe 2% w stosunku do czasu otrzymanego w wariancie D, a o niecałe 4% w stosunku do czasu przy $n = n_d = 40$ i przy optymalnym doborze promieni kręgów. Optymalnemu rozdziałowi otworów na kręgi odpowiadają promienie $R_0 = 6,05$ m, $R_d = 9,40$ m. Optymalne wartości tych promieni, jak widać na rys. 31, w nieznacznym stopniu zależą od rozdziału otworów.



Rys. 31. Optymalne promienie kręgów przy $E = 6$ m

4. OKREŚLENIE OPTIMALNYCH PARAMETRÓW MROŻENIA

4.1. Ustalenie parametrów podlegających optymalizacji

Przebieg procesu zamrażania górotworu oraz jego koszty zależą od parametrów górotworu (liczby i grubości warstw, współczynnika przewodzenia ciepła, objętościowej pojemności cieplnej, zawartości wilgoci, temperatury naturalnej oraz zamrażania dla poszczególnych warstw) jak również od parametrów mrożenia. Do drugiej grupy parametrów, które związane są ze sposobem realizacji procesu, należą: współczynniki przewodzenia ciepła materiałów rur, współczynniki wnikania ciepła, średnice rur, pojemność cieplna strumienia chłodziwa i jego temperatura minimalna, moc cieplna agregatów mrożeniowych oraz średnica kręgu otworów i ich liczba przy mrożeniu jednym kręgiem lub średnice kręgów i liczby otworów tworzących poszczególne kręgi przy zamrażaniu dwoma kręgami. Część tych parametrów jest w praktyce ściśle zdeterminowana, część zaś powinna być dobierana na drodze optymalizacji techniczno-ekonomicznej, której kryterium stanowi maksimum efektu ekonomicznego.

Do parametrów nie podlegających bezpośrednio optymalizacji należą współczynniki przewodzenia ciepła materiałów rur oraz współczynniki wnikania ciepła. Współczynniki przewodzenia zależą od zastosowanych materiałów, a tym samym są określone względami technologicznymi i wytrzymałościowymi. W praktyce rury mrożeniowe wykonywane są ze stali, rury opadowe zaś ze stali lub z tworzyw sztucznych. Z punktu widzenia czysto cieplnego te ostatnie są korzystniejsze, gdyż ich zastosowanie zmniejsza współczynnik przenikania ciepła przez rurę opadową. Współczynniki wnikania ciepła są funkcją średnic rur, strumienia oraz rodzaju i parametrów chłodziwa. Nie mają one zatem charakteru zmiennych niezależnych.

Minimalna możliwa do zastosowania temperatura chłodziwa zależy od jego rodzaju i składu. W praktyce występuje tendencja do wykorzystywania tej minimalnej temperatury. Celowość takiego postępowania potwierdziły obliczenia wykonane dla wariantu A przykładu rozpatrzonego w p. 2.3. W obliczeniach tych uwzględniono wzrost oporów przepływu oraz obniżenie się wskaźnika energetycznego agregatów mrożeniowych przy spadku minimalnej temperatury chłodziwa. Czynniki te powodują niewielki wzrost zużycia energii elektrycznej częściowo kompensowany w wyniku krótszego czasu pracy pomp i agregatów. Z drugiej strony obniżenie minimalnej temperatury chłodziwa daje korzyści w postaci zmniejszenia kosztów zamrożenia kapitału (przy założeniu stałego momentu zakończenia mrożenia). Korzyści te, jak

wykazały przykładowe obliczenia dla danych przyjętych w p. 4.4. kilkakrotnie (w rozpatrywanym przypadku ok. 4 razy) przewyższają dodatkowe koszty energii elektrycznej.

Zewnętrzna średnica rur mroźniowych jest ograniczona średnicą stosowanych wiertel, względy technologiczne z kolei przemawiają na ogół za stosowaniem rur mroźniowych o średnicach możliwie dużych. Ponieważ o grubości rur decydują aspekty wytrzymałościowe, zatem w praktyce wymiary rur mroźniowych nie podlegają optymalizacji. Optymalizacja dotyczy natomiast jednej ze średnic rur opadowych. Grubość ścianki, a tym samym druga średnica, jest zdeterminowana względami wytrzymałościowymi. Gdyby istniała możliwość zastosowania różnych układów rur, w celu wybrania przypadku najkorzystniejszego powinno się porównywać warianty optymalne dla poszczególnych układów.

Z rozważań powyższych wynika, że do parametrów mrożenia podlegających optymalizacji (w etapie pierwszym - wstępnym lub w drugim - końcowym) należy jedna ze średnic rur opadowych, strumień chłodziwa, moc cieplna agregatów mroźniowych oraz średnica kręgu lub kręgów otworów i liczba względnie liczby otworów tworzących poszczególne kręgi. Optymalną wartość zewnętrznej średnicy rur opadowych można w praktyce określić niezależnie od innych parametrów. Pozostają wówczas do wyznaczenia 4 parametry w przypadku mrożenia jednym kręgiem lub 6 parametrów przy mrożeniu dwoma kręgami. W obu przypadkach jednak, ze względu na możliwość przeprowadzenia optymalizacji wstępnej, tylko 3 parametry są niezależne. Przy mrożeniu jednym kręgiem każdej liczbie rur odpowiada ściśle określona wartość stosunku e_w/e_z w poszczególnych warstwach górotworu (zestawienie 7). Po wykorzystaniu tej wartości dla warstwy decydującej o czasie mrożenia, przy zadanej średnicy szybu i grubości płaszcza mroźniowego, otrzymuje się na podstawie zależności (44) wartość promienia kręgu optymalną dla przyjętej liczby otworów. Przy mrożeniu dwoma kręgami sumie liczb rur tworzących oba kręgi odpowiadają ściśle określone optymalne promienie kręgów oraz optymalny rozdział otworów na kręgi. Promienie te oraz liczby rur wyznacza się według procedury podanej w p. 3.5. Zagadnienie optymalizacji techniczno-ekonomicznej procesu zamrażania górotworu sprowadza się zatem w końcowej fazie do wyznaczenia 3 optymalnych parametrów zamrażania, tj. liczby rur, nominalnej mocy netto agregatów mroźniowych oraz strumienia chłodziwa przypadającego na jedną rurę.

4.2. Optymalizacja zewnętrznej średnicy rury opadowej

Zwiększenie średnicy rur opadowych, przy niezmiennych pozostałych parametrach mrożenia, powoduje zmianę kosztów zamrażania poprzez zmianę oporów przepływu chłodziwa, przyrost kosztów rur oraz zmianę czasu mrożenia. Optymalną zewnętrzną średnicę rur opadowych, z uwzględnieniem wy-

mienionych czynników, powinno się w zasadzie określać przez włączenie tej średnicy do wielkości podlegających wieloparametrowej optymalizacji w etapie drugim. Taki sposób postępowania nie jest na ogół celowy ze względu na następujące fakty:

- zewnętrzna średnica rur opadowych ma znikomy wpływ na czas zamrażania,
- zmiana kosztów rur opadowych wywołana zmianą ich zewnętrznej średnicy jest znikomo mała w porównaniu do kosztów wykonania otworów mrozeniowych,
- zbliżoną do optymalnej wartość zewnętrznej średnicy rur opadowych można określić poprzez analizę oporów przepływu chłodziwa przez element mrozeniowy,
- koszt dodatkowych obliczeń mających na celu uściślenie optymalnej wartości rozpatrywanej średnicy może się okazać, że względu na niewielki ewentualny spadek kosztów mrożenia, porównywalny z tym spadkiem.

Wymienione przyczyny powodują, że jest na ogół uzasadnione dobieranie zewnętrznej średnicy rur opadowych w oparciu o kryterium minimalnych oporów przepływu chłodziwa przez element mrozeniowy.

Przyjmowane wartości optymalnego, ze względu na opory przepływu, stosunku średnic rury opadowej i mrozeniowej [22, 32] są słuszne po przyjęciu założenia o znikomej grubości ścianki rury opadowej. Obliczenia zostały w dodatku wykonane dla przypadku, gdy zarówno w rurze opadowej, jak i w przestrzeni międzyrurowej występuje równocześnie bądź ruch laminarny, bądź burzliwy. Dla dość częstej sytuacji, w której wewnątrz rury opadowej występuje przepływ burzliwy, w przestrzeni międzyrurowej zaś laminarny, proponuje się [32] pośrednie wartości stosunku średnic. Jest to postępowanie przybliżone.

W celu wyznaczenia takiego stosunku zewnętrznej średnicy rury opadowej do wewnętrznej średnicy rury mrozeniowej, przy którym moc tarcia jest minimalna, należy skorzystać z zależności opisującej straty ciśnienia wywołane tarciami Δp_f , w odniesieniu do pojedynczego elementu

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \rho H \left(\lambda_{f1} w_1^2 \frac{1}{d_w} + \lambda_{f2} w_2^2 \frac{1}{D_w - d_z} \right), \quad (48)$$

przy czym

$$\lambda_{f1} = \frac{C_1}{\left(\frac{w_1 d_w}{\nu} \right)^{n_1}}, \quad \lambda_{f2} = \frac{C_2}{\left[\frac{w_2 (D_w - d_z)}{\nu} \right]^{n_2}}, \quad (49)$$

$$n_1 = \frac{4 \dot{V}}{\pi d_w^2}, \quad n_2 = \frac{4 \dot{V}}{\pi (D_w^2 - d_z^2)}. \quad (50)$$

Indeks 1 odnosi się do rury opadowej, indeks 2 zaś do przestrzeni międzyrurowej. Założono, że gęstość ρ oraz kinematyczny współczynnik lepkości ν nie ulegają zmianie. Podobnie jak w p. 1 średnicę wewnętrzną i zewnętrzną rury opadowej o grubości ścianki δ oznaczono przez d_w i d_z , D_w jest średnicą wewnętrzną rury mrozeniowej, H długością elementu, w prędkością, \dot{V} strumieniem chłodziwa, λ_f liczbą tarcia, C i n zaś stałymi w zależnościach określających tę liczbę.

Po przyrównaniu pochodnej wyrażenia (48) do zera i po wykorzystaniu (49) oraz (50) otrzymuje się równanie

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{C_2} K^{n_1-n_2} (5-n_1)(1+x)^{3-n_2} (1-x)^4 = \\ = [1+n_2+(5-n_2)x](x-2\epsilon)^{6-n_1}, \end{aligned} \quad (51)$$

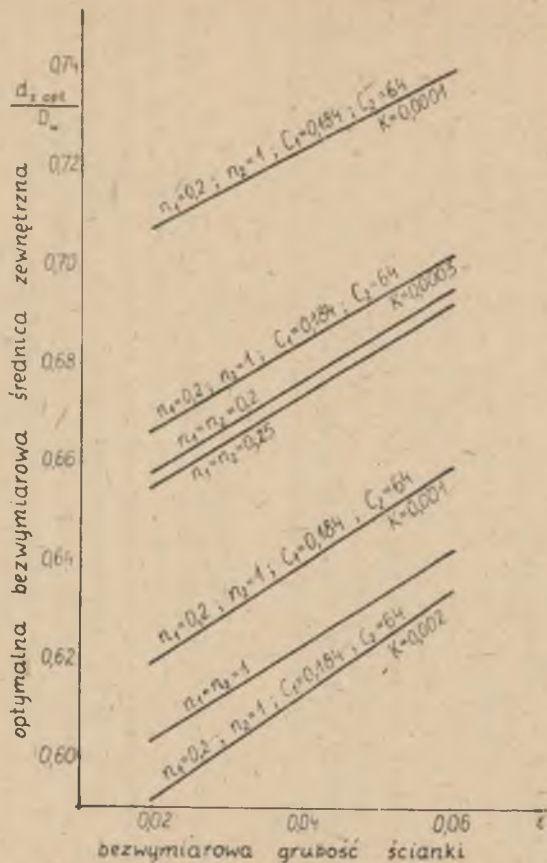
w którym

$$x = \frac{d_z \text{ opt}}{D_w}, \quad \epsilon = \frac{\delta}{D_w}, \quad K = \frac{3\rho D_w}{4 \dot{V}}. \quad (52)$$

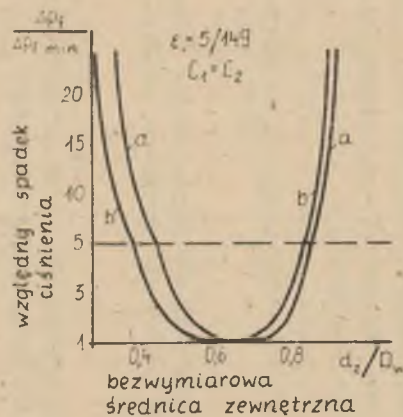
W równaniu (51) jedyną niewiadomą jest optymalna wartość zewnętrznej średnicy rury opadowej $d_z \text{ opt}$. Dla przepływu o tym samym charakterze w rurze opadowej i w przestrzeni międzyrurowej ($C_1 = C_2$, $n_1 = n_2$) bezwymiarowa wielkość K w równaniu (51) nie występuje. Rozwiązanie tego równania, w funkcji bezwymiarowej grubości ścianki rury opadowej ϵ , przedstawione jest na rys. 32. Z rysunku tego wynika, że dla przypadku przepływu burzliwego w rurze opadowej, laminarnego zaś w przestrzeni międzyrurowej, wartość stosunku $d_z \text{ opt}/D_w$ zmienia się w znaczący sposób, zwłaszcza przy zmianie parametru K .

Obliczenia wykonane dla rur mrozeniowych o wymiarach 168/149 mm wykazały, że przy grubości ścianki rury opadowej 5 mm optymalna średnica zewnętrzna tej rury jest równa 92 mm, gdy występuje wyłącznie ruch laminarny ora. 100 mm w przypadku przepływu burzliwego w przestrzeni międzyrurowej. Dla przepływu burzliwego w rurze opadowej i laminarnego w przestrzeni międzyrurowej optymalna wartość średnicy d_z przy danych jak w p. 2 wynosi również ok. 100 mm. Przyjęte średnice rur opadowych byłyby zatem zbliżone do optymalnych jedynie przy przepływie laminarnym wewnątrz tych rur, w pozostałych przypadkach są one zbyt małe. Podobnie wygląda sytuacja z rurami opadowymi współpracującymi z rurami mrozeniowymi o wymiarach 140/124 mm.

W celu zbadania wpływu średnicy d_z na spadek ciśnienia Δp_f wykonano przykładowe obliczenia, których rezultaty, w odniesieniu do minimalnego spadku ciśnienia $\Delta p_{f \text{ min}}$, przedstawia rys. 33. Zwiększone straty tarcia powodują zwiększone zużycie energii przez pompy oraz przez agregaty mro-



Rys. 32. Optymalna, ze względu na opory przepływu, zewnętrzna średnica rury opadowej



Rys. 33. Zależność spadku ciśnienia chłodziwa od zewnętrznej średnicy rury opadowej

- a) $n_1 = n_2 = 0,25$, $d_{z \text{ opt}}/D_w = 0,6678$,
 b) $n_1 = n_2 = 1$, $d_{z \text{ opt}}/D_w = 0,6171$

żeńiowe, jak również powodują konieczność zainstalowania agregatów dodatkowych, jeśli moc netto agregatów ma pozostać stała.

