

Wiesław Gogół, Witold Pawłowski

Instytut Techniki Ciepłej

WYKORZYSTANIE UKŁADU DWUSKŁADNIKOWEGO PRZY ZMIANIE FAZY JEDNEGO ZE SKŁADNIKÓW JAKO DOLNEGO ŹRÓDŁA CIEPŁA DLA POMPY CIEPŁA

W niniejszej pracy rozważana jest możliwość wykorzystania układów dwuskładnikowych utworzonych z wody i wtrącenia o dowolnym kształcie, np. wąskiego żebra metalowego, przy zmianie fazy woda-lód, jako dolnego źródła ciepła dla pompy ciepła. Występowanie w strefie przemiany fazowej dodatkowego ciała lub grupy ciał (metali lub izolatorów cieplnych) może w znaczny sposób zmienić przebieg procesu zmiany fazy w stosunku do klasycznego zagadnienia Stefana. Przy wykorzystaniu magazynu ciepła w postaci układu dwuskładnikowego istnieją pewne możliwości regulacji, pozwalające na intensyfikację lub zmniejszenie szybkości procesu tworzenia fazy stałej; magazyn taki może być stosowany do zwiększenia lub zmniejszenia ilości ciepła zakumulowanego w układzie i odbieranego przez pompę ciepła.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a* – dyfuzyjność cieplna
- A* – wymiar układu w kierunku *x*
- B* – wymiar układu w kierunku *y*
- c* – ciepło właściwe
- F* – granica przemiany fazowej (front lodu)
- H* – odległość wtrącenia od powierzchni $x = 0$
- L* – ciepło przemiany fazowej
- n* – normalna do powierzchni
- N* – moc sprężarki pompy ciepła
- Q* – ilość ciepła, ilość ciepła odniesiona do jednostki czasu
- q* – gęstość strumienia ciepła
- s* – długość wtrącenia

- t – czas
 T – temperatura
 T_f – temperatura przemiany fazowej
 T_d – temperatura powierzchni dolnej obszaru
 T_g – temperatura powierzchni górnej obszaru
 T_0 – temperatura początkowa
 v_n – składowa normalna prędkości przemieszczania się granicy oddzielającej fazę stałą od fazy ciekłej
 x, y – współrzędne kartezjańskie
 β – współczynnik w zagadnieniu Stefana
 δ – grubość wtrącenia
 Δt – przyrost czasu
 Γ – brzeg układu dwuskładnikowego
 ϵ – współczynnik wydajności cieplnej pompy ciepła
 λ – przewodność cieplna
 ρ – gęstość
 Ω – obszar układu dwuskładnikowego
 ξ – grubość warstwy lodu w zagadnieniu Stefana

I n d e k s y

- a – system klimatyzacji
 c – skraplacz
 e – parownik
 i – wtrącenie
 l – faza ciekła
 s – faza stała
 sol – promieniowanie słoneczne

