Zapobieganie powstawaniu osadów i strat energetycznych w instalacjach chłodniczych poprzez uzdatnianie wody zasilającej wymienniki ciepła

Preventing the formation of deposits and energy losses in refrigeration installations by treating water supplying heat exchangers

KRZYSZTOF KAISER, JAN MARJANOWSKI

DOI 10.36119/15.2024.7-8.2

W artykule omówiono wpływ osadów na poprawność działania wymienników ciepła oraz ich wpływ na aspekt energetyczny i straty eksploatacyjne z nimi związane. Zwrócono także uwagę na konieczność okresowego oczyszczania wymienników z osadów oraz zapewnienie właściwych parametrów wody stosowanej w układach chłodniczych. W artykule przedstawiono również metody uzdatniania wody dla układów chłodniczych.
Słowa kluczowe: wymiennik ciepła, skraplacz, osady i zanieczyszczenia, korozja, straty energetyczne

The article discusses the impact of deposits on the correct operation of heat exchangers and their impact on the energy aspect and operational losses associated with them. Attention was also paid to the need to periodically clean exchangers and ensure proper parameters of water used in cooling systems. The article also presents water treatment methods for refrigeration systems.
Keywords: heat exchanger, condenser, deposits and impurities, corrosion, energy losses

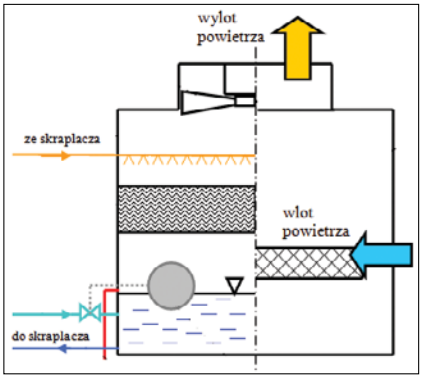
Wymienniki ciepła i wymiana ciepła

Nagrzewnice, chłodnice, skraplacze, parowniki i inne aparaty, w których zachodzi przenoszenie (przekazywanie) ciepła w wyniku przepływu dwóch mas o różnych temperaturach nazywa się wymiennikami ciepła. Wymienniki, które wymieniają ciepło przez przegrodę nazywane są rekuperatorami. Wymiana ciepła jest również realizowana w wieżach wyparnych, wentylatorowych chłodniach wieżowych, będących elementami w układach chłodzenia skraplaczy.

W zależności od wzajemnego położenia kierunków przepływu płynów wymieniających ciepło wymienniki dzielą się na współprądowe, przeciwprądowe, krzyżowe.

Konstrukcje wymienników ciepła są bardzo zróżnicowane. W instalacjach chłodniczych stosowane są m. in. wymienniki:

- płaszczowo – rurowe, składające się z trzech elementów zasadniczych, a mianowicie: obudowy zewnętrznej tzw. płaszcza, pęków rur w kształcie litery U lub rur prostych, króćców lub komór wlotowych i wylotowych;
- płytowe, składające się z szeregu płyt tworzących system wąskich szczelin i zwartą konstrukcję. Płyty oddzielone są od siebie uszczelnieniem;
- wężownicowe i spiralne;
- wieże wyparne i wentylatorowe chłodnie wieżowe (nazywane również mikroszczelinowymi chłodniami wentylatorowymi) – rys.1.



Rys.1
Wentylatorowa chłodnia wieżowa

Każdy wymiennik ciepła charakteryzuje się określoną mocą, czyli zdolnością przekazywania ciepła w czasie (strumienia ciepła). Moc przeponowych wymienników ciepła można obliczyć m. in. za pomocą następujących wzorów:

$$\dot{Q}_{N,CH} = \dot{m} \cdot \Delta i = \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta i = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot \Delta T_s \text{ [kW]} \quad (1)$$

gdzie:

ΔT – różnica temperatury na wejściu i wyjściu płynu z wymiennika [K]

ΔT_s – różnica temperatur płynów po obu stronach przegrody [K]

Δi – różnica entalpii na wejściu i wyjściu płynu z wymiennika [kJ/kg]

mgr inż. Krzysztof Kaiser, mgr inż. Jan Marjanowski – MARCOR. Adres do korespondencji/Corresponding author: Jan Marjanowski jm@marcor.com.pl

$\dot{m}$ – masowe natężenie przepływu płynu przez wymiennik [kg/s],
$\dot{V}$ – strumień objętości przepływu płynu przez wymiennik [m^3/s],
U – współczynnik przenikania ciepła [kW/(m^2K)],
A – powierzchnia wymiennika ciepła [m^2],
ρ – gęstość płynu [kg/m^3],
c – ciepło właściwe płynu [kJ/(kg·K)].

Współczynnik przenikania dla ścianek płaskich wymiennika wynosi:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{R_k} \qquad (2)$$

gdzie:
λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)],
δ – grubość ścianki [m],
R_k – opór przenikania ciepła [m^2K/W],
α_1 – współczynnik przejmowania ciepła po jednej stronie ścianki (np. po stronie wewnętrznej) [W/(m^2K)],
α_2 – współczynnik przejmowania ciepła po drugiej stronie ścianki (np. po stronie zewnętrznej) [W/(m^2K)].

Współczynnik przenikania ciepła dla ściany płaskiej *U* nazywany jest współczynnikiem Pecleta [12].