Moc elektryczna N_f , potrzebna do napędu pomp chłodziwa o sprawności wewnętrznej η_{iP} i całkowitej η_P oraz do odbierania ciepła tarcia w agregatach mrozeniowych o wskaźniku energetycznym ℓ_z (równym ilorazowi strumienia ciepła przekazywanego w parowaczu i mocy napędowej sprężarek agregatu), wynika ze wzoru

$$N_f = \dot{V}_{\Delta p_f} \left(\frac{1}{\eta_P} + \frac{1}{\eta_{iP} \ell_z} \right) n. \quad (53)$$

Wzorem powyższym, uwzględniającym tarcie podczas przepływu chłodziwa przez n elementów mrozeniowych, posłużono się dla przypadku $\eta_{iP} = \eta_P$ w p. 4.1.

4.3. Sposób optymalizacji mocy agregatów, strumienia chłodziwa oraz liczby otworów mrozeniowych

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce zasadami, doboru optymalnego wariantu inwestycji [18, 38] powinno się dokonywać poprzez maksymalizację efektu ekonomicznego E , określonego wzorem

$$E = \sum_{t=0}^m a_t (P_t - K_t - N_t), \quad (54)$$

gdzie:

a_t - współczynnik dyskontujący, równy

$$a_t = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (55)$$

P_t - wartość produkcji w roku t ,

K_t - koszty bieżące w roku t ,

N_t - całkowite nakłady kapitałowe w roku t ,

m - suma, w latach, okresu realizacji inwestycji i okresu eksploatacji.

Wzór (54) podaje wartość zdyskontowaną na rok zerowy.

W przypadku procesu zamrażania górotworu zmiana parametrów mrożenia powoduje zmianę czasu zamrażania, a tym samym zmianę okresu realizacji inwestycji. Obliczenia optymalizacyjne można w związku z tym przeprowadzać przy dwóch różnych założeniach odnośnie do terminów budowy szybu, z których każde ma pewne uzasadnienie praktyczne. W sytuacji, gdy ściśle określony jest moment rozpoczęcia realizacji inwestycji, zmiana czasu zamrażania powoduje zmianę momentu rozpoczęcia eksploatacji. Przeprowadzenie dokładnych obliczeń jest wtedy możliwe, gdy znany jest m.in. okres

budowy i eksploatacji kopalni, koszty budowy całej kopalni oraz efekty jej pracy w funkcji czasu. Znajomość tych wielkości nie jest konieczna, gdy narzucony jest moment uruchomienia szybu. W takim przypadku różne są czasy rozpoczęcia zamrażania, ze względu na konieczność otrzymania płaszcza mrozeniowego o żądanej grubości w ściśle określonej chwili. Do momentu tego g , który dogodnie jest przyjąć jako chwilę odniesienia [2], zmienne są składniki sumy (54). Ponieważ w rozpatrywanym okresie budowy szybu nie otrzymuje się z niego produkcji, zatem maksymalizacji podlega wskaźnik E_z zdyskontowany na moment zakończenia zamrażania

$$E_z = - \sum_{t=0}^g a'_t (N_t + K_t). \quad (56)$$

Optymalny wariant mrożenia ma miejsce, gdy

$$|E_z| = \sum_{t=0}^g a'_t (N_t + K_t) = \min. \quad (57)$$

Współczynnik dyskontujący odniesiony do chwili g powinien być określony zależnością

$$a'_t = (1 + r)^{\tau}, \quad \tau = g - t, \quad (58)$$

gdzie r jest stopą dyskontową, τ zaś czasem wyrażonym w postaci całkowitej liczby lat. Taki sposób określania wielkości τ jest niedogodny przy analizie mrożenia górotworu, gdyż różnice w czasie zamrażania dla różnych wariantów mrożenia są mniejsze, i to na ogół wyraźnie, od jednego roku. Proponuje się zatem wprowadzenie współczynnika dyskontującego, będącego ciągłą funkcją czasu. Współczynnik taki przedstawiałby w rozpatrywanym przypadku kwotę, jaką należy zwrócić w momencie g w wyniku wypożyczenia jednostkowej kwoty z oprocentowaniem rocznym r w chwili t . Przy założeniu, że moment g występuje przy końcu roku kalendarzowego, proponowany współczynnik dyskontujący ma postać:

$$a'_t = (1 + r\Delta\tau)(1 + \tau)^{[\tau]}; \quad \Delta\tau = \tau - [\tau], \quad (59)$$

gdzie $[\tau]$ oznacza część całkowitą okresu czasu od momentu wydatkowania rozpatrywanej kwoty do chwili zakończenia mrożenia. W przypadku kosztów rozłożonych równomiernie w przedziale czasu $\tau_1 \pm \tau_2$ (zawartym w roku t), współczynnik dyskontujący jest określony wzorem

$$s'_t = (1 + r \frac{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2}{2}) / (1 + r)^{[\tau]}$$

$$[\tau] = \tau_1 - \Delta\tau_1 = \tau_2 - \Delta\tau_2 \quad (60)$$

Tak zdefiniowane współczynniki dyskontujące uwzględniają fakt dopisywania kosztów zamrożenia kapitału przy końcu kolejnych lat. Mają one bardzo zbliżone wartości do współczynników zamrożenia występujących w uproszczonej formule, określającej efekt ekonomiczny [18, 38].

W przypadku rozpatrywania całego okresu budowy i eksploatacji kopalni, przy ustalonym momencie rozpoczęcia realizacji inwestycji, współczynnik dyskontujący może być definiowany zgodnie z obowiązującymi zasadami, tzn. za pomocą zależności (55).

Dobór optymalnej mocy netto agregatów, strumienia chłodziwa przypadającego na pojedynczy element mrozeniowy oraz liczby otworów mrozeniowych, polega na określeniu takich wartości wymienionych parametrów, aby wyrażenie (54) osiągało wartość maksymalną. W przypadku stałego momentu zakończenia mrożenia sprowadza się to do minimalizacji sumy kosztów (57) budowy i eksploatacji układu zamrażania.

Analiza cieplna mrożenia górotworu dostarcza danych do obliczeń techniczno-ekonomicznych w postaci zależności czasu mrożenia i zapotrzebowania na energię elektryczną od rozpatrywanych parametrów. Obliczenia przykładowe wykazały, że na ogół uzasadnione jest przyjęcie w analizie techniczno-ekonomicznej stałego, średniego strumienia energii elektrycznej, równego ilorazowi zużytej energii elektrycznej i czasu mrożenia.

4.4. Przykład obliczeniowy

Obliczenia ilustrujące rozważania o charakterze cieplno-ekonomicznym przeprowadzono dla górotworu oraz dla liczby otworów i ich rozmieszczenia jak w p. 2.3. W przypadku pełnej optymalizacji uzmiennieniu powinna podlegać liczba rur, rozdział otworów na kręgi zaś promienie tych kręgów winny zostać dobrane wg procedury przedstawionej w p. 3.5. Nie postąpiono tak, gdyż względy technologiczne ograniczyły swobodę wyboru wymienionych parametrów.

W pierwszej części obliczeń przyjęto, że moment zakończenia mrożenia jest stały. Sytuacja taka występuje, gdy zadany jest czas uruchomienia kopalni (np. ze względu na konieczność rozpoczęcia spłacania kredytów w określonym momencie). Założono, że nakłady inwestycyjne ponoszone są jednorazowo, w momencie rozpoczęcia zamrażania górotworu. Po uwzględnieniu faktu, że część urządzeń można wykorzystać w innych inwestycjach, otrzymuje się

$$\sum_t a'_t N_t = J_0 (1 + r \Delta \tau_z) (1 + r)^{[\tau_z]} - \sum_j I_{sj} (1 + r \Delta \tau_j) (1 + r)^{[\tau_j]} \quad (61)$$

Symbol J_0 oznacza nakład inwestycyjny nominalny, z uwzględnieniem zamrożenia kapitału do momentu rozpoczęcia procesu mrożenia górotworu. Indeks z odnosi się do chwili początkowej zamrażania górotworu, indeks j zaś do momentu, w którym sprzedawane są urządzenia za kwotę I_{sj} . Ujemna suma występuje we wzorze (61) wówczas, gdy w miarę obniżania się mocy cieplnej pobieranej od górotworu kolejne agregaty ulegają wyłączeniu i rozmontowaniu bądź też wykorzystywane są np. do mrożenia sąsiedniego szybu. Jeśli sprzedaż części instalacji za kwotę I_s ma miejsce jedynie po zakończeniu mrożenia, to wówczas

$$\sum_t a'_t N_t = J_0 (1 + r \Delta \tau_z) (1 + r)^{[\tau_z]} - I_s \quad (61a)$$

Przy rozpatrywaniu kosztów bieżących uwzględniono jedynie koszty energii elektrycznej do napędu agregatów mroźniowych oraz pomp chłodziwa. Dla przyjętych założeń, gdy w przedziale czasu $\tau_{j-1} \div \tau_j$ ($[\tau_{j-1}] = [\tau_j]$) koszty te są rozłożone równomiernie, obowiązuje zależność

$$\sum_t a'_t K_t = \sum_j k_{elj} |\tau_j - \tau_{j-1}| (1 + r \frac{\Delta \tau_{j-1} + \Delta \tau_j}{2}) (1 + r)^{[\tau_j]} \quad (62)$$

gdzie k_{el} jest strumieniem kosztów energii elektrycznej odniesionym do jednego roku. Po przyjęciu stałości tego strumienia przez cały okres zamrażania, otrzymuje się

$$\sum_t a'_t K_t = \frac{k_{el}}{\tau_z} \left\{ \Delta \tau_z (1 + \frac{1}{2} r \Delta \tau_z) (1 + r)^{[\tau_z]} + \sum_{l=1}^{[\tau_z]} (1 + \frac{r}{2}) (1 + r)^{[\tau_z] - l} \right\} \quad (62a)$$

gdzie K_{el} jest całkowitym kosztem energii elektrycznej do napędu agregatów mroźniowych oraz pomp chłodziwa poniesionych do momentu otrzymania płaszczki mroźniowej o wymaganej grubości. Po wykonaniu działań i po pominięciu wyrażeń zawierających stopę dyskontową r w potęgze wyższej od jeden, wzór (62a) przyjmuje postać

$$\sum_t a_t K_t = K_{el} \left(1 + \frac{r\tau_z}{2}\right). \quad (62b)$$

Obliczenia wykonano przy założeniu, że stopa dyskontowa jest równa 0,08, koszt 1 MWh energii elektrycznej wynosi 1080 zł, sprawność pomp chłodziwa jest równa 0,7, wskaźnik energetyczny agregatów maleje od 3,11 w warunkach nominalnych do 2,56 przy minimalnej temperaturze chłodziwa, moc cieplna dopływająca z otoczenia stanowi 20% nominalnej mocy netto agregatów, straty ciśnienia oraz wskaźnik energetyczny agregatów przy temperaturze chłodziwa wyższej od -30°C są jak przy tej temperaturze, straty tarcia zaś poza pompą oraz elementami mrozeniowymi stanowią 25% mocy tarcia w tych elementach. Przyjęto, że wartość nakładu nominalnego określa wzór

$$J_0 = 110 + 3,3 n + 11,3 \dot{Q}_{mr\ m} + 20,2 \dot{q}_f n, \quad (63)$$

przy czym wynik jest wyrażony w mln zł, gdy moc nominalna netto agregatów $\dot{Q}_{mr\ m}$ oraz moc tarcia w pojedynczym elemencie \dot{q}_f są podane w MW. Zgodnie z nałożonym ograniczeniem liczba otworów wynosi $n = 80$. Zależności (63) i (64) uzyskano w oparciu o analizę kosztorysów trzech układów zamrażania.

Założono, że w momencie zakończenia mrożenia ulegają sprzedaży urządzenia o wartości (w mln zł)

$$I_g = 0,6 (11,3 \dot{Q}_{mr\ m} + 20,2 \dot{q}_f n). \quad (64)$$

W celu wyznaczenia w przybliżeniu optymalnych wartości mocy nominalnej netto agregatów oraz strumienia chłodziwa przypadającego na jeden element mrozeniowy, przy wymiarach rur jak w wariantach A+D (p. 2.3), posłużono się we wstępnej fazie obliczeń wynikami otrzymanymi uprzednio. Szacunkową wartość czasu mrożenia τ_z określono w oparciu o zasadę superpozycji

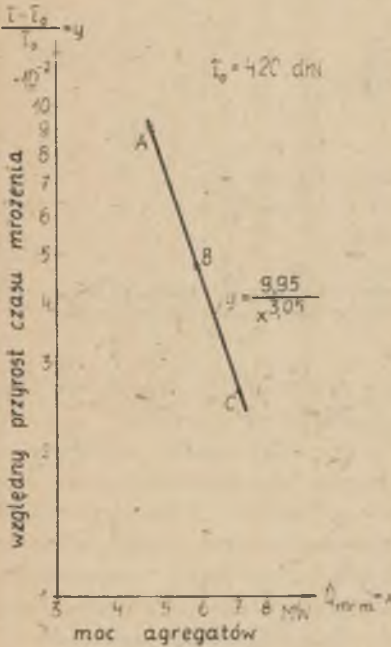
$$\tau_z \approx \tau_0 f_Q f_W, \quad (65)$$

gdzie τ_0 oznacza czas mrożenia przy stałej temperaturze chłodziwa, f_Q i f_W są zaś poprawkami uwzględniającymi wpływ mocy nominalnej netto agregatów oraz strumienia chłodziwa za pośrednictwem jego pojemności cieplnej. Dla przypadku rozpatrzonego w p. 2.3 przyrost względny czasu zamrażania τ w zależności od nominalnej mocy netto agregatów mrozeniowych $\dot{Q}_{mr\ m}$ pokazany jest na rys. 34 ($\tau_0 = 420$ dni jest czasem zamrażania w wariancie D dotyczącym stałej temperatury chłodziwa przy dopływie). Przyrost względny czasu mrożenia w funkcji pojemności cieplnej strumienia chłodziwa W przedstawiony jest na rys. 35. Czas $\tau_0 = 414$ dni został tu dobrany, podobnie jak oba parametry liczbowe opisujące krzywe hiperboliczne, za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Z rys. 34 oraz 35 wynika

$$f_Q = 1 + \frac{9,95}{\dot{Q}_{mr\ m}}, \quad f_W = 1 + \frac{0,943}{W} \quad (66)$$

a stąd

$$\tau_z \approx 1,078 \left(1 + \frac{9,95}{\dot{Q}_{mr\ m}}\right) \left(1 + \frac{0,943}{W}\right) \text{ lat.} \quad (67)$$



Rys. 34. Wpływ maksymalnej mocy netto agregatów mroźniowych na względny przyrost czasu zamrażania

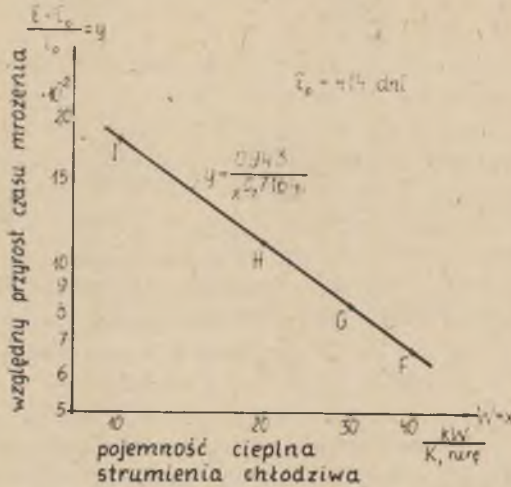
Wzór (67) podaje przybliżoną wartość czasu, po którym w warstwie 21 górotworu płaszcz mroźniowy osiąga grubość 6 m przy takich parametrach, jakie występowały w wariantach A, B i C, jedynie przy zmieniającym się strumieniu chłodziwa. W rzeczywistości czas τ_z jest bardziej złożoną funkcją parametrów $\dot{Q}_{mr\ m}$ i W , a zatem wzór (67) może służyć jedynie do rozważań wstępnych (poprawki f_Q i f_W określone relacjami (66) obowiązującymi w warunkach, dla których zostały wyznaczone).

Przybliżony koszt energii elektrycznej określano za pomocą zależności otrzymanej w wyniku analizy zużycia energii elektrycznej w wariantach A-D p. 2.3 i po zastosowaniu aproksymacji liniowej:

$$K_{el} \approx 9,7 + 0,14 \dot{Q}_{mr\ m} - \left[(1,08 - 1,96\beta) \dot{Q}_{mr\ m} + 15,9\beta - 11,5 \right] \dot{q}_f n + (23,5\beta \dot{q}_f n + 0,67 \dot{Q}_{mr\ m}) \tau_z \quad (68)$$

Wynik jest podany w mln zł. Symbol β oznacza stosunek mocy tarcia przy minimalnej i nominalnej temperaturze chłodziwa.

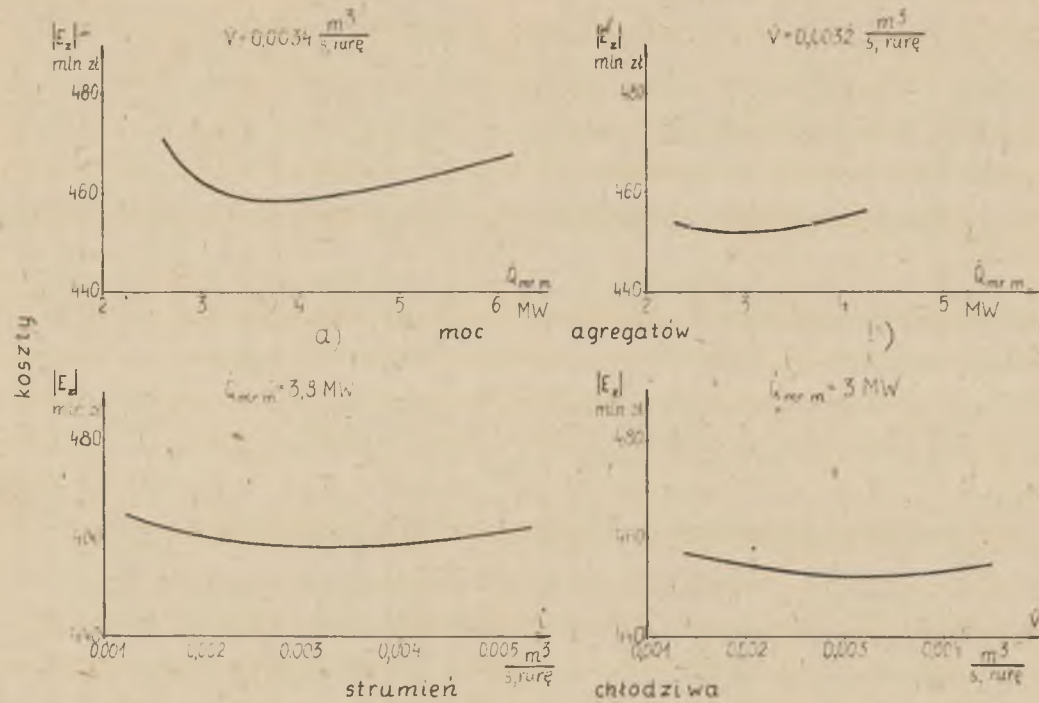
Na podstawie przedstawionych zależności wykonano obliczenia, których wyniki pokazano na rys. 36a. Na rysunku tym podano całkowite koszty równe bezwzględnej wartości efektu ekonomicznego określonego relacją (57). Orientacyjne optymalne wartości nominalnej mocy netto agregatów mroźniowych oraz strumienia chłodziwa przypadającego na jeden otwór wynoszą, dla założonych danych, 3,8 MW oraz $0,0034 \text{ m}^3/(\text{s}, \text{rure})$. W celu uściślenia otrzymanych wyników czas zamrażania oraz zużycie energii elektrycznej wy-



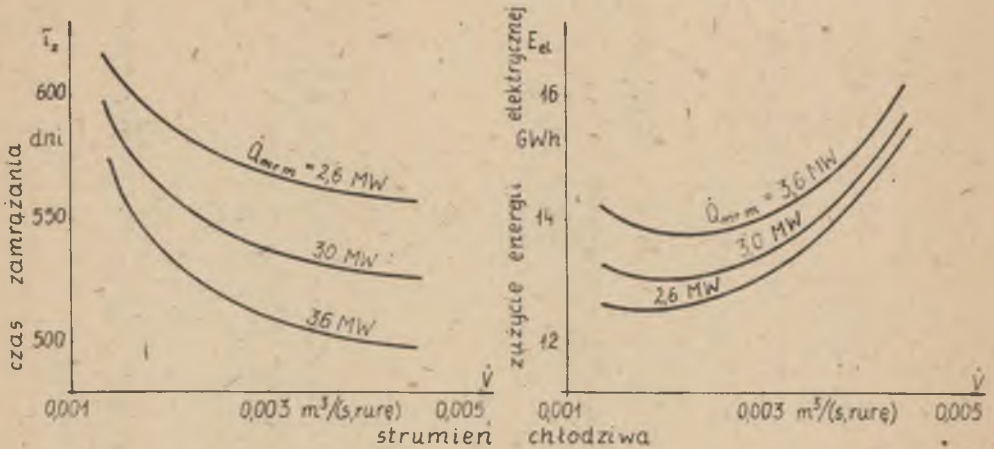
Rys. 35. Wpływ pojemności cieplnej strumienia chłodziwa odniesionego do jednego elementu na względny przyrost czasu zamrażania

znaczono przez analizę dodatkowych wariantów mrożenia. Ze względu na długi czas obliczeń (ok. 8 godzin w przypadku stosunkowo szybkiej maszyny Odra-1305) zredukowano liczbę warstw z 35 do 7. Dla warstw zastępczych przyjęto własności cieplne równe średnim ważonym własnościom warstw składowych, przy czym warstwy 19 i 21 pozostawiono bez zmian. Takie postępowanie, jak wykazały obliczenia porównawcze, powoduje zmianę czasu mrożenia wyraźnie mniejszą od jednego dnia, różnice zaś w przyroście temperatury chłodziwa wynoszą ok. 1%. W wyniku analizy procesu mrożenia górotworu przy parametrach zbliżonych do otrzymanych we wstępnym etapie obliczeń, określono relacje pomiędzy czasem zamrażania t_z i zużyciem energii elektrycznej E_{el} a optymalizowanymi parametrami. Relacje te częściowo zilustrowano za pomocą rys. 37. Uściślone wartości optymalnych parametrów mrożenia (rys. 36b) wynoszą $2,9 \pm 3 \text{ MW}$, $0,0032 \text{ m}^3/(\text{s}, \text{ rurę})$. Dość wyraźna różnica nominalnej mocy netto agregatów w porównaniu do rezultatów otrzymanych na drodze przybliżonej jest głównie spowodowana faktem, że wzór (67) daje w rozpatrywanym przypadku wyniki obarczone błędem rzędu 10%. Obliczenia wstępne mogą zatem być przydatne jedynie do oszacowania położenia optimum.

We wzorze (63) określającym nakład nominalny najtrudniejsze na ogół jest ustalenie dokładnej wartości wyrazu stałego. W celu zbadania wpływu nakładów stałych wykonano obliczenia dla przypadku, gdy wynoszą one 10 mln zł, a więc o 100 mln zł mniej niż uprzednio. Optymalne wartości mocy agregatów oraz strumienia chłodziwa wynoszą w takim przypadku 2,6 MW i $0,0029 \text{ m}^3/(\text{s}, \text{ rurę})$, a więc są zbliżone do otrzymanych uprzednio. Do obli-



Rys. 36. Zależność kosztów $|E_z|$ od maksymalnej mocy netto agregatów mroźeniowych \bar{Q}_{mr} oraz od strumienia chłodziwa odniesionego do jednego elementu \bar{V}
 a) obliczenia przybliżone, b) obliczenia dokładne



Rys. 37. Zależność czasu zamrażania τ_z oraz zużycia energii elektrycznej E_{el} do napędu agregatów mrozeniowych i pomp chłodziwa od maksymalnej mocy netto agregatów mrozeniowych \dot{Q}_{mr} oraz od strumienia chłodziwa odniesionego do jednego elementu \dot{V}

czeń optymalizacyjnych wystarcza tu zatem orientacyjna znajomość nakładów stałych, zwłaszcza że krzywe na rys. 36 mają w pobliżu ekstremum bardzo płaski przebieg.

Zależności (59) i (60), a tym samym (61) i (62), są słuszne przy całkowicie umownym założeniu, że płaszcz mrozeniowy ma osiągnąć założoną grubość na przełomie lat kalendarzowych. Założenie takie ma znaczenie tylko ze względu na sposób obliczania odpisów procentowych. W drugim krańcowym przypadku moment zakończenia mrożenia przypada w połowie roku kalendarzowego. Przy takim założeniu zależności (61a) i (62a) przyjmują postać

$$\sum_t a'_t N_t = J_0 (1 + r \Delta \tau_z) (1 + r) [\tau_z^{-0,5}] (1 + 0,5 r) - I_s \quad (69)$$

$$\sum_t a'_t K_t = \frac{K_{el}}{\tau_z} \left\{ \Delta \tau_z (1 + 0,5 r \Delta \tau_z) (1 + r) [\tau_z^{-0,5}] (1 + 0,5 r) + \sum_{l=1} [\tau_z^{-0,5}] (1 + 0,5 r)^2 (1 + r) [\tau_z^{-0,5}]^{-1} + 0,5 (1 + 0,25 r) \right\} \quad (70)$$

gdzie $\Delta \tau_z$ jest różnicą pomiędzy rzeczywistą wartością wyrażenia $\tau_z - 0,5$ i jego częścią całkowitą. Przykładowe obliczenia wykonane za pomocą wzorów (69) i (70) dały praktycznie taki sam wynik jak uprzednio, tzn. te same optymalne wartości mocy agregatów i strumienia chłodziwa, jak również tę

samą minimalną wartość całkowitych kosztów. Położenie punktu optymalnego nie zależy zatem od wyboru momentu zakończenia mrożenia.

W p. 4.2 przedstawiony jest sposób optymalizacji zewnętrznej średnicy rury opadowej, ze względu na minimalne opory przepływu chłodziwa. Tak dobrany wymiar zewnętrzny rury opadowej nie musi, w ogólnym przypadku, zapewniać minimum kosztów całkowitych. W celu zbadania opłacalności zastosowania mniejszych rur opadowych wykonano obliczenia dla układu rur 168/149 i 76/68 mm, wykorzystując zależności (61a), (62b), (63) i (64) oraz wyznaczając czas zamrażania i ilość zużytej energii elektrycznej przez analizę dodatkowych wariantów mrożenia. W przypadku tym optymalna nominalna moc netto agregatów wynosi 2,9 MW, optymalny strumień chłodziwa zaś $0,0029 \text{ m}^3/(\text{s}, \text{ rurę})$. Z porównania całkowitych kosztów wynika, że zastosowanie mniejszych rur opadowych byłoby opłacalne, gdyby ich koszt jednostkowy był niższy co najmniej o ok. $4\frac{1}{2}$ zł/m od rur o średnicach 89/79 mm.

Nieco inny jest przebieg obliczeń przy narzuconym momencie rozpoczęcia inwestycji. Również w tym przypadku obliczenia cieplne winny dostarczyć informacji o takim charakterze jak na rys. 37, inną postać ma jednak kryterium optymalizacji. Obliczenia dogodnie jest tu przeprowadzać maksymalizując różnicę ΔE pomiędzy efektem ekonomicznym E dla rozpatrywanego wariantu i efektem ekonomicznym E_0 odnoszącym się do przypadku stanowiącego wariant porównawczy:

$$\Delta E = E - E_0 = \max. \quad (71)$$

Przykładowe obliczenia wykonano przy założeniu, że różnica w czasie realizacji inwestycji jest równa różnicy czasów zamrażania $\sigma\tau_z$, kopalnia będzie po uruchomieniu pracować przez długi okres czasu, zmiana momentu uruchomienia kopalni nie wpływa na przebieg jej eksploatacji, z wyjątkiem zmian w okresie równym różnicy czasów mrożenia, łączny strumień nakładów i kosztów \dot{N} podczas realizacji inwestycji po zakończeniu zamrażania jest stały. Przyjęto również, że przed rozpoczęciem mrożenia poniesiono w roku $t = 0$ nakłady J_0 określone zależnością (63), po zakończeniu zamrażania zaś uzyskuje się ze sprzedaży urządzeń kwotę I_0 określoną wzorem (64). Jeśli \dot{P}_p oznacza średni strumień efektów produkcyjnych w roku uruchomienia kopalni p uzyskanych w wyniku przesunięcia chwili uruchomienia o $\sigma\tau_z$, równy różnicy dziennej wartości produkcji i dziennych kosztów bieżących, $K_{el t}$ zaś oznacza koszty energii elektrycznej do napędu pomp chłodziwa i agregatów mroźniowych poniesione w roku t , to wówczas

$$\Delta E = -\Delta J_0 + a[\tau_z]\Delta I_0 - \sigma\tau_z \left[a_p \dot{P}_p - (a[\tau_z] - a_p)\dot{N} \right] - \Delta \sum_t a_t K_{el t}. \quad (72)$$

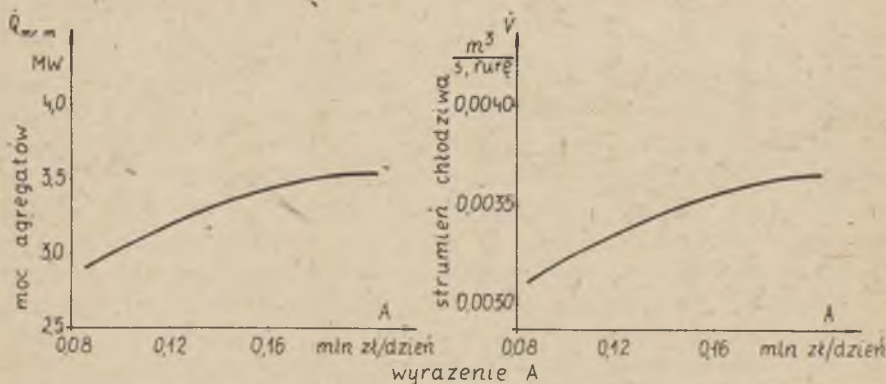
Relacja (72) jest słuszna po takim dobraniu wariantu porównawczego, iż różnice $\delta\tau_z$ pomiędzy czasem mrożenia w przypadku rozpatrywanym i porównawczym nie przekraczają jednego roku. Tym samym część całkowita $[\tau_z]$ wyrażonego w latach czasu zamrażania jest stała. W przykładowych obliczeniach przyjęto, że wyrażenie

$$A = a_p \dot{p} - (a[\tau_z] - a_p) \dot{N} \quad (73).$$

ma taką samą wartość dla wszystkich wariantów. Wyznaczenie wartości tego wyrażenia nawet w sposób orientacyjny wymaga dość dokładnych informacji odnośnie do całej inwestycji. Po uwzględnieniu (63) i (64) otrzymuje się

$$\Delta E = - (1 - 0,6 a[\tau_z]) (11,3 \Delta \dot{Q}_{mr\ m} + 20,2 \Delta \dot{q}_f n) - \Delta \sum_t a_t K_{el\ t} - \delta \tau_z A, \quad (74)$$

gdzie Δ oznacza różnicę pomiędzy wariantem rozpatrywanym i porównawczym. Współczynniki dyskontujące określa wzór (55). Obliczenia wykonano dla przypadku, gdy proces mrożenia górotworu rozpoczyna się na początku roku $t = 0$, strumień zaś kosztów energii elektrycznej, obliczany przy takich samych założeniach jak uprzednio, jest stały dla danego wariantu.



Rys. 38. Zależność optymalnych wielkości mocy agregatów $\dot{Q}_{mr\ m}$ oraz strumienia chłodziwa \dot{V} od wartości wyrażenia A

Wyniki obliczeń, w postaci nominalnej mocy netto agregatów mroźniowych $\dot{Q}_{mr\ m}$ i strumienia chłodziwa \dot{V} przypadającego na jeden element mroźniowy, przedstawione są na rys. 38. Rysunek ten podaje zależność pomiędzy parametrami $\dot{Q}_{mr\ m}$ i \dot{V} maksymalizującymi różnicę ΔE a wyrażeniem A. Optymalne wartości parametrów mrożenia zbliżone do wyznaczonych

uprzednio i równe odpowiednio 2,9 MW, 0,0032 m³/(s, rurę), obowiązują dla A = 0,09 mln zł/dzień.

Wyniki otrzymane przy różnych założeniach odnośnie do przebiegu procesu inwestycyjnego są na ogół różne. Przy prawidłowych relacjach cenowych mniejsze wartości optymalnych parametrów mrożenia powinny występować w przypadku, gdy stały jest moment zakończenia procesu zamrażania. Wynika to stąd, że negatywny efekt wzrostu czasu mrożenia ma wtedy minimalną wartość równą wzrostowi kosztów zamrożenia kapitału, w przypadku zaś stałego momentu rozpoczęcia inwestycji wydłużenie czasu mrożenia powoduje przede wszystkim spadek efektów produkcyjnych.

WNIOSKI

Wnioski wynikające z poszczególnych etapów pracy zawarte są w odpowiednich fragmentach opracowania. Poniżej przedstawiono jedynie wnioski najważniejsze oraz mające charakter bardziej ogólny.

Zastosowana metoda różnicowa pozwala na analizę krótko- i długotrwałych procesów zamrażania przy różnych wariantach mrożenia. Czas obliczeń jest równocześnie na tyle krótki, że możliwe jest wykonywanie wielowariantowych obliczeń za pomocą ogólnie dostępnych maszyn cyfrowych. Czas rozpatrywania jednego wariantu w p. 2.3 za pomocą maszyny ODRA 1305 wynosił ok. 8 godz., po zredukowaniu jednak liczby warstw jak w p. 4.4 zmalał on do ok. 1,5 godz.

Podstawowymi rezultatami obliczeń cieplnych wg przedstawionego modelu są zależności grubości płaszcza mrozeniowego od czasu dla poszczególnych warstw oraz postać zmienności mocy cieplnej odbieranej od górotworu w funkcji czasu. Wyniki te umożliwiają wskazanie warstwy lub warstw górotworu determinujących czas zamrażania oraz pozwalają, dla wybranego wariantu mrożenia, na określenie możliwości wyłączania kolejnych agregatów w miarę postępowania procesu zamrażania. Możliwość ta wynika stąd, że po osiągnięciu przez chłodziwo minimalnej dopuszczalnej temperatury przy dopływie do otworów mrozeniowych, agregaty pracują z niepełną mocą.

Moc nominalna netto agregatów mrozeniowych oraz strumień chłodziwa przypadający na jeden otwór wpływają na czas zamrażania według zależności o charakterze hiperbolicznym. Równocześnie wielkości te mają znikomy wpływ na kształt krzywych obrazujących położenie granicy obszaru zamrażniętego w funkcji czasu.

Minimalny czas zamrażania, przy odpowiednio dużej mocy agregatów i pojemności cieplnej strumienia chłodziwa, można określić za pomocą zależności bezwymiarowych. Wyrażona bezwymiarowo grubość płaszcza mrozeniowego przy jednym kręgu otworów jest funkcją 7 bezwymiarowych parametrów, z których 4 mają istotne znaczenie. Analiza bezwymiarowa może być również przydatna do wstępnego wskazania warstwy górotworu determinującej czas zamrażania.

Ze względu na mały wpływ mocy agregatów i strumienia chłodziwa na kształt krzywych przedstawiających położenie granicy obszaru zamrażniętego w zależności od czasu, niektóre parametry można dobrać w sposób optymalny niezależnie od tych wielkości. W przypadku mrożenia jednym kręgiem jest to promień kręgu otworów, zaś przy mrożeniu dwoma kręgami rozdział otworów na kręgi oraz promienie kręgów. Przy optymalizacji wstępnej mro-

zenia dwoma kręgami niezbędne jest przeprowadzenie najpierw obliczeń bezwymiarowych.

Pewne parametry mrożenia, a zwłaszcza moc nominalna agregatów mroźniowych i pojemność cieplna strumienia chłodziwa, powinny być dobrane w oparciu o kryteria ekonomiczne. Obliczenia cieplne dostarczają do analizy ekonomicznej danych tego typu jak na rys. 37. Optymalne wartości parametrów zamrażania, wyznaczone na drodze obliczeń techniczno-ekonomicznych, zależą m.in. od warunków realizacji inwestycji.

LITERATURA

- [1] Bell G.E.: A Refinement of the Heat Balance Integral Method Applied to a Melting Problem, *Int. Journal Heat Mass Transfer*, 21, 1978.
- [2] Bojarski W.W.: Podstawy metodyczne oceny efektywności w systemach energetycznych, Komitet Problemów Energetyki PAN, 1979.
- [3] Bucewicz A., Kalinowski E.: Analiza porównawcza zamrażania gruntów wilgotnych czynnikami chłodniczymi i kriogenicznymi, X Zjazd Termodynamików, Wrocław 1978.
- [4] Bucewicz A., Lange G.: Optymalizacja rozmieszczenia rur mrozeniowych przy zamrażaniu szybów, X Zjazd Termodynamików, Wrocław 1978.
- [5] Carslaw H.S., Jaeger I.C.: *Conduction of Heat in Solids*, Oxford 1959.
- [6] Crank J.: How to Deal with Moving Boundaries in Thermal Problems, materiały konferencji Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea 1979.
- [7] Croft D.R., Lilley D.G.: *Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations*, Londyn 1977.
- [8] Duda Z.: Wpływ niektórych parametrów otworów mrozeniowych na efektywność zamrażania skał, praca doktorska, Kraków 1968.
- [9] Glazór T., Pleśniak I., Przygodzka B.: Wybrane zagadnienia z mrożenia górotworu i kontroli tego procesu dla szybów głębiowych w LGM, Referaty Konferencji Głębokie Mrożenie Górotworu przy Głębieniu Szybów, Częstochowa 1976.
- [10] Goodling J.S., Khader M.S.: A Numerical Solution for Outward Solidification Problems, materiały konferencji Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea 1979.
- [11] Kostowski E.: Charakterystyczne rozkłady temperatur w elemencie Fielda, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 34*, Gliwice 1970.
- [12] Kostowski E.: Rozkład temperatur w opromienionym elemencie Fielda, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 28*, Gliwice 1968.
- [13] Kostrz J.: Głębienie szybów metodami specjalnymi, Katowice 1964.
- [14] Madejski J.: *Teoria wymiany ciepła*, Poznań 1963.
- [15] Malkiewicz T.: Rozkład temperatury w otworze mrozeniowym, X Zjazd Termodynamików, Wrocław 1978.
- [16] Malkiewicz T., Mikoś M.: Numeryczne rozwiązanie jednowymiarowego zagadnienia mrożenia gruntu we współrzędnych cylindrycznych, Materiały IX Zjazdu Termodynamików, Rzeszów - Polańczyk 1975.
- [17] Mochnacki B., Mazur K.: Zastosowanie metody elementu skończonego do symulacji procesu krzepnięcia odlewu, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 67*, Gliwice 1978.
- [18] Ocena ekonomicznej efektywności inwestycji i innych zamierzeń rozwojowych, zbiór przepisów, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1974.
- [19] Paszek W.I.: Ekspierimentalnoje issledowanije tieplofiziceskich charakteristik mierzlych i tazyh gruntow, Institut Tieplo- i Massoobmiena AN BSSR, Mińsk 1973.