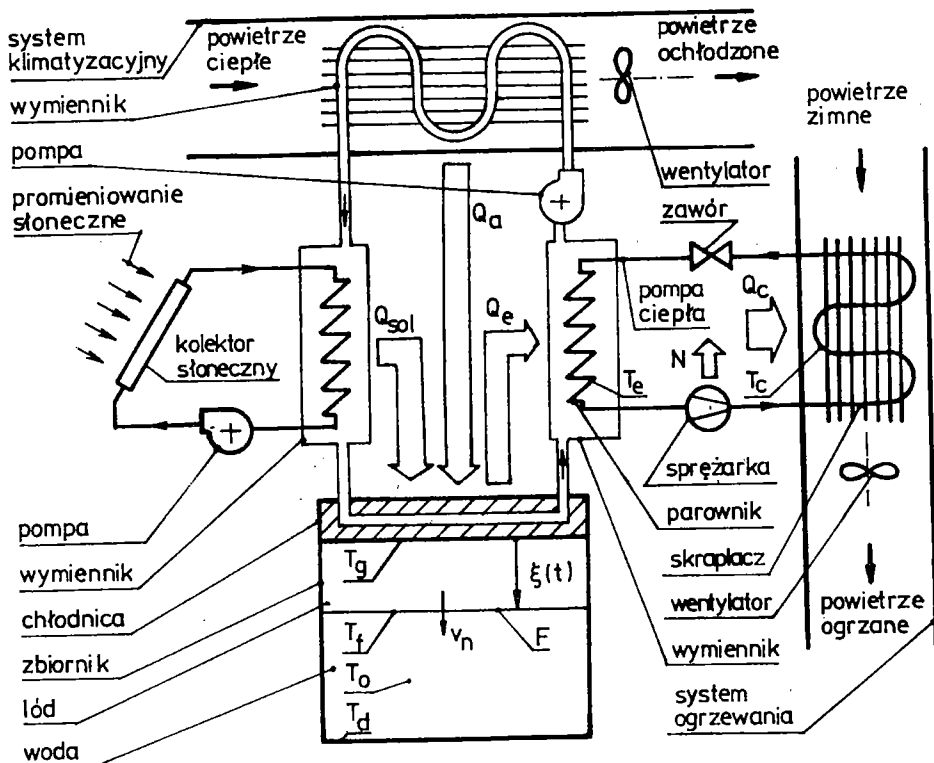
1. WSTĘP

Zagadnienia przewodzenia ciepła przy zmianie fazy (np. zagadnienie Stefana) występują w wielu dziedzinach techniki i stanowią ważny przedmiot badań naukowych. W niniejszej pracy przedstawiono możliwość wykorzystania układów dwuskładnikowych przy zmianie fazy woda-lód zawierających wtrącenia wykonane np. z metalu, jako dolnego źródła dla pompy ciepła. Zagadnienie przewodzenia ciepła przy zmianie fazy w układach dwuskładnikowych było jak dotychczas jedynie przedmiotem badań eksperymentalnych [12]. W tej pracy przedstawiono niektóre wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla wybranych układów.

Do akumulacji ciepła przy zmianie fazy ciec-z-ciało stałe mogą być wykorzystane różne materiały (woda, woski i inne) [10, 17]. Różnią się one między innymi przede wszystkim temperaturą, w jakiej zachodzi przemiana fazowa, oraz ilością ciepła, jakie można odebrać podczas procesu zmiany fazy. Ze względu na powszechne występowanie w przyrodzie oraz dużą pojemność cieplną często do akumulacji ciepła stosowana jest woda. Przemiana fazowa woda-lód, zachodzi w temperaturze $T_f \approx 0^\circ\text{C}$. Przy zamrażaniu 1 kg wody otrzymuje się 332,4 kJ energii. Przy założeniu, że ciepło właściwe wody jest stałe z temperaturą i równe $4212 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ [13], ilość ciepła odebrana podczas przemiany fazowej jest równa ilości ciepła otrzymanego przy ochładzaniu 1 kg wody od temperatury około 80°C do 0°C . Ciepło odbierane podczas przemiany fazowej woda-lód ze względu na niską temperaturę procesu nie znajduje zwykle zastosowania w tradycyjnych systemach akumulacji ciepła. Możliwe jest jednak wykorzystanie tego ciepła jako dolnego źródła dla pompy ciepła. W porównaniu do parametrów pompy ciepła odbierającej ciepło od powietrza atmosferycznego, którego temperatura zmienia się w ciągu roku (z czym jest związana duża zmienność współczynnika wydajności cieplnej $\varepsilon = (Q_e + N)/N = Q_c/N$, np. od 2,5 do 3,0 [1,3,4,9,15,20,21]), przedstawione rozwiązanie ze względu na stałą wartość temperatury procesu zapewnia prawie stałą wartość współczynnika ε . Wartość współczynnika zależy od rodzaju czynnika chłodniczego stosowanego w obiegu pompy ciepła [9] i od różnicy temperatury źródła górnego i dolnego. W przypadku gdy czynnikiem chłodniczym jest freon R22, dla temperatury skraplania T_c równej 60°C oraz temperatury parowania T_e równej -5°C współczynnik ε dla pompy ciepła odbierającej ciepło przy zamrażaniu wody może osiągać wartość 3,1 [11]. Ciepło przemiany fazowej woda-lód jest wykorzystywane jako dolne źródło ciepła dla pompy ciepła w systemach ACES (Annual Cycle Energy Systems) [11,20,21]. Ciepło to jest wykorzystywane do ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania wody użytkowej w okresie zimy, natomiast wyprodukowany lód może służyć do ochładzania powietrza doprowadzanego do pomieszczeń w okresie lata. System składa się z pompy ciepła odbierającej ciepło od wody zmagazynowanej w zbiorniku, wymienników ciepła, pomocniczego źródła ciepła – wykorzystywanego do topienia zbędnego lodu, np. kolektora słonecznego, instalacji ogrzewania i klimatyzacji. Schemat systemu ACES pokazano na rys.1.

Pompa ciepła odbiera ciepło Q_e od zamrażanej wody o temperaturze początkowej T_0 przez parownik umieszczony w wymienniku i oddaje ciepło Q_c w temperaturze T_c przez skraplacz umieszczony w instalacji ogrzewania. Lód może być topiony za pomocą energii promieniowania słonecznego Q_{sol} dostarczonej do zbiornika za pośrednictwem wymiennika przez kolektor słoneczny albo za pomocą ciepła Q_a odebranego przez chłodnicę od ciepłego powietrza w systemie klimatyzacji. Oziębione powietrze wykorzystywane jest do chłodzenia pomieszczeń. Szybkość procesu i ilość ciepła odbieranego podczas zamrażania wody w układzie jednoskładnikowym

zmniejszają się w czasie zgodnie z zależnościami określonymi w klasycznym zagadnieniu Stefana.



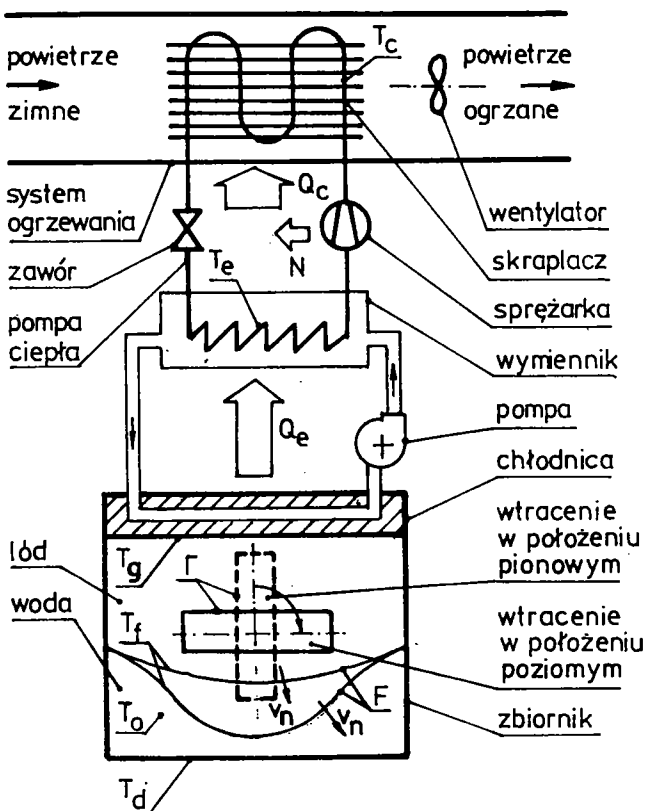
Rys.1. Schemat systemu ACES z pompą ciepła zamrażającą wodę w zbiorniku

Jako dolne źródło ciepła dla pompy ciepła mogą być również wykorzystane układy dwuskładnikowe utworzone z wody i wtrącenia wykonanego np. z metalu, przy zmianie fazy woda-lód (rys.2).

Występowanie w strefie przemiany fazowej woda-lód dodatkowego ciała lub grupy ciał (dobrego przewodnika lub izolatora cieplnego) może w znaczny sposób zmienić przebieg procesu zmiany fazy w stosunku do klasycznego zagadnienia Stefana. Przy wykorzystaniu magazynu ciepła w postaci układu dwuskładnikowego istnieją pewne możliwości regulacji pozwalające na intensyfikację lub zmniejszenie szybkości procesu tworzenia fazy stałej przy zamrażaniu; magazyn taki może być stosowany do zwiększania lub zmniejszania ilości ciepła zakumulowanego w układzie i odbieranego przez pompę ciepła.

Układy dwuskładnikowe mogą charakteryzować się różnym udziałem objętościowym, materiałem, położeniem i kształtem wtrącenia. Optymalizacja takich układów

powinna uwzględniać, że udział objętościowy składnika stałego powinien być mały, ponieważ udział ten zmniejsza pojemność cieplną magazynu. Przy ochładzaniu i zamrażaniu 1 kg wody od temperatury $+5^{\circ}\text{C}$ do -5°C otrzymuje się 363,9 kJ energii. Gdy udział objętościowy wtrącenia wykonanego z miedzi jest równy 10%, wtedy ilość ciepła odbieranego od układu przy chłodzeniu w tym zakresie temperatury jest równa 330,9 kJ. Obecność takiego wtrącenia w układzie powoduje zatem zmniejszenie pojemności cieplnej układu o około 9%.



Rys.2. System z pompą ciepła zamrażającą wodę w układzie dwuskładnikowym woda-wtrącenie; położenie granicy oddzielającej fazy ciekłą i stałą zależy od usytuowania wtrącenia

Przydatność układów do współpracy z pompą ciepła oceniano na podstawie wyznaczonych zależności gęstości strumienia ciepła q odbieranego od układu w funkcji czasu. Wyniki obliczeń porównano z zależnością $q(t)$ wyznaczoną z rozwiązania analitycznego klasycznego zagadnienia Stefana dla układu jednoskładnikowego.

2. AKUMULACJA CIEPŁA PRZY ZMIANIE FAZY W UKŁADZIE JEDNOSKŁADNIKOWYM

W układzie jednoskładnikowym i jednowymiarowym proces przewodzenia ciepła przy zmianie fazy jest opisany równaniem przewodzenia ciepła [18,23,24]

$$c(x, T) \rho(x, T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda(x, T) \text{grad } T(x, t)], \quad t > 0, x \in \langle 0, \xi \rangle \quad (1)$$

z warunkiem początkowym

$$T(x, 0) = T_0, \quad x \in \langle 0, \xi \rangle \quad (2)$$

warunkiem brzegowym

$$T(0, t) = T_g, \quad t > 0 \quad (3)$$

oraz warunkami na granicy F fazy stałej i ciekłej [8,16,18]

$$\lambda(\xi, T) \left. \frac{\partial T(\xi, t)}{\partial n} \right|_l - \lambda(\xi, T) \left. \frac{\partial T(\xi, t)}{\partial n} \right|_s = \rho_s L v_n, \quad t > 0 \quad (4)$$

$$T(\xi, t)|_l = T(\xi, t)|_s = T_f, \quad t > 0 \quad (5)$$

Pole temperatury w obszarze lodu jest opisane wzorem [8,16,18]

$$T(x, t) = T_g + \frac{T_0 - T_g}{\text{erf}\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_s t}}\right)} \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right) \quad (6)$$

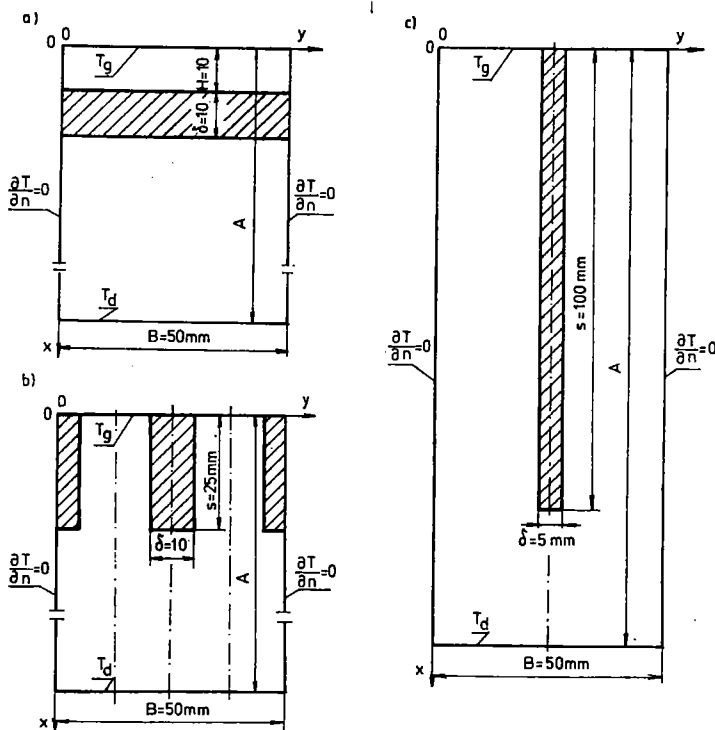
Gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnię $x = \text{const}$ jest opisana wzorem, który otrzymuje się po zróżniczkowaniu względem czasu zależności (6)

$$q(x, t) = \lambda_s \frac{T_0 - T_g}{\text{erf}\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_s t}}\right)} \frac{1}{\sqrt{a_s t}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{4a_s t}\right) \quad (7)$$

Wartość współczynnika β występującego w równaniu (7) wyznacza się z zależności (4) i (5), zatem przy określonej wartości T_g w klasycznym zagadnieniu Stefana $q(0, t) \sim (1/\sqrt{t})$. Zastosowanie układu dwuskładnikowego zmienia postać zależności $q(0, t)$.

3. AKUMULACJA CIEPŁA PRZY ZMIANIE FAZY W UKŁADACH DWUSKŁADNIKOWYCH

W dwuwymiarowych układach dwuskładnikowych, w których może zachodzić przemiana fazowa woda-lód, składnik, w którym nie zachodzi przemiana fazowa, może być umieszczony w układzie w postaci pojedynczego wtrącenia o dowolnym kształcie lub grupy wtrąceń. Mogą być brane pod uwagę na przykład wtrącenia w kształcie płytki cienkościennej, prostokąta, walca, pierścienia lub odpowiednio uformowanych żeber. W stanie nieustalonym faza stała i faza ciekła oddzielone są od siebie poruszającą się granicą przemiany fazowej. W trakcie zamrażania zachodzi obmarzanie wtrącenia umieszczonego w układzie. W niniejszej pracy przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń zależności $q(t)$ za pomocą metody numerycznej tylko dla kilku wybranych układów z wtrąceniami o możliwie prostym kształcie geometrycznym (płytki prostokątne i żebra prostokątne). Badane układy przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Układy dwuskładnikowe (wymiar A może być przyjęty w zależności od położenia frontu przemiany fazowej dla określonego czasu obliczeń numerycznych; np. dla przypadku c przy $T_g = -5^\circ\text{C}$ i $t = 10\,000\text{ s}$ przyjmowano $A = 130\text{ mm}$)

Zagadnienie przewodzenia ciepła w przedstawionych układach dwuskładnikowych, przy zmianie fazy jednego ze składników opisuje równanie przewodzenia ciepła [8,14]

$$c(x, y, T) \rho(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \operatorname{div} [\lambda(x, y, T) \operatorname{grad} T(x, y, t)], \quad t > 0, (x, y) \in \Omega \quad (8)$$

gdzie

$$\Omega = \{(x, y), x \in \langle 0, A \rangle, y \in \langle 0, B \rangle\}$$

z warunkiem początkowym

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (x, y) \in \Omega \quad (9)$$

i z warunkami brzegowymi

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0, \quad t > 0, x \in \langle 0, A \rangle \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(x, B, t)}{\partial y} = 0, \quad t > 0, x \in \langle 0, A \rangle \quad (11)$$

$$T(0, y, t) = T_g, \quad t > 0, y \in \langle 0, B \rangle \quad (12)$$

$$T(A, y, t) = T_d, \quad t > 0, y \in \langle 0, B \rangle \quad (13)$$

oraz warunkami na granicy F fazy stałej i ciekłej [8,14,16]

$$\lambda(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial n} \Big|_l - \lambda(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial n} \Big|_s = \rho_s L v_n, \quad t > 0, (x, y) \in F \quad (14)$$

$$T(x, y, t) \Big|_l = T(x, y, t) \Big|_s = T_f, \quad t > 0, (x, y) \in F \quad (15)$$

Gęstość strumienia ciepła odbieranego od układu przez powierzchnię $x = 0$ wyznaczano ze wzoru [14,24]

$$q(0, y, t) = \lambda(0, y, T) \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x}, \quad t > 0, y \in \langle 0, B \rangle \quad (16)$$

Do rozwiązywania zagadnienia przewodzenia ciepła przy zmianie fazy w przedstawionych układach dwuskładnikowych (wyznaczenia pól temperatury i zależności gęstości strumienia ciepła odbieranego od układu w funkcji czasu) można stosować różne metody numeryczne [2,6,7,8,19,22,25]. W niniejszej pracy zastosowano meto-

dę różnic skończonych ze schematem różnicowym Du Forta-Frankela przedstawioną szczegółowo w pracy [14]. W metodzie tej zastosowano zmienny krok czasowy oraz nieregularną siatkę o kształcie prostokątnym.

4. ZALEŻNOŚĆ GĘSTOŚCI STRUMIENIA CIEPŁA ODBIERANEGO OD UKŁADÓW JEDNOSKŁADNIKOWEGO I DWUSKŁADNIKOWYCH W FUNKCJI CZASU

Przeprowadzono obliczenia pól temperatury, położenia frontu lodu i zależności gęstości strumienia ciepła odbieranego od układu w funkcji czasu dla układów prostokątnych o wymiarach $A \times B$, w których zachodzi przemiana fazowa woda-lód. Pola przekrojów wzdłużnych wtrąceń (zakreskowanych na rys.3) przypadające na 1 m.b. powierzchni górnej w kierunku y we wszystkich badanych przypadkach były jednakowe i wynosiły 10^{-3} m^2 . Przyjęto, że w chwili $t = 0$ występuje wyrównana temperatura $T_0 = T_f = T_d = 0^\circ\text{C}$. Rozpatrywano dwa przypadki: gdy temperatura ścianki górnej jest równa $T_g = -5^\circ\text{C}$ oraz $T_g = -20^\circ\text{C}$. W zasadzie ze względu na zakres temperatury, w jakiej działają współczesne pompy ciepła, zastosowanie praktyczne ograniczone jest na ogół do przypadku, gdy temperatura powierzchni górnej układu jest równa około -5°C . Wyniki dla drugiego przypadku (-20°C) podane są dla celów porównawczych.

Obliczenia przeprowadzono dla lodu o właściwościach cieplnych stałych z temperaturą. Na przykład przy średniej temperaturze $T = -2,5^\circ\text{C}$ przyjęto następujące właściwości lodu: $\lambda_s = 2,26 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $c_s = 2100 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\rho_s = 917,4 \text{ kg}/\text{m}^3$, $a_s = 1,17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 332,4 \cdot 10^3 \text{ J}/\text{kg}$.

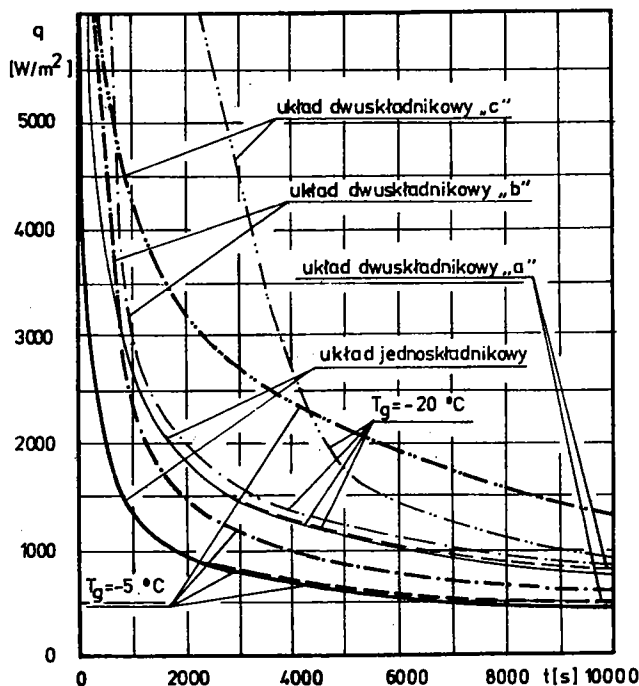
Przyjęto, że wtrącenie posiada właściwości cieplne zbliżone do miedzi [13]: $\lambda_i = 386 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $c_i = 385 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\rho_i = 8950 \text{ kg}/\text{m}^3$, $a_i = 112,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Wyznaczone zależności gęstości strumienia ciepła w funkcji czasu $q(t)$ dla przedstawionych układów pokazano na rys.4.

Na przebieg procesu duży wpływ ma zarówno temperatura powierzchni górnej układu, jak również kształt wtrącenia. Zastosowanie wtrącenia wykonanego z miedzi przyspiesza proces zamarzania i zwiększa gęstość strumienia ciepła odbieranego od układów dwuskładnikowych.

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń i z rys.4, umieszczenie w układzie wtrącenia w kształcie żeber zwiększa gęstość strumienia ciepła odprowadzanego przez powierzchnię $x = 0$ w porównaniu z układem jednoskładnikowym. Dla układu z żebrami o długości 100 mm (układ c) dla małych czasów (do 4300 s) szybkość zamarzania i gęstość strumienia ciepła jest znacznie większa w przypadku gdy temperatura $T_g = -20^\circ\text{C}$ niż dla temperatury $T_g = -5^\circ\text{C}$, natomiast dla większych

czasów (ponad 4300 s) przy $T_g = -20^\circ\text{C}$ wartości gęstości strumienia ciepła są mniejsze niż dla układu, w którym temperatura powierzchni górnej jest równa -5°C .



Rys.4. Zależność $q(t)$ dla badanych układów; a) układ dwuskładnikowy (przegroda $\delta = 10$ mm), b) układ dwuskładnikowy (żebro prostokątne $\delta = 10$ mm, $s = 25$ mm), c) układ dwuskładnikowy (żebro prostokątne $\delta = 5$ mm, $s = 100$ mm)

W układzie z żebrami o długości 25 mm (układ b) przy temperaturze $T_g = -20^\circ\text{C}$ dla bardzo małych czasów (do 600 s) gęstość strumienia ciepła jest większa niż dla układu z żebrami o długości 100 mm przy temperaturze $T_g = -5^\circ\text{C}$; dla większych czasów (powyżej 600 s) wartości $q(t)$ są znacznie niższe dla wtrącenia w kształcie żebra krótkiego (25 mm) dla obu temperatur powierzchni górnej T_g . W przypadku układów bez wtrąceń oraz z wtrąceniami w postaci poziomej przegrody o grubości 10 mm (układ a) w całym zakresie badanych czasów wartości gęstości strumienia ciepła odprowadzanego przez powierzchnię $x = 0$ są większe dla niższej (-20°C) temperatury powierzchni górnej.

5. WNIOSKI

- Akumulacja ciepła przy zmianie fazy woda-lód ze względu na powszechność występowania wody w przyrodzie oraz dużą wartość ciepła przemiany fazowej

może znaleźć zastosowanie w odpowiednio skonstruowanych systemach ciepłych np. z pompą ciepła. Stosowane są systemy z pompą ciepła zamrażającą wodę w układach jednoskładnikowych, np. system ACES.

- Wykorzystanie do akumulacji ciepła układów jednoskładnikowych przy zmianie fazy ma pewne ograniczenia, a mianowicie nie jest możliwe zwiększanie ilości ciepła odbieranego z takiego układu bez konieczności znacznego zwiększania wymiarów powierzchni wymiany ciepła lub obniżania temperatury parownika pompy ciepła.
- Wydaje się, że zastosowanie do akumulacji ciepła układów dwuskładnikowych z przemianą fazową woda-lód może pozwolić na regulację przebiegu procesu zamrażania wody (przez zmianę położenia i kształtu wtrącenia lub grupy wtrąceń) i odbieranie optymalnej ilości ciepła (przez poprawienie warunków pracy pompy ciepła). Zatem celowe byłoby projektowanie układów dwuskładnikowych, których charakterystyka byłaby związana z właściwościami materiałowymi wtrąceń, ich kształtem, wielkością oraz wzajemnym usytuowaniem.
- Wtrącenia mogą mieć kształt dowolny, np. płytek cienkościennych, prostokątów, walców, pierścieni, odpowiednio uformowanych żeber itp.
- Optymalizacja układów dwuskładnikowych z przemianą fazową woda-lód powinna uwzględniać, że udział wtrącenia musi być w układzie mały, ponieważ zmniejsza pojemność cieplną magazynu.
- Pewnym kryterium określającym przydatność stosowania układu dwuskładnikowego przy zmianie fazy jednego ze składników jako magazynu ciepła, w szczególności jako dolnego źródła ciepła dla pompy ciepła, może być zależność gęstości strumienia ciepła q odbieranego od układu w funkcji czasu.
- Zastosowanie wtrąceń wykonanych z metalu (np. z miedzi) może znacznie przyspieszyć proces zamrażania układu, przy czym duże znaczenie dla szybkości zamrażania układu i ilości ciepła przemiany fazowej odbieranego od układu w czasie tego procesu ma kształt i położenie wtrąceń. Obecność wtrąceń w kształcie żeber powoduje zwiększenie szybkości zamrażania wody w układzie w stosunku do układu bez wtrąceń, jak również w porównaniu z układem z wtrąceniami w postaci przegrody. Stwierdzono, że obecność wtrąceń w postaci cienkich i długich żeber (np. $\delta = 5$ mm, $s = 100$ mm) powoduje zwiększenie szybkości zamrażania i gęstości strumienia ciepła odbieranego od układu w porównaniu z układem z wtrąceniami o tej samej objętości, ale w kształcie żeber krótkich i grubych (np. $\delta = 10$ mm, $s = 25$ mm).
- Duży wpływ na przebieg procesu zamrażania ma temperatura powierzchni górnej. Największa gęstość strumienia ciepła odprowadzanego przez powierzchnię $x = 0$ występuje dla układów z wtrąceniami w postaci długich żeber, np. o długości 100 mm. Dla tego układu wartości $q(t)$ są większe, w przypadku gdy temperatura powierzchni górnej $T_g = -20^\circ\text{C}$, jedynie dla małych czasów. Dla większych czasów, wskutek szybszego zamrażania przestrzeni pomiędzy żebrami i zmniejszenia się powierzchni frontu przemiany fazowej $q(t)$ przy $T_g = -20^\circ\text{C}$ gwałtownie maleje i począwszy od czasu $t = 4300$ s osiąga wartości mniejsze

niż przy $T_g = -5^\circ\text{C}$. Widoczne na rys.4 dla czasu około 5000 s wyraźne „załamanie” krzywej „c” dla temperatury $T_g = -20^\circ\text{C}$ odpowiada właśnie zamrożeniu wody w przestrzeni pomiędzy żebrami, znacznemu zmniejszeniu frontu przemiany fazowej F i jego oddaleniu od końca żebra.

- Układy dwuskładnikowe ze zmianą fazy woda-lód mogłyby być stosowane do akumulacji ciepła jako dolne źródło ciepła dla pompy ciepła zamiast układów jednoskładnikowych stosowanych w systemach ACES. Przy zachowaniu korzystnych parametrów pracy pompy ciepła (stała, wysoka wartość współczynnika wydajności cieplnej ϵ) możliwe byłyby: zmniejszenie rozmiarów magazynu oraz regulacja ilości ciepła odbieranego przez pompę ciepła.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Bach K.*: Wärmepumpen. Expert Verlag, Grafenau 1982.
- [2] *Bergantz G.W.*: Conjugate solidification and melting problem in multicomponent open and closed system. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 2, 1992.
- [3] *Berghmans J.*: Heat pump fundamentals. NATO Advanced Study, Institutes Series, Series: Applied Sciences, No. 53, 1984.
- [4] *Brodowicz K., Dyakowski T.*: Pompy ciepła. PWN, Warszawa 1990.
- [5] *Carslaw H.S., Jaeger I.C.*: Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford 1959.
- [6] *Choi C.Y., Hsieh C.K.*: Solution of Stefan problem imposed with cyclic temperature and flux boundary conditions. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 5, 1992.
- [7] *Comini G., Guidice S., Lewis R., Zienkiewicz C.*: Finite element solution of non linear heat conduction problems with special reference to phase change. Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 8, 1974.
- [8] *Crank J.*: Free and moving boundary problems. Clarendon Press, Oxford 1984.
- [9] *Cube H., Steimle F.*: Wärmepumpen, Grundlagen und Praxis. VDI Verlag, Dusseldorf 1984.
- [10] *Domański R.*: Magazynowanie energii cieplnej. PWN, Warszawa 1990.
- [11] *Dorgan C.E.*: Ice-maker heat pumps operation and design. ASHRAE Transactions. Part 1, Vol. 91, 1985. Reedsburg Center, ASHRAE Transactions, Part 1, Vol. 88, 1982.
- [12] *Gogół W. i inni*: Badania procesu przewodzenia ciepła w prostych układach dwuskładnikowych przy zmianie fazy jednego ze składników. Sprawozdanie 437/3-E4, Komitet Termodynamiki i Spalania PAN, Warszawa 1984.

- [13] *Gogół W.*: Wymiana ciepła – tablice i wykresy. WPW, Warszawa 1984.
- [14] *Gogół W., Pawłowski W.*: Obliczenia numeryczne przewodzenia ciepła w układach dwuskładnikowych przy zmianie fazy jednego ze składników. Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej, nr 75, 1991.
- [15] *Heap R.D.*: Heat pumps. E. & F.N. Spon, London 1972.
- [16] *Hill J.M.*: One dimensional Stefan problems. An introduction. Pitman Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics 31. John Wiley, New York 1987.
- [17] *Kirn H.*: Wärmequellen und Wärmespeicher. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1983.
- [18] *Lykow A.W.*: Teoria ciepłowodności. GITTL, Moskwa 1967.
- [19] *Ozisik M.N.*: Heat Conduction. John Wiley, New York 1980.
- [20] Refrigeration. Systems and applications. 1990 ASHRAE Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 1990.
- [21] *Sauer H., Howell R.*: Heat pump systems. John Wiley, New York 1983.
- [22] *Sheen S., Hayakawa K.*: Finite difference simulation for heat conduction with phase change in a irregular food domain with volumetric change. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 6, 1992.
- [23] *Staniszewski B.*: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
- [24] *Wiśniewski St.*: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979 i 1988.
- [25] *Zabaras N., Ruan Y., Richmond O.*: Design of two dimensional Stefan process with described freezing front motion. Num. Heat Transfer, Part B, Fundamentals, Vol. 21, No. 3, 1992.

UTILISATION OF THE TWO-COMPONENT SYSTEM WITH PHASE CHANGE IN ONE OF THE COMPONENTS AS THE HEAT SOURCE FOR A HEAT PUMP

S u m m a r y

The possibility of utilisation of the two-component system composed of water and an inclusion of any shape, for example of thin metal fin, with water-ice phase change as the heat source for a heat pump has been considered.

Existence of the additional object or set of objects (metal or heat insulator) in the phase change area can significantly change the solidification process in comparison to classical Stefan problem.

Utilisation of the two-component heat storage gives the possibility of some regulation. Intensification or reduction of a speed of the solidification process is available. The storage can be applied to maximise or minimise the amount of the energy accumulated in the system and used by the heat pump.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОГО ИЗ КОМПОНЕНТОВ КАК ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Краткое содержание

В работе представлена возможность использования двухкомпонентных систем, состоящих из воды и включения произвольной формы (напр. узкого металлического ребра) при фазовом переходе вода-лед как холодного источника тепла для теплового насоса.

Появление в зоне фазового превращения отдельного включения или группы тел (металлов или изоляторов) может значительно изменить процесс фазового перехода в сравнении с классической задачей Стефана.

Применение аккумулятора тепла в форме двухкомпонентной системы создает возможность интенсификации или уменьшения скорости процесса образования твердой фазы; такой магазин может быть применен для регулирования количества тепла аккумулированного системой и полученного тепловым насосом.