Przenikanie ciepła przez ściankę składa się z przejmowania ciepła przez płyn lub od płynu przez przegrodę stałą oraz z przewodzenia ciepła przez tę przegrodę, zatem można wykorzystać w obliczeniach transportu ciepła prawo Fouriera oraz prawo Newtona. Jeżeli ścianka płaska jednowarstwowa zostaje pokryta warstwą osadu, to wówczas zwiększa się jej opór cieplny przewodzenia, natomiast ścianka staje się ścianką dwuwarstwową. Każdą z warstw charakteryzuje inny współczynnik przewodzenia ciepła oraz grubość ścianki. W przypadku osadów tworzących się na powierzchni ścianki wymiennika ich grubość może być bardzo różna.

Nie we wszystkich jednak wymiennikach przenikanie ciepła zachodzi przez ściankę płaską. Przenikanie ciepła przez ściankę płaską dotyczy przede wszystkim wymienników płytowych. Do obliczenia przenikania ciepła przez ścianki cylindryczne (rury) konieczne jest zmodyfikowanie wzorów podstawowych. Poniżej przedstawiono wzór przenikania strumienia ciepła dla ścianki cylindrycznej jednowarstwowej, czyli rury bez izolacji [8]:

$$\dot{Q} = \pi \cdot L \cdot \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{\alpha_1 d_w} + \frac{\ln \frac{d_z}{d_w}}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha_2 d_z}} \qquad (3)$$

gdzie:
t_1 – temperatura płynu oddającego ciepło [K],
t_4 – temperatura płynu odbierającego ciepło [K],
L – długość rury [m].

Grubość przegrody, przez którą zachodzi wymiana ciepła, jest bardzo istotna w procesie przenikania ciepła i wpływa na opór cieplny przewodzenia. Z tego powodu w wymiennikach ciepła stosowane są rury cienkościenne, a występujące osady mają bardzo duże znaczenie, gdyż w znaczący sposób zwiększają opory cieplne przewodzenia. Ogólną zasadą w sprawnym działaniu wymienników ciepła jest ograniczanie przede wszystkim największego oporu cieplnego.

W przypadku np. skraplaczy, w których po jednej stronie skrapla się para, natomiast po drugiej stronie płynie woda chłodząca, α kondensacji jest doskonałe, a wody po drugiej stronie dobre, natomiast opór ścianki jest stosunkowo znaczny [7].

Należy zauważyć, (analogicznie, jak to jest dla ścianek płaskich jednowarstwowych), że ścianka cylindryczna jednowarstwowa typu rura, gdy zostaje pokryta warstwą osadów (np. kamienia) staje się ścianką cylindryczną dwuwarstwową.

W celu obliczenia strumienia ciepła przenikającego grubościenną dwuwarstwową przegrodę rurową np. rurę zakamienioną, rurę zanieczyszczoną osadami, rurę pokrytą izolacją termiczną, stosuje się wzór:

$$\dot{Q} = \pi \cdot L \cdot \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{\alpha_1 d_w} + \frac{\ln \frac{d'}{d_w}}{2 \cdot \lambda_1} + \frac{\ln \frac{d_z}{d'}}{2 \cdot \lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_z}} \qquad (4)$$

gdzie:
$\dot{Q}$ – strumień ciepła [W],
λ_1 – współczynnik przewodzenia ciepła wewnętrznej przegrody rurowej [W/(m·K)],
λ_2 – współczynnik przewodzenia ciepła zewnętrznej przegrody rurowej, np. izolacji termicznej [W/(m·K)],
d_w – średnica wewnętrzna rury wewnętrznej [m],
d' – średnica zewnętrzna rury wewnętrznej lub inaczej średnica wewnętrzna rury zewnętrznej (izolacji) [m],
d_z – średnica zewnętrzna rury zewnętrznej [m],
L – długość rury [m],
α_1 – współczynnik przejmowania ciepła od płynu przez ściankę np. tutaj przez wewnętrzną ściankę rury wewnętrznej [W/(m^2K)],
α_2 – współczynnik przejmowania ciepła przez płyn od ścianki np. tutaj od zewnętrznej ścianki rury zewnętrznej [W/(m^2K)].

W literaturze [18] typowe wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] zawierają się w granicach: 0,6 ÷ 2,6 dla kamienia kotłowego gipsowego, 0,15 ÷ 1,83 dla kamienia kotłowego wapniowego, 0,08 ÷ 0,27 dla kamienia kotłowego krzemionkowego.

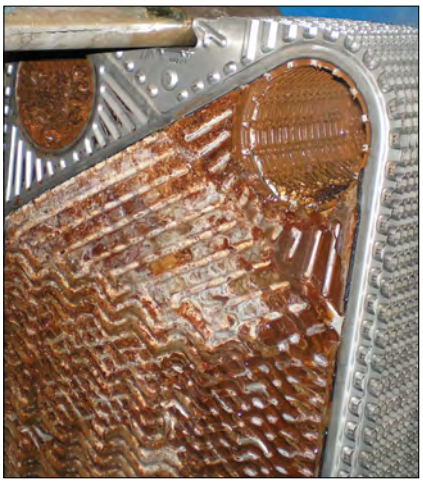
Dla porównania wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla metali wg [2, 5] wynoszą: aluminium 247 [W/(m·K)], miedź 483 [W/(m·K)], nikiel 158 [W/(m·K)], srebro 450 [W/(m·K)]. Obecnie nadal trwają badania nad oporami cieplnymi osadów. Jak więc można zauważyć w rzeczywistych warunkach działania urządzenia konieczna jest znajomość składu chemicznego substancji omywającej wymiennik i jej stężenia po to, aby móc odpowiednