ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 67 Nr kol. 563

Jan SKŁADZIEŃ
Instytut Techniki Cieplnej

BEZWYMIAROWA ANALIZA CIEPLNA PROCESU ZAMRAŻANIA GÓROTWORU

Streszczenie. W pracy podano określenie bezwymiarowej grubości płaszcza mrożeniowego i bezwymiarowego czasu mrożenia oraz podano zależności opisujące w sposób bezwymiarowy parametry mrożenia i własności cieplne górotworu. Wpływ tych wielkości przedstawiono na wykresach. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu równań różnicowych z ilorazem przednim.

1. Wstęp

Analiza cieplna procesu zamrażania górotworu jest zagadnieniem dość złożonym. W górotworze bowiem występuje trójwymiarowe pole temperatury z ujemnymi źródłami ciepła, którymi są rury mrożeniowe. Rury te wraz z rurami opadowymi tworzą elementy Fielda, zawierające chłodziwo o temperaturze zależnej od głębokości i czasu. Własności skał zależą od położenia i zmieniają się skokowo w momencie zamrożenia. Zamrażany obszar znajduje się w ośrodku nieskończenie rozległym. Do części zamarzniętej i oziębionej dopływa ciepło z boku, od dołu i od góry. Temperatura naturalna górotworu jest funkcją głębokości. Z tych powodów rozkład temperatury oraz granice obszaru zamarzniętego można wyznaczyć jedynie w sposób przybliżony. W pracach [1, 2, 3] zaproponowano zastosowanie do tego celu równań różnicowych z ilorazem przednim, przedstawionych w [4]. Górotwór został podzielony na jednolite warstwy, w każdej z nich rozpatrzono powtarzalny fragment, który z kolei został podzielony na elementy różnicowe o kształcie granic zbliżonym do przewidywanego przebiegu izoterm. Obliczenia przykładowe [1] wykazały, że można pominąć przepływ ciepła w kierunku pionowym, celowe jest natomiast uwzględnienie przepływu ciepła przez powierzchnię walcową, na której znajdują się osie otworów mrożeniowych. Obliczenia dalsze [1,2,3] wykazały również, że przy odpowiednio dużych, lecz mających równocześnie sens praktyczny, wartościach mocy agregatów mrożeniowych oraz pojemności cieplnej strumienia chłodziwa, temperatura czynnika mrożącego jest praktycznie stała. Uzasadnia to przyjęcie przedstawionych założeń oraz rozpatrywanie, w przypadku obliczeń przybliżonych, jedynie pojedynczej warstwy górotworu.

2. Założenia

1. Rozpatrywana warstwa górotworu ma jednolitą strukturę i stałe własności cieplne. Własności te nie zależą od temperatury, zmieniają się jedynie skokowo w momencie zamrażania.

2. Pomija się ruch wód podziemnych oraz zmianę objętości wywołaną zamarzaniem wody.

3. Woda zamarza jak czysty składnik, tzn. w stałej temperaturze.

4. Temperatura chłodziwa oraz współczynnik wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej są stałe.

5. Temperatura początkowa całej warstwy górotworu jest taka sama.

6. Przepływ ciepła w kierunku pionowym odgrywa nieistotną rolę. Uwzględnia się natomiast przepływ ciepła przez powierzchnię walcową, na której znajdują się osie otworów mrożeniowych.

7. Istnieje tylko jeden krąg otworów mrożeniowych. Otwory te są rozłożone w sposób równomierny.

3. Bezwymiarowe zmienne i parametry mrożenia

W przypadku zamrażania górotworu za pomocą chłodziwa o stałej temperaturze grubość płaszcza mrożeniowego E jest funkcją czasu τ, przy czym istnieje 14 parametrów mających wpływ na przebieg procesu mrożenia:

n - liczba rur,

R_o - promień kręgu otworów mrożeniowych,

r_o - promień zewnętrzny rury mrożeniowej,

r_w - promień wewnętrzny rury mrożeniowej,

λ_r - współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury,

α - współczynnik wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej,

$t_{chł}$ - temperatura chłodziwa,

t_z - temperatura zamarzania wody,

t_g - temperatura naturalna górotworu,

λ_n - współczynnik przewodzenia ciepła górotworu niezamrożonego,

λ_z - współczynnik przewodzenia ciepła górotworu zamrożonego,

c_{pn} - objętościowa pojemność cieplna właściwa górotworu niezamrożonego,

c_{pz} - objętościowa pojemność cieplna właściwa górotworu zamrożonego,

R_k - objętościowa entalpia zamarzania wody w górotworze.

Wymienione wielkości występują w sposób bezpośredni lub pośredni (np. za pośrednictwem wymiarów elementów różnicowych) w równaniach różnicowych [1, 2, 4] służących do wyznaczenia wymiarów płaszcza mrożeniowego. Równania te można sprowadzić do postaci bezwymiarowej i wówczas jako rozwiązanie otrzyma się rozkład bezwymiarowej temperatury w funkcji bezwymiarowych zmiennych przestrzennych i bezwymiarowego czasu oraz bezwymiarowo wyrażoną grubość płaszcza mrożeniowego e w funkcji bezwymiarowego czasu f. Ilość parametrów ulega zmniejszeniu do 7 i są to też wielkości bezwymiarowe.

Bezwymiarowe zmienne i parametry określone są zależnościami:

$$e = \frac{E}{R_o}$$

$$f = \frac{\tau \cdot \lambda_n}{C_{pn} R_o^2}$$

$$k = \frac{R_k}{C_{pn}(t_g - t_{chł})}$$

$$t = \frac{t_z - t_{chł}}{t_g - t_{chł}}$$

$$p = \lambda_n\left(\frac{1}{\lambda_r} \ln \frac{r_o}{r_w} + \frac{1}{\alpha \cdot r_w}\right)$$

$$l = \frac{\lambda_n}{\lambda_z}$$

$$c = \frac{C_{pz}}{C_{pn}}$$

$$r = \frac{r_o}{R_o}$$

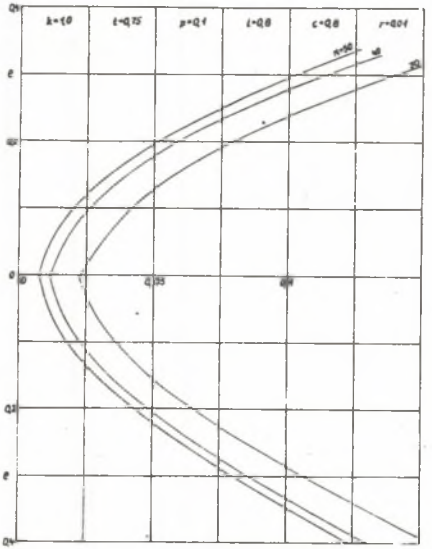
Siódmym parametrem jest ilość rur mrożeniowych n. Zatem:

$$e = e(f, n, k, t, p, l, c, r).$$

Podane wielkości bezwymiarowe otrzymać można również w wyniku analizy układu równań tworzących zagadnienie początkowo-brzegowe. Układ ten składa się z równań przewodzenia ciepła dla obszaru niezamrożonego i zamrożonego, warunku początkowego, warunków brzegowych na granicach rozpatrywanego fragmentu górotworu (w tym z warunku III rodzaju na styku górotworu z rurą mrożeniową) oraz z warunków dla granicy obszaru zamrożonego.

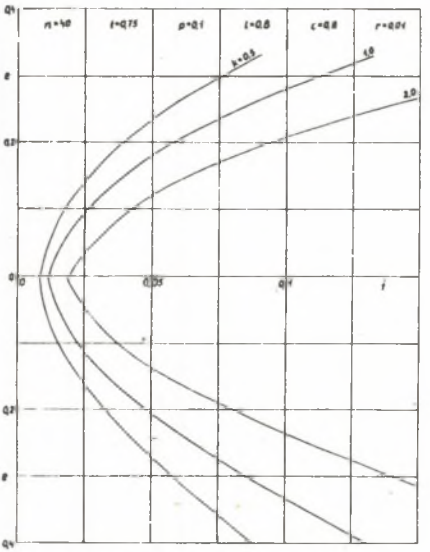
4. Wyniki przykładowych obliczeń

Na rysunkach 1-7 pokazano wyniki przykładowych obliczeń wykonanych za pomocą równań różnicowych [1,2,4] z ilorazem przednim, sprowadzonych do postaci bezwymiarowej. Na rysunkach tych występują podwójne krzywe obrazujące granice obszaru zamrożonego w sposób bezwymiarowy. Odległości punktów na dolnej lub górnej krzywej od osi czasu są proporcjonalne do grubości części płaszcza mrożeniowego wewnątrz lub na zewnątrz kręgu otworów w najwęższym miejscu. Długość pionowego odcinka zawartego pomiędzy odpowiadającymi sobie krzywymi jest zatem proporcjonalna do całkowitej grubości płaszcza mrożeniowego w jego najwęższej części.

