

RENETA SIKORSKA-BĄCZEK*

ZIĘBIARKI ABSORPCYJNE Z SYSTEMEM AKUMULACJI
ZIMNA W POSTACI ZAWIESINY LODOWEJ
W KLIMATYZACJIAPPLICATION OF AMMONIA ABSORPTION CHILLERS
WITH SECONDARY COOLING SYSTEM WITH ICE
SLURRY FOR AIR CONDITIONING

Streszczenie

Alternatywnym rozwiązaniem, które powinno być częściej wykorzystywane w instalacjach klimatyzacyjnych przemysłowych, a także w klimatyzacji komfortu, są ziębiarki absorpcyjne amoniakalne. Ich zaletą jest możliwość uzyskiwania ujemnych temperatur odparowania, a przez to możliwość zastosowania akumulacji zimna w lodzie. Jednym ze sposobów jest wytwarzanie zawiesiny lodowej w cieczy. Zasadniczymi zaletami lodu zawiesinowego są: obojętność dla środowiska naturalnego oraz możliwość wykorzystania zawiesiny lodowej nie tylko jako nośnika ciepła, ale także jako medium akumulującego zimno.

Słowa kluczowe: ziębiarka absorpcyjna amoniakalna, lód zawiesinowy, akumulacja zimna w lodzie zawiesinowym, klimatyzacja komfortu

Abstract

An alternative solution which should be more frequent in industrial air conditioning systems as well as comfort air conditioning are absorption ammonia chillers. It make possible to obtain negative temperature of evaporation, and therefore to accumulate cold in ice. Because of their excellent heat transfer properties ice slurries can be applied successfully as working fluid in the secondary cooling cycles combined with primary cooling system of absorption chillers. The main advantages of using ice slurry are its environmental neutrality and the possibility of using it not only as a working fluid but also as the medium of accumulating cold.

Keywords: ammonia absorption chillers, ice slurry, cold accumulation in ice slurry, comfort air conditioning

* Dr inż. Renata Sikorska-Bączek, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Z uwagi na zaostrzenie przepisów odnośnie ochrony środowiska, a szczególnie atmosfery, można zaobserwować obecnie równoległe drogi rozwoju techniki chłodniczej:

- poszukiwanie nowych czynników chłodniczych, które zastąpią dotychczas stosowane szkodliwe freony z grupy CFC oraz ograniczenie stosowania freonów z grupy HCFC,
- badania nad zastosowaniem czynników całkowicie neutralnych dla środowiska naturalnego, takich jak: woda, amoniak propan czy dwutlenek węgla. Teoretycznie mogą być one używane jako czynniki chłodnicze ale nie są szeroko stosowane, przede wszystkim ze względu na ich własności termodynamiczne, ale także toksyczność i wybuchowość (amoniak, propan),
- stosowanie pośrednich układów chłodzenia, które umożliwiają zastosowanie dwóch różnych płynów roboczych, jeden do produkcji, a drugi do transportu zimna. W tym rozwiązaniu ogranicza się ilość szkodliwych freonów, które są używane tylko do samego procesu produkcji zimna. Jest ono następnie przekazywane za pomocą płynu pośredniczącego, neutralnego dla środowiska, do odbiorcy. Do najczęściej stosowanych czynników pośredniczących (chłodziw) należą: solanki (chlorki wapnia, sodu, magnezu), roztwory soli i alkoholi.

Nowym obiecującym chłodziwem stosowanym w pośrednich układach chłodzenia jest lód binarny, zwany lodem zawiesinowym. Lód ten jest mieszaniną kryształków lodu z wodą i środkami obniżającymi temperaturę krzepnięcia wody. Środkami tymi mogą być glikole alkohole lub sole. Rozmiary kryształów lodu w lodzie binarnym są niewielkie i zazwyczaj nie przekraczają 0,5 mm.

Dzięki temu lód binarny może być przepompowywany przez układ przewodów tak samo jak faza ciekła. Lód binarny uznawany jest obecnie za najlepszy płyn pośredniczący dla zakresów temperatur od -8°C do -2°C i stosowany jest w supermarketach, zakładach przetwórstwa spożywczego oraz w klimatyzacji różnych obiektów (hoteli, kopalni, biurów, samolotów).

Zastosowanie lodu binarnego jako chłodziwa w pośrednich systemach chłodzenia może przynieść wiele korzyści, pod warunkiem że zostaną właściwie dobrane parametry pracy instalacji i poprawnie zaprojektowane jej elementy (wymenniki ciepła, rurociąg, pompy). Do tego celu niezbędna jest znajomość właściwości fizycznych i termodynamicznych chłodziwa, takich jak: gęstość, lepkość, przewodność cieplna, ciepło właściwe i entalpia właściwa.

Możliwości zastosowania lodu zawiesinowego są bardzo duże i jeżeli koszty będą relatywnie niskie to wówczas czynnik ten może zastąpić dotychczas stosowane chłodziwa. Zwraca się również uwagę na potencjalne możliwości zastosowania absorpcyjnych urządzeń ziębniczych (w tym do klimatyzacji) zamiast urządzeń sprężarkowych, a także na możliwość stosowania w tych urządzeniach zawiesiny lodowej jako cieczy pośredniczącej z akumulacją zimna w lodzie.

2. Ogólna charakterystyka lodu zawiesinowego

Lód zawiesinowy należy do grupy nośników ciepła tzw. chłodziw. W stosunku do tradycyjnie stosowanych chłodziw posiada wiele zalet. Charakteryzuje się wyjątkowo

dużą właściwą wydajnością cieplną wynikającą z dużej wartości ciepła topnienia lodu, dużym efektywnym współczynnikiem przewodzenia ciepła, neutralnością wobec środowiska naturalnego. Dzięki wysokiej właściwej wydajności cieplnej istnieje możliwość wykorzystania go nie tylko jako nośnika ciepła, ale także jako medium akumulującego ciepło.

Lód zawieszinowy to mieszanina drobnych kryształków lodu z wodą i środkiem obniżającym temperaturę krzepnięcia wody, najczęściej z glikolem, alkoholem, rzadziej solami. Niewielkie rozmiary kryształków lodu i odpowiednio dobrane stężenie masowe lodu w roztworze powoduje, że zawiesina może być przepompowywana przez układy przewodów, podobnie jak faza ciekła, stając się nowym obiecującym nośnikiem zimna, stosowanym powszechnie w dużych pośrednich systemach chłodzenia (systemach klimatyzacyjnych w zakresie od -8°C do -2°C).

W porównaniu z innymi czynnikami pośredniczącymi lód zawieszinowy charakteryzuje się znacznie wyższymi wartościami współczynników wnikania ciepła. Wyższe wartości współczynnika wnikania ciepła można uzyskać, stosując zawiesinę lodową w 8–12% roztworze etanolu. Zawiesinę lodową cechuje też bardzo korzystna własność pod względem oporów przepływu, ponieważ zachowuje się jak płyn Bininghama. Jej cechą charakterystyczną jest przepływ całym przekrojem rurociągu z jednakową prędkością i niewystępowanie klasycznych postaci przepływu laminarnego czy turbulentnego. Przy prędkościach powyżej 2 m/s opory przepływu zawiesiny lodowej są znacząco mniejsze od oporów przepływu wody. Do innych zalet zawiesiny lodowej można zaliczyć też bardzo dużą pojemność cieplną nośnika i tym samym możliwość redukcji ilości masy w układzie i redukcję średnic rurociągów. Ważną cechą jest również możliwość akumulowania zimna w samym nośniku bez konieczności budowania zasobników zimna. Jest to też nośnik w pełni ekologiczny i obojętny dla środowiska naturalnego.

Stosowanie zawiesiny lodowej napotyka na trudności. Odczuwa się brak doświadczenia w projektowaniu wytwornic zawiesiny lodowej, systemu przewodów i instalacji, gdyż zawiesina lodowa okazuje się dość wrażliwa na rozdzielanie kryształków lodu od cieczy. Wadą jest też wysoki koszt wytworzenia.

Tabela 1

Porównanie możliwości chłodzenia za pomocą wody lodowej przy zmianie temperatury o t oraz za pomocą zawiesiny lodowej o udziale masowym lodu x_s , [8]

| | | | | | |
|----------------------|----|----|----|----|----|
| Δt_w [K] | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Δh_w [kJ/kg] | 8 | 17 | 25 | 33 | 42 |
| x_s [%] | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Δh_s [kJ/kg] | 17 | 33 | 50 | 67 | 83 |

Podsumowując, zasadniczymi zaletami lodu binarnego są: obojętność dla środowiska naturalnego, bardzo duża pojemność cieplna, która powoduje redukcję masy nośnika ciepła w układzie i w konsekwencji redukcję średnic rurociągów, oraz możliwość akumulowania zimna w samym nośniku ciepła, bez potrzeby budowania zasobników zimna.

Natomiast negatywne cechy lodu binarnego to: wysoki koszt wytwornic lodu binarnego (sama wytwornica kosztuje tyle co reszta instalacji), trudności projektowe systemu przewodów (nie można doprowadzić do rozdzielania cieczy i kryształków lodu), jak i również brak doświadczenia w stosowaniu tego nośnika ciepła (brak danych projektowych instalacji oraz wymienników ciepła).

Obszary zastosowań zawiesiny lodowej w Europie [8]

| Zastosowanie | Temperatury zawiesiny lodowej |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| Supermarkety | -6°C, ..., -2°C |
| Magazynowanie | -6°C, ..., -2°C |
| Rybołówstwo | -2°C |
| Procesy przemysłowe | -20°C, ..., -2°C |
| Mleczarnie | -2°C |
| Przemysł chemiczny i farmaceutyczny | -2°C |
| Klimatyzacja kopalń | -2°C |
| Układy chłodzenia na statkach pasażerskich | -6°C, ..., -2°C |
| Klimatyzacja | -2°C |
| Chłodzenie żywności przez bezpośredni kontakt | -30°C, ..., -15°C |
| Rolnictwo | -6°C, ..., -2°C |

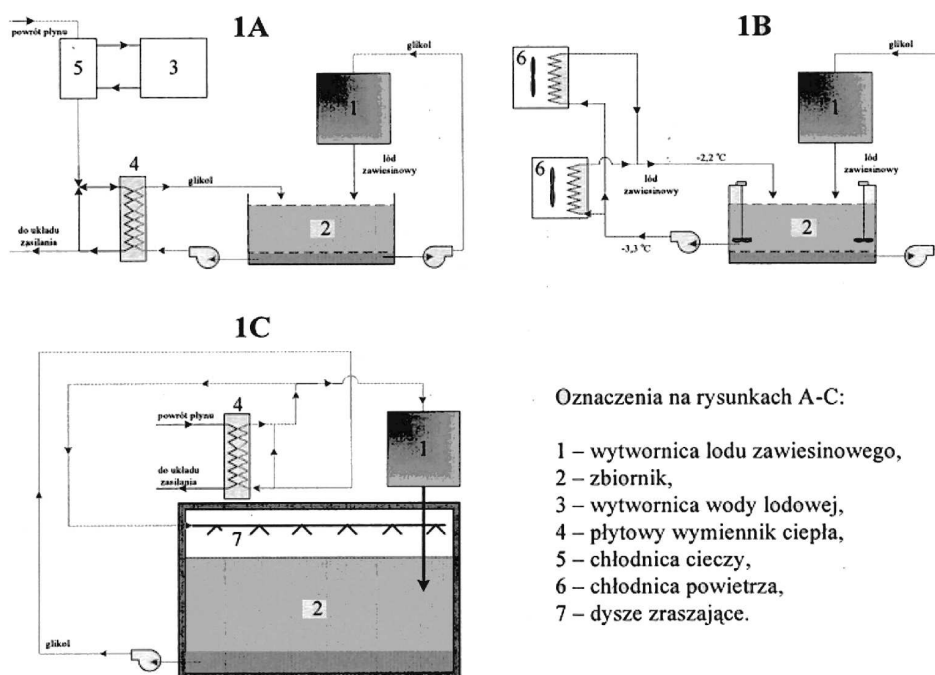
3. Współpraca ziębiarek absorpcyjnych z systemem akumulacji zimna w postaci zawiesiny lodowej

3.1. Cechy instalacji z zawiesiną lodową

Podstawową cechą instalacji z zawiesiną lodową jest możliwość skojarzenia jej z systemem akumulacji zimna. Pozwala to na ograniczenie szczytowej mocy urządzenia ziębniczego o 50–80%, redukcję o 80% napełnienia instalacji czynnikiem ziębniczym oraz wykorzystanie taryf nocnych i zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych o 25–50%. Wykorzystując zawiesinę lodową, można dwu-, trzykrotnie zmniejszyć pojemność akumulacyjnego zbiornika wodnego. Średnio około ośmiokrotnie większa właściwa wydajność cieplna zawiesiny lodowej w stosunku do tradycyjnych czynników pośredniczących umożliwi redukcję średnic rur oraz prędkości przepływu. Wpływa to na zmniejszenie kosztów instalacji oraz ograniczenie średnio do 12,5% zużycia energii związanej z transportem chłodziwa. W odróżnieniu od chłodziw konwencjonalnych, stała temperatura lodu zawiesinowego pozwala stosować mniejsze różnice temperatur czynników w wymiennikach oraz wymienniki o mniejszych powierzchniach wymiany ciepła. Dzięki prawie stałej temperaturze topnienia lodu osiągane są większe sprawności wymienników ciepła i można uzyskać niższą temperaturę medium chłodzonego. Zastosowanie zawiesiny lodowej w klimatyzacji pozwala na zmniejszenie temperatury powietrza pierwotnego, co umożliwia redukcję strumienia powietrza pierwotnego o ponad 40%. Mniejsze przekroje kanałów wentylacyjnych zmniejszają koszty wykonania instalacji powietrza. Dodatkowym efektem związanym z niższą temperaturą powietrza pierwotnego (7,2°C zamiast 13°C) są lepsze warunki komfortu cieplnego, dzięki obniżeniu wilgotności względnej z 60 do 35%. Efekty te mają wpływ na działanie układu regulacji, gdyż przy tym samym obciążeniu cieplnym obiektu możliwe są wyższe nastawy temperatury o ok. 1,5°C. W klimatyzacji stosuje się zawiesinę lodową o temperaturze – 2°C. Stosowanie akumulacji zimna w lodzie binarnym stwarza możliwość znacznego zmniejszenia mocy zainstalowanej w układzie klimatyzacyjnym. Na przykład klimatyzacja

komfortowa obiektu o maksymalnym obciążeniu cieplnym 300 kW zezwala, dzięki akumulacji zimna, na zainstalowanie układu o mocy zaledwie 75 kW. Zastosowanie lodu binarnego w klimatyzacji pozwala zredukować średnice rurociągów oraz powierzchnie chłodnic powietrza nawet o 50%.

Cechami eksploatacyjnymi instalacji z zawiesiną lodową są: możliwość eliminacji odszraniania elektrycznego (dzięki mniejszym różnicom temperatur w wymienniku – odszranianie naturalne), prosta regulacja (włączanie pompy współpracującej z wymiennikiem ciepła). Pewnym niebezpieczeństwem w stosowaniu tego chłodziwa jest możliwość zatykania się instalacji i nierównomierny rozdział czynnika (należy unikać zaworów trójdrożnych). Instalacje z zawiesiną lodową są dodatkowo wyposażone w pompy pomiędzy generatorem i zbiornikiem akumulacyjnym. Segregację lodu eliminuje się przez mieszadła o mocy 25–70 W/m³, co zwiększa zużycie energii elektrycznej. Uwzględniając jednak eliminację szronienia, ograniczenie mocy szczytowej urządzenia, zmniejszenie mocy pomp obiegowych, uzyskuje się istotnie niższe koszty eksploatacyjne instalacji z zawiesiną lodową. Znacznym ograniczeniem w stosowaniu tego medium jest wysoki koszt wytwornic zawiesiny.



Rys. 1. Układy chłodzenia z wykorzystaniem zawiesiny lodowej
Fig. 1. Secondary cooling systems with ice slurry for air conditioning

Na rysunku 1 przedstawiono trzy warianty wykonania układów chłodzenia z zawiesiną lodową. W poniższych rozwiązaniach lód zawiesinowy jest czynnikiem pośredniczącym lub pełni rolę medium akumulującego ciepło. Wytwornica lodu zawiesinowego przedstawiona na rysunku 1A może pracować w sposób ciągły (głównie w nocy) lub jest skojarzona z wytwornicą wody lodowej, obniżając temperaturę tej wody na za-

silaniu układu klimatyzacyjnego. Układy skojarzone charakteryzują się około 15% niższymi kosztami wytwarzania zimna w stosunku do innych rozwiązań z zawiesiną lodową. Rysunek 1B przedstawia układ chłodzenia z zawiesiną lodową wykorzystywany do zasilania dwóch niezależnych chłodziń powietrza w centralach klimatyzacyjnych. Natomiast rysunek 1C przedstawia układ, w którym glikol powracający do zbiornika akumulacyjnego schładzany jest wstępnie w dodatkowym, płytowym wymienniku ciepła, włączonym w układ chłodniczy wytwornicy lodu zawiesinowego.

3.2. Rozwiązania układów chłodzenia z akumulacją zimna

Zawiesinę lodową należy stosować w przypadku akumulacji dużych ilości energii, w układach chłodzenia o bardzo zróżnicowanych, w zakresie wartości i czasu trwania obciążeniach cieplnych, gdy oczekuje się wysokich, chwilowych strumieni ciepła odbieranych ze zbiornika akumulacyjnego.

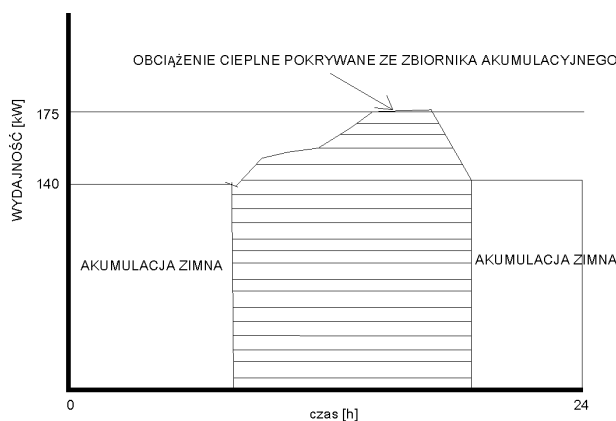
Pełna ocena kosztów inwestycyjnych układu chłodzenia z zawiesiną lodową powinna obejmować koszt: generatora zawiesiny lodowej wraz z układem chłodzenia, agregatu skraplającego, zbiornika akumulacyjnego, układu chłodzenia zbiornika akumulacyjno-obiekt.

Koszty eksploatacyjne dla układów z zawiesiną lodową obejmują, koszty energii elektrycznej związanej z pracą generatora zawiesiny lodowej, pracą pomp, mieszadeł zbiornika akumulacyjnego oraz pracą wentylatorów. Koszty eksploatacyjne determinowane są zużyciem energii elektrycznej przez generator zawiesiny lodowej oraz przyjętą strategię akumulacji zimna.

Stosuje się trzy strategie współpracy zbiornika akumulacyjnego i generatora zawiesiny lodowej:

3.2.1. Pełna akumulacja

W okresie maksymalnego obciążenia cieplnego całkowite zapotrzebowanie na zimno pokrywane jest ze zbiornika akumulacyjnego. Poza tym okresem generator zawiesiny lodowej ładuje zbiornik akumulacyjny oraz pokrywa ewentualne obciążenie cieplne obiektu. Ten system charakteryzuje się relatywnie dużymi kosztami inwestycyjnymi



Rys. 2. Pełna akumulacja zimna

Fig. 2. Full storage system

w zakresie generatora zawiesziny lodowej i zbiornika akumulacyjnego. Układ ten pozwala jednak na większe obniżenie kosztów energii elektrycznej w przypadku przesunięcia okresów maksymalnego obciążenia sieci elektrycznej. Pełna akumulacja jest szczególnie atrakcyjną strategią akumulacji, gdy okresy maksymalnych obciążeń są krótkie, a różnice w zapotrzebowaniu na zimno w okresie ładowania i rozładowania zbiornika akumulacyjnego są znaczne.

3.2.2. Częściowa akumulacja ze zrównoważonym obciążeniem

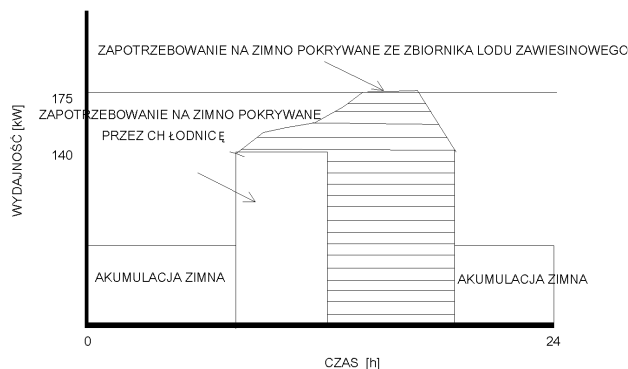
Generator zawiesziny lodowej pracuje przez cały czas trwania cyklu. W okresie maksymalnego obciążenia cieplnego, niedobór mocy chłodniczej generatora zawiesziny lodowej pokrywany jest z zasobnika. Ta strategia akumulacji minimalizuje koszty generatora oraz akumulatora przy mniejszych oszczędnościach w zakresie kosztów eksploatacyjnych w porównaniu z systemem pełnej akumulacji.



Rys. 3. Częściowa akumulacja zimna ze zrównoważonym obciążeniem
Fig. 3. Partial storage system with balanced load

3.2.3. Częściowa akumulacja z ograniczonym obciążeniem

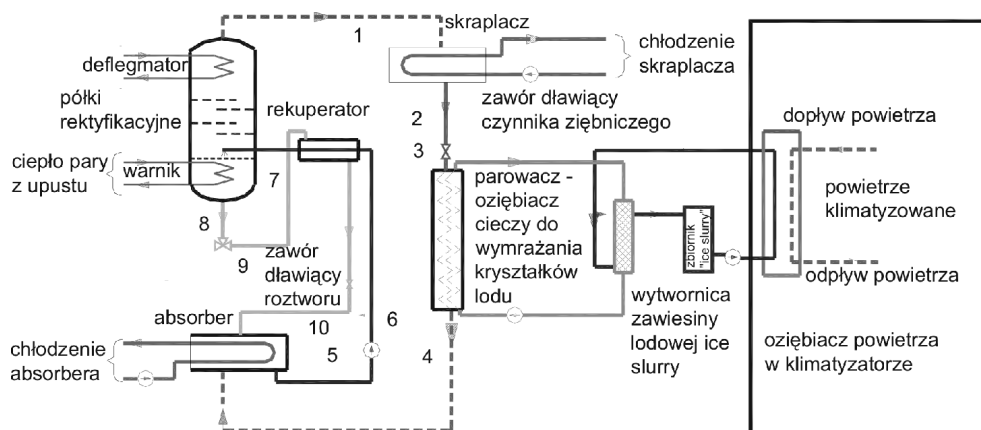
Ta strategia akumulacji łączy cechy dwóch poprzednich metod akumulacji zimna, lokując koszty inwestycyjne i koszty zużycia energii elektrycznej pomiędzy wartościami granicznymi wyznaczonymi dla wyżej opisanych systemów.



Rys. 4. Częściowa akumulacja zimna z ograniczonym obciążeniem
Fig. 4. Partial storage system with limited load

3.3. Ziębiarki absorpcyjne współpracujące z systemami akumulacji zimna

Obiekty z zakresu np. technologii produktów spożywczych, względnie inne wymagające klimatyzacji, charakteryzują się niekiedy dużymi wahaniami zysków ciepła lub innych obciążeń cieplnych w ciągu doby. Moc ziębienia określa się na podstawie maksimum obliczeniowych zysków ciepła (obciążenia cieplnego). Wykorzystanie zakumulowanego zimna w lodzie umożliwia zmniejszenie chwilowej wydajności ziębiarki i dzięki temu zmniejszenie kosztu inwestycyjnego sprężarki. Chwilowe nadwyżki zapotrzebowania zimna pokrywane są z zasobnika lodu gromadzonego w czasie dobowej eksploatacji ziębiarki ze średnią mocą ziębienia potrzebną do wytworzenia i zakumulowania odpowiedniej ilości lodu. Podstawową korzyścią ekonomiczną w ziębiarkach sprężarkowych może być więc wykorzystanie niższego kosztu energii elektrycznej w godzinach pozaszczytowych oraz niższy koszt inwestycyjny związany ze zmniejszoną wielkością agregatu ziębniczego. Systemy z akumulacją zimna mogą współdziałać również z ziębiarkami absorpcyjnymi.



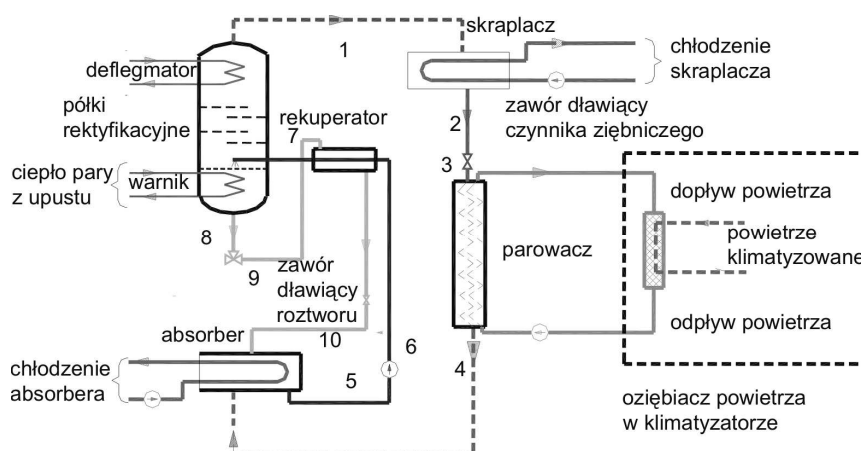
Rys. 5. Schemat ideowy ziębiarki absorpcyjnej do uzyskiwania zawiesiny lodowej wykorzystywanej do uzdatniania powietrza w klimatyzacji

Fig. 5. Schematic diagram of absorption chiller with ice slurry for air conditioning

Ziębiarka absorpcyjna z roztworem wodnym bromku litu zapewniająca temperaturę powyżej 0°C jest obecnie dominującym układem stosowanym w klimatyzacji komfortowej. Alternatywnym rozwiązaniem, które powinno być częściej wykorzystywane w instalacjach klimatyzacyjnych, przemysłowych, a także w instalacjach klimatyzacji komfortu, są ziębiarki absorpcyjne amoniakalne. Ich zaletą w porównaniu z ziębiarkami bromolitowymi, jest możliwość uzyskiwania ujemnych temperatur odparowania, a przez to możliwość stosowania akumulacji zimna w lodzie. Jednym ze sposobów akumulacji jest wytwarzanie zawiesiny lodowej w cieczy. W porównaniu z ziębiarką bromolitową można wymienić następujące korzyści stosowania ziębiarek absorpcyjnych amoniakalnych:

- temperatura czynnika pośredniczącego (zawiesiny lodowej) może wynosić 0°C , a przy zastosowaniu odpowiednich mieszanin nawet niżej, czego nie można uzyskać w ziębiarce bromolitowej,

- strumień masowy (i objętościowy) zawiesiny lodowej może być wielokrotnie mniejszy (przy takiej samej wydajności ziębienia) z powodu „ciepła utajonego” topnienia lodu wielokrotnie większego od właściwej pojemności cieplnej c_p wody, wykorzystywanej w ziębiarce bromolitowej, przy zmianie jej temperatury podczas przemianowania ciepła,
- pole powierzchni oziębiacza powietrza (chłodnicy powietrza w centrali klimatyzacyjnej) może być mniejsze dzięki stałej temperaturze zawiesiny lodowej, a więc większej średniej logarytmicznej różnicy temperatur wymiany ciepła.



Rys. 6. Schemat ideowy ziębiarki absorpcyjnej amoniakalnej współpracująca z klasycznym systemem chłodzenia pośredniego

Fig. 6. Schematic diagram of absorption chiller with secondary cooling system

3.4. Ziębiarka absorpcyjna współpracująca z systemem lód binarny – woda oziębianą

Analiza powyższego rozwiązania powinna opierać się na obliczeniu ilości zimna do zakumulowania w lodzie binarnym w czasie szczytowego obciążenia budynku. Na tej podstawie można obliczyć wymaganą ilość lodu zawiesinowego. W tym celu korzystamy z równania:

$$Q_l = m_{lb} q_{lb}$$

gdzie:

Q_l – ilość ciepła do zakumulowania [kW],

m_{lb} – strumień masowy lodu zawiesinowego [kg/s],

q_{lb} – jednostkowa pojemność cieplna zawiesiny lodowej [kJ/kg],

$$m_{lb} = \frac{Q_l}{q_{lb}}$$

Jednostkową pojemność cieplną zawiesiny lodowej obliczamy z zależności:

$$q_{lb} = q_c + q_l$$

gdzie:

q_l – jednostkowa pojemność cieplna lodu [kJ/kg],

q_c – jednostkowa pojemność cieplna roztworu glikolu [kJ/kg],

$$q_l = y \cdot r \cdot \rho_l \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$q_c = (1 - y) \cdot c_{gl} \cdot \Delta t \cdot \rho_{gl} \quad [\text{kJ/kg}]$$

gdzie:

- ρ_l – gęstość objętościowa lodu [kg/m^3],
- ρ_{gl} – gęstość objętościowa roztworu glikolu etylenowego [kg/m^3],
- c_{gl} – ciepło właściwe roztworu glikolu etylenowego [kJ/kgK],
- y – zawartość drobinek lodu w roztworze lodu binarnego [%],
- Δt – różnica temperatur zasilania i powrotu lodu binarnego [K].

W układzie należy zastosować wymiennik płytowy oddzielający od siebie obieg wody oziębianej i obieg z zawieszoną lodową z powodu nieprzystosowania chłodnicy w centrali klimatyzacyjnej do pracy z zawieszoną lodową oraz problemów z jej transportem w przewodach pionowych.

Wymagana ilość wody oziębianej jest obliczana z zależności:

$$V = \frac{Q}{c_w \cdot \Delta t_w \cdot \rho_w}$$

gdzie:

- Q – zapotrzebowanie zimna [kW],
- c_w – właściwa pojemność cieplna wody oziębianej [kJ/kgK],
- Δt_w – różnica temperatur wody na zasilaniu i powrocie wymiennika [K],
- ρ_w – gęstość objętościowa wody [kg/m^3].

Objętość zbiornika lodu zawieszinowego wyznaczamy z równania:

$$V_{zb} = \frac{Q_{zb}}{q_{lb}} \quad [\text{m}^3]$$

gdzie:

- Q_{zb} – ilość zimna do zakumulowania (całkowita ilość zimna pomniejszona o ilość zimna dostarczoną przez agregat) [kW].

Średnice rurociągów po stronie lodu zawieszinowego obliczamy z zależności przedstawionej poniżej:

$$d_w = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{lb}}{\pi \cdot w_{lb}}}$$

gdzie:

- d_w – średnica wewnętrzna rurociągu [m],
- V_{lb} – strumień objętościowy zawiesziny lodowej [m^3/s],
- w_{lb} – prędkość przepływu zawiesziny lodowej [m/s].

Określenie spadków ciśnienia w instalacji lodu zawieszinowego jest bardzo ważne z uwagi na dobór pompy w celu zapewnienia odpowiedniego przepływu medium by nie dochodziło do zbrylania lodu i zatykania przewodów.

Wyznaczenie oporów przepływu zawiesziny lodowej można dokonać z zależności:

$$\Delta p = c_f \cdot \frac{l}{d_w} \cdot \frac{\rho_{lb} \cdot w_{lb}^2}{2}$$

gdzie:

- Δp – opory przepływu zawiesiny lodowej na długości [Pa],
 d_w – średnica wewnętrzna rurociągu [m],
 l – długość rurociągu [m],
 ρ_{lb} – gęstość objętościowa zawiesiny lodowej [kg/m³],
 w_{lb} – prędkość przepływu zawiesiny lodowej wynikająca z dobranej średnicy rurociągu [m/s],
 c_f – współczynnik oporów Fanninga, w przypadku lodu binarnego zależy od liczby Reynoldsa (Re) oraz liczby Hedströma (He).

Liczby kryterialne Re i He wyznaczmy z następujących zależności:

$$Re_{lb} = \frac{w \cdot \rho_{lb} \cdot d_w}{\mu_p}$$

$$He_{lb} = \frac{d^2 \cdot \tau_p \cdot \rho_{lb}}{\mu_p^2}$$

gdzie:

- τ_p – graniczne naprężenie styczne [Pa],
 μ_p – dynamiczny współczynnik lepkości plastycznej [Pa s].

Są one wyznaczone empirycznie dla danej zawartości drobinek lodu w zawieszynie. Współczynnik oporów przepływu c_f określa natomiast równanie:

$$\frac{1}{Re_{lb}} = \frac{c_f}{16} \cdot \frac{He_{lb}}{6 Re_{lb}^2} + \frac{He_{lb}^4}{3 \cdot c_f^3 \cdot Re_{lb}^8}$$

3.5. Ziębiarka abstrakcyjna amoniakalna współpracująca z systemem akumulacji zimna w postaci zawiesiny lodowej – symulacja podstawowych procesów

Poniżej przedstawiono termodynamiczną symulację amoniakalnej ziębiarki absorpcyjnej współpracującej z systemem akumulacji zimna w postaci zawiesiny lodowej. W tym celu dla układu stworzono bilans energii i masy:

1. Zawór dławiący ziębnika

$$m_2 = m_3 = m_z$$

$$h_2 = h_3$$

2. Zawór dławiący roztworu ubogiego

$$m_8 = m_9 = m_{r,ub}$$

$$h_8 = h_9$$

3. Bilans dla parowacza

$$m_3 = m_4 = m_z$$

$$Q_{parowacza} = m_z (h_4 - h_3)$$

4. Bilans dla desorbera

$$m_7 = m_1 + m_8$$

$$m_7 x_7 = m_1 x_1 + m_8 x_8$$

$$Q_{\text{desorber}} = m_1 h_1 + m_8 h_8 - m_7 h_7$$

Strumień masowy roztworu uboższego:

$$m_8 = \frac{x_7 - x_1}{x_8 - x_7}$$

Strumień masowy roztworu bogatego:

$$m_7 = \frac{x_8 - x_1}{x_8 - x_7}$$

Liczbę cyrkulacji roztworu obliczono z zależności:

$$f = \frac{m_7}{m_1} = \frac{x_8 - x_1}{x_8 - x_7}$$

5. Procesy w absorberze

$$m_4 + m_{10} = m_5$$

$$Q_{\text{absorber}} = m_4 h_4 + m_{10} h_{10} - m_5 h_5$$

$$Q_{\text{absorber}} = (h_4 - h_{10}) + f (h_{10} - h_5)$$

6. Pompa roztworu bogatego

$$m_5 = m_6 = m_{r.bog}$$

$$\text{Moc pompy: } W_b = m_5 (h_6 - h_5)$$

7. Bilans skraplacza

$$m_1 = m_2 = m_z$$

$$Q_{\text{skraplacza}} = m_z (h_1 - h_2)$$

8. Wymiennik ciepła roztworów

$$m_9 + m_6 = m_7 + m_{10}$$

$$h_7 = h_6 + \frac{m_9}{m_6} (h_9 - h_{10})$$

4. Równania stanu do obliczania termodynamicznych własności roztworu amoniak–woda

Poprawne zaprojektowanie absorpcyjnego urządzenia ziębniczego dla zadanej wydajności i parametrów działania opiera się na dokładnym oszacowaniu własności termodynamicznych roztworu amoniak–woda w poszczególnych punktach obiektu.

Ze względu na uniknięcie długotrwałych obliczeń iteracyjnych do opisu własności termodynamicznych roztworu amoniak–woda zastosowano doświadczalne zależności zaproponowane przez Patka i Klomfara.

Zależności te mają postać:

$$T(p, x) = T_o \sum_i a_i (1-x)^{m_i} \left[\ln \left(\frac{p}{p_o} \right) \right]^{n_i} \quad (i = 1, \dots, 14)$$

$$T_o = 100 \text{ K}, \quad p_o = 2 \text{ MPa}$$

$$T(p, y) = T_o \sum_i a_i (1-y)^{\frac{m_i}{4}} \left[\ln \left(\frac{p_o}{p} \right) \right]^{n_i} \quad (i = 1, \dots, 17)$$

$$T_o = 1000 \text{ k}, \quad p_o = 2 \text{ MPa}$$

$$y(p, x) = 1 - \exp \left[\ln(1-x) \sum_i a_i \left(\frac{p}{p_o} \right)^{m_i} x^{\frac{n_i}{3}} \right] \quad (i = 1, \dots, 14)$$

$$p_o = 2 \text{ MPa}$$

$$h_l(T, x) = h_o \sum_i a_i \left(\frac{T}{T_o} - 1 \right)^{m_i} \cdot x^{n_i} \quad (i = 1, \dots, 16)$$

$$h_o = 1000 \text{ kJ/kg}, \quad T_o = 273,16 \text{ K}$$

$$h_g(T, y) = h_o \sum_i a_i \left(1 - \frac{T}{T_o} \right)^{m_i} \cdot (1-y)^{\frac{n_i}{4}} \quad (i = 1, \dots, 17)$$

$$h_o = 1000 \text{ kJ/kg}, \quad T_o = 324 \text{ K}$$

5. Wybór zmiennych *a priori* w obliczeniach obiegu absorpcyjnego

W przedstawionym algorytmie obliczeniowym absorpcyjnego obiegu ziębniczego liczba zmiennych niezależnych przewyższa liczbę równań wynikających z praw zachowania ilości substancji i energii. W związku z tym przyjęto jako znane wartości wybranych danych procesowych umożliwiające wyznaczenie wartości pozostałych zmiennych.

Są to następujące wielkości:

1. Temperatura pary zasilającej desorber: $t_g = 120^\circ\text{C}$.
2. Temperatura początkowa wody chłodzącej odbierająca ciepło skraplania: $t_c = 30^\circ\text{C}$.
3. Temperatura początkowa wody chłodzącej odbierająca ciepło absorpcji: $t_a = 25^\circ\text{C}$.
4. Temperatura czynnika oziębianego (glikolu) na dopływie do parowacza: $t_p = -5^\circ\text{C}$.
5. Temperatura zawiesiny lodowej $t_{zl} = -2^\circ\text{C}$.
6. Ciśnienie parowania $p_o = 4 \text{ atm}$.
7. Ciśnienie skraplania $p_k = 16 \text{ atm}$.
8. Wydajność ziębnicza ziębiarki absorpcyjnej w tradycyjnym systemie ziębnienia pośredniego $Q_o = 10 \text{ kW}$.

6. Porównanie ziębiarki abstrakcyjnej z instalacją do wytwarzania lodu zawiesinowego z ziębiarką absorpcyjną z tradycyjnym systemem ziębienia pośredniego

Systemy te różnią się pomiędzy sobą sposobem dostarczania zimna do chłodnicy centrali klimatyzacyjnej. Pierwszy z nich to ziębiarka absorpcyjna, współpracująca z wytwornicą lodu zawiesinowego, oraz drugi system, ziębiarka absorpcyjna wykorzystująca glikol jako chłodziwo pośredniczące.

Obydwie instalacje z uwagi na wykorzystywane medium w procesie transportu strumienia ciepła charakteryzują się różnymi cechami wynikającymi z właściwości cieplnych oraz hydraulicznych tychże substancji.

Dzięki zastosowaniu ziębiarki absorpcyjnej z akumulacją zimna w postaci zawiesiny lodowej uzyskano zmniejszenie mocy urządzenia ziębniczego prawie o 25%, co spowodowało zmniejszenie kosztów energii elektrycznej. Około ośmiokrotnie większa właściwa pojemność cieplna zawiesiny lodowej stosunku do glikolu umożliwiła redukcję średnic przewodów prawie dwukrotnie oraz zmniejszenie prędkości przepływu cieczy pośredniczącej w wymianie ciepła. Spowodowało to również zmniejszenie wymiarów pomp obiegowych po stronie lodu zawiesinowego. Stała temperatura zawiesiny lodowej pozwoliła stosować mniejsze różnice temperatur w wymiennikach ciepła, a w związku z tym wymienniki o większych powierzchniach wymiany ciepła. Dzięki stałej temperaturze topnienia lodu osiągnięto większe sprawności wymienników i uzyskano niższe temperatury medium chłodzonego.

7. Wnioski

Systemy z akumulacją zimna w lodzie zawiesinowym mogą współdziałać z ziębiarkami absorpcyjnymi. Wykorzystanie układu z zawiesiną lodową z akumulacją zimna powoduje obniżenie kosztów eksploatacyjnych nawet o 50% w stosunku do klasycznych systemów absorpcyjnych.

Zastosowanie zawiesiny lodowej w klimatyzacji umożliwia zmniejszenie temperatury powietrza pierwotnego, co umożliwia redukcję jego strumienia. Mniejsze przekroje kanałów wentylacyjnych zmniejszają koszty wykonania instalacji powietrza. Dodatkowym efektem związanym z niższą temperaturą powietrza pierwotnego są lepsze warunki komfortu cieplnego dzięki obniżeniu wilgotności względnej.

Przewaga zawiesiny lodowej w stosunku do czynników chłodniczych oraz innych nośników ciepła wynika również z neutralności wobec środowiska naturalnego, zerowego potencjału niszczenia warstwy ozonowej (ODP), zerowego potencjału efektu cieplarnianego (GWP) oraz możliwości wykorzystania zawiesiny lodowej nie tylko jako nośnika ciepła, ale także jako medium akumulującego zimno.

Literatura

- [1] Bellas I., Tassou S., *Present and future application of ice slurries*, International Journal of Refrigeration, No. 28, 2004, 115-121.
- [2] Egolf P.W., Kitanovski A., Ata-Caesar D., Stamatiou E., Kawaji M., Bedecarrats J.P., Strub F., *Thermodynamics and heat transfer of ice slurries*, International Journal of Refrigeration, No. 28, 2005, 51-59.
- [3] Egolf P.W., Kauffeld M., *From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications*, International Journal of Refrigeration, No. 28, 2005, 4-12.
- [4] Grandum S., Nakagomi K., *Characteristics of ice slurry containing antifreeze protein for ice storage applications*, Journal Thermophys. Heat Transfer, No. 11, 1997, 461-466.
- [5] Gulipart J., *Experimental study and calculation method of transport characteristics of ice slurries*, First Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, 1999, 74-82.
- [6] Jensen E., Christensen K., Hansen T., Schneider P., Kauffled M., *Pressure drop and heat transfer with ice slurry*, Purdue University, IIF/IIR, 2000, 521-529.
- [7] Knodel B.D., France D.M., *Pressure drop in ice – water slurries for thermal storage application*, Experimental Heat Transfer, No. 1, 1988, 265-275.
- [8] Niezgoda-Żelasko B., Zalewski W., Żelasko J., *Projektowanie pośrednich układów chłodzenia zasilanych zawiesiną lodową*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Klimatyzacja, Nr 11, 2007, 66-74.
- [9] Meewisse J.W., Ferreira C.A., *Optimal properties of ice slurries in secondary cooling systems*, Purdue University IIR/IIF, 2000, 513-520.
- [10] Pronk P., Hansen T.M., Infante-Ferreira C.A., Witkamp G.J., *Time – dependent behavior of different ice slurries during storage*, International Journal of Refrigeration, No. 28, 2005, 27-36.
- [11] Sikorska-Bączek R., *Klimatyzacja za pomocą urządzeń absorpcyjnych*, Chłodnictwo i Klimatyzacja, Nr 10, 2006, 77-8.