- [20] Posyłek E.: Problemy zamrażania górotworu do dużych głębokości na przykładzie Lubelskiego Zagłębia Węglowego, Referaty Konferencji Głębokie Mrożenie Górotworu przy Głębinie Szybów, Częstochowa 1976.
- [21] Posyłek E.: Prognozowanie przebiegu procesu zamrażania i rozmrażania górotworu w budownictwie szybowym, praca doktorska, Kraków 1968.
- [22] Posyłek E.: Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości, prace ZBiDBG, Mysłówice 1974.
- [23] Posyłek E.: Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo z. 66, Gliwice 1975.
- [24] Składzień J.: Analiza cieplna procesu zamrażania górotworu przy pomocy metody różnicowej. Archiwum Termodynamiki i Spalania, 1, 1978.
- [25] Składzień J.: Analiza procesu zamrażania górotworu podwójnym kręgiem otworów mrozeniowych, X Zjazd Termodynamików, Wrocław 1978.
- [26] Składzień J.: Bezwymiarowa analiza cieplna procesu zamrażania górotworu, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 67, Gliwice 1978.
- [27] Składzień J.: The Application of the Difference Equations in Thermal Analysis of Rock - Freezing, ref. wygłoszony na konferencji Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea 1979 (praca nie publikowana).
- [28] Składzień J.: Zamrażanie górotworu przy ograniczonej mocy agregatów mrozeniowych, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 71, Gliwice 1979.
- [29] Składzień J.: Zastosowanie metody różnicowej do analizy cieplnej procesu zamrażania górotworu, Referaty Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Warszawa - Jabłonna 1976.
- [30] Składzień J.: Zastosowanie metody różnicowej do analizy cieplnej procesu zamrażania górotworu za pomocą podwójnego kręgu otworów mrozeniowych, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 63, Gliwice 1978.
- [31] Staniszewski B.: Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne, Warszawa 1963.
- [32] Ständer W.: Betrachtungen über den Einfluss der Temperaturverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung bei Gefrierschächten, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Hochschule Karlsruhe, H. 6, 1961.
- [33] Ständer W.: Die Frostausbreitungsvorgänge bei Gefriergründungen, insbesondere im Hinblick auf den Schachtbau, Ver. d. Inst. f. Bod. u. Grun., TH Karlsruhe, H. 3, 1960.
- [34] Ständer W.: Die Verbesserung der Gefriertechnik im Schachtbau auf wissenschaftlicher Grundlage, VDI-Z. 4 i 5, 1966.
- [35] Ständer W.: Mathematische Ansätze zur Berechnung der Frostausbreitung in ruhendem Grundwasser im Vergleich zu Modelluntersuchungen für verschiedene Gefrierrohranordnungen im Schacht - und Grundbau, Ver. d. Inst. f. Bod. u. Felsmechanik, TH Karlsruhe, H. 28, 1967.
- [36] Ständer W., Lenhard M.: Ebene eindimensionale Wärmeleitprobleme bei Änderung des Aggregatzustands, VDI - Z. 15, 1966.
- [37] Ständer W., Lenhard M.: Zylindersymmetrische eind. Wärm. b. Änd. d. Agg., VDI - Z. 16, 1966.
- [38] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej, Warszawa (w druku).
- [39] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych, Katowice 1977.
- [40] Szargut J.: Teoria procesów cieplnych, Warszawa 1973.
- [41] Trupak N.G.: Zamorazhivaniye gruntov pri stroitelstwie podziemnykh sooruzenij, Moskwa 1979.

- [42] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła, Warszawa 1979.
- [43] Zienkiewicz O.C.: The Formulation of Conduction and Convection Problems in Finite Element Analysis, ref. wygłoszony na konferencji Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea 1979 (praca nie publikowana).
- [44] Zienkiewicz O.C., Parekh G.J., Wills A.J.: The Application of Finite Elements to Heat Conduction Problems Involving Latent Heat, Rock Mechanics 5, 1973.

ANALIZA CIEPLNA I EKONOMICZNA MROŻENIA GÓROTWORU

S t r e s z c z e n i e

W pracy przeanalizowano proces zamrażania górotworu oraz zaproponowano metodykę doboru parametrów mrożenia. W celu realizacji obliczeń cieplnych opracowano model matematyczny rozpatrywanego procesu, bazujący na równaniach różnicowych bilansów elementarnych z ilorzem różnicowym przednim. Model ten wykorzystano do przykładowych wielowariantowych obliczeń dotyczących górotworu złożonego z wielu warstw i zamrażanego za pomocą pojedynczego oraz podwójnego kręgu otworów mrożeńiowych. Zbliżony model zastosowano do obliczeń opartych na parametrach bezwymiarowych. Po zdefiniowaniu tych parametrów wykonano obliczenia, których rezultaty mają charakter ogólny. Po analizie wyników przykładowych obliczeń dla przypadków rzeczywistych, jak również w rezultacie rozważań bezwymiarowych, opracowano sposób dobierania wybranych parametrów, które można określać wyłącznie w oparciu o obliczenia termodynamiczne. Pozostałe parametry mrożenia wynikają z analizy cieplno-ekonomicznej. Metoda wyznaczania optymalnych wartości tych parametrów bazuje na kryterium maksimum efektu ekonomicznego. Przedstawiono, za pomocą przykładu liczbowego, dwa warianty postępowania, w zależności od sposobu realizacji inwestycji.

ТЕПЛОВОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Резюме

В работе проанализирован процесс замораживания горных пород, а также предложена методика выбора параметров замораживания. С целью реализации тепловых расчётов разработана математическая модель рассматриваемого процесса базирующаяся на уравнениях в конечных разностях и на методе элементарных балансов. Эта модель использована для примерных многовариантных расчётов касающихся горных пород состоящих из нескольких слоёв и замораживаемых при помощи единичного или двойного круга замораживающих элементов. Приближённая модель использована для расчётов опирающихся на безразмерные параметры. После определения этих параметров сделаны расчёты, результаты которых имеют общий характер. После анализа результатов примерных расчётов для реальных случаев, а также в результате безразмерных расчётов, разработан способ подбора выбранных параметров, которые можно определять опираясь исключительно на термодинамическую расчёте. Остальные параметры замораживания исходят из тепло-экономического анализа. Метод определения оптимальных величин этих параметров базируется на критерии максимального экономического эффекта. Представлены, при помощи числового примера, два варианта действий, в зависимости от способа реализации инвестиции.

THERMAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF UNDERGROUND ROCK FREEZING

S u m m a r y

The paper analyses the process of underground rock freezing. The method of determining the freezing parameters is suggested. To perform calculations a mathematical model for the process has been developed. It is based on the finite difference equations of elementary balance with the forward difference approximation. The model has been applied to the multivariant calculations referring to the underground rock composed of several layers and frozen by a single or double circle of freezing holes. A similar model has been applied to calculations based on nondimensional parameters. After defining these parameters the calculations were made the results of which are general in character. After the analysis of the results of the example calculations for real cases and following the nondimensional considerations, a method for determining the chosen parameters was developed. These parameters can be determined only on the basis of thermal calculations. The remaining parameters of freezing come from the thermal-economical analysis. The method of determining the optimal values of these parameters is based on the criterion of maximum economic effect. Through a numerical example two variants of the procedure have been given depending on the way of investment realization.

P. 3349 / 81 / 78

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
MOŻNA NABYC W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- 44-100 Gliwice -- Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —
Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.