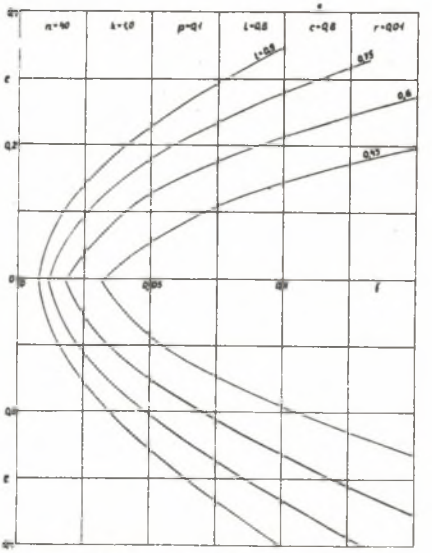


Rys. 1. Zależność e = e(f,n)

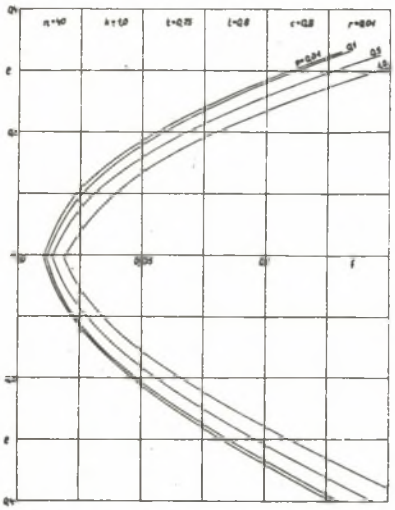
Na każdym rysunku pokazano wpływ jednego z parametrów przy stałych wartościach parametrów pozostałych, wartościach odpowiadających średnim, typowym warunkom mrożenia. Skrajne rozpatrywane wartości parametrów są zbliżone do ekstremalnych, spotykanych w praktyce, wartości bezwymiarowych parametrów mrożenia. Pewien wyjątek sta-



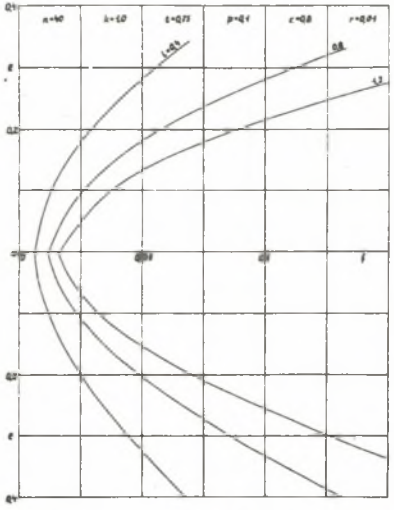
Rys. 2. Zależność e = e(f,k)



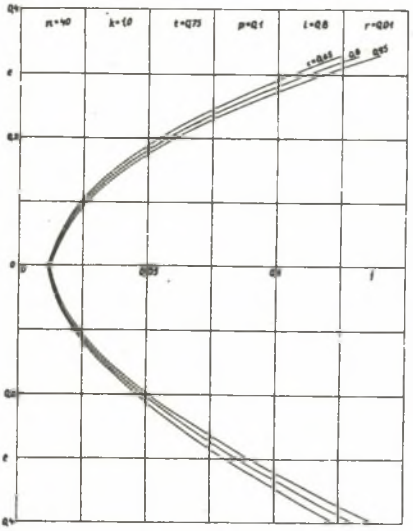
Rys. 3. Zależność e = e(f,t)



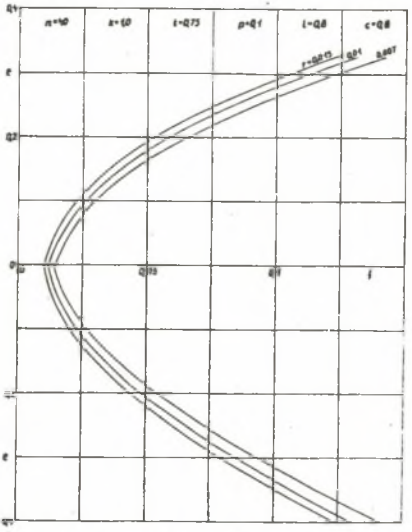
Rys. 4. Zależność e = e(f,p)



Rys. 5. Zależność e = e(f,l)



Rys. 6. Zależność e = e(f,c)



Rys. 7. Zależność e = e(f,r)

nowi stosunek l, który w sporadycznych przypadkach może przybierać wartości dość znacznie wybiegające poza rozpatrzony zakres.

Rysunki 1-7 obrazują kolejno wpływ: liczby rur n, bezwymiarowej entalpii zamarzania k, bezwymiarowej temperatury zamarzania t, bezwymiarowego oporu przenikania ciepła od górotworu do chłodziwa p, stosunku współczynników przewodzenia ciepła górotworu l, stosunku pojemności cieplnych górotworu c oraz wpływ bezwymiarowego promienia rury mrożeniowej r.

Z rysunków tych wynika, że w obszarze praktycznych wartości bezwymiarowych parametrów, duży wpływ na grubość płaszcza mrożeniowego mają parametry k, t oraz l, nieco mniejszy n oraz p, przy większych wartościach oporu przenikania, natomiast parametry c, r oraz p w dolnym zakresie wartości mają stosunkowo niewielkie znaczenie. Parametr p poniżej wartości 0,1 praktycznie nie odgrywa roli, gdyż opór przewodzenia ciepła przez rurę mrożeniową i wnikania do chłodziwa jest wtedy znikomo mały w porównaniu do oporów przewodzenia ciepła występujących w górotworze. Niewielki wpływ stosunku c wynika stąd, że ilość ciepła odebrana od górotworu po jego zamrożeniu jest znacznie mniejsza od entalpii zamarzania wody.

5. Uwagi końcowe

Przedstawione wykresy obrazują proces narastania płaszcza mrożeniowego w przypadku stałej temperatury chłodziwa. W rzeczywistości temperatura ta zmienia się z głębokością i z upływem czasu. Zmienność temperatury chłodziwa jest uzależniona od liczby i grubości warstw, od pojemności strumienia chłodziwa oraz od mocy i charakterystyki pracy [3] agregatów mrożeniowych. Za pośrednictwem chłodziwa więc warstwy górotworu oddziałują wzajemnie na siebie podczas procesu mrożenia (przepływ ciepła w kierunku pionowym, jak wspomniano, można zaniedbać). Przy wykonywaniu zatem obliczeń dokładnych lub obliczeń optymalizacyjnych należy z tych powodów brać pod uwagę cały zamrażany obszar, złożony z wielu warstw.

Wykresy pokazane na rysunkach dotyczą przypadku zamrażania jednym kręgiem. Z pewnym przybliżeniem można również odnieść je do przypadku zamrażania dwoma kręgami otworów. Całkowita grubość płaszcza mrożeniowego, po zamrożeniu przestrzeni pomiędzy kręgami, jest wtedy równa sumie grubości płaszcza na zewnątrz kręgu zewnętrznego, odległości między kręgami oraz grubości płaszcza wewnątrz kręgu wewnętrznego. Gdy wymagana grubość płaszcza jest co najmniej dwukrotnie większa od odległości kręgów, wówczas [2] można się spodziewać całkowitego zamrożenia przestrzeni pomiędzy kręgami. W celu wyznaczenia grubości płaszcza mrożeniowego w takim przypadku można korzystać, w rozważaniach przybliżonych, z przedstawionych rysunków. Wyznacza się wtedy oddzielnie grubość części płaszcza wewnątrz kręgu wewnętrznego oraz na zewnątrz kręgu zewnętrznego za pomocą odpowiedniej krzywej dolnej i górnej, nie tworzących w ogólnym przypadku pary. Bezwymiarowy czas będzie w obu przypadkach różny, ze względu na różną wartość promienia kręgu R_o. Tak otrzymana grubość płaszcza mrożeniowego będzie obarczona pewnym niewielkim dodatkowym błędem wynikającym z faktu, że przy zamrażaniu dwoma kręgami przepływ ciepła przez powierzchnie walcowe kręgów otworów mrożeniowych wpływa w nieco inny sposób na przebieg procesu mrożenia niż w przypadku istnienia jednego kręgu.

LITERATURA

[1] Składzień J.: Analiza cieplna procesu zamrażania górotworu przy pomocy metody różnicowej, Archiwum Termodynamiki i Spalania, w druku.

[2] Składzień J.: Zastosowanie metody różnicowej do analizy cieplnej procesu zamrażania górotworu za pomocą podwójnego kręgu otworów mrożeniowych, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka 63, Gliwice 1978.

[3] Składzień J.: Zamrażanie górotworu przy ograniczonej mocy agregatów mrożeniowych, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka, w druku.

[4] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych, Katowice 1977.

БЕЗРАЗМЕРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Р е з ю м е

В статье определены: безразмерная величина замороженного пространства, безразмерное время замораживания, безразмерные параметры процесса замораживания и безразмерные тепловые свойства горных пород. Влияние этих параметров и свойств показано на диаграммах. Вычисления сделаны при помощи метода конечных разностей.

DIMENSIONLESS THERMAL ANALYSIS
OF THE UNDERGROUND ROCK FREEZING PROCESS

S u m m a r y

In the paper definitions of a dimensionless size of the frozen area, dimensionless freezing time, dimensionless freezing process parameters and dimensionless underground rock properties are shown. Influence of these parameters and properties is shown on the diagrams. Calculations have been performed with the help of differentiate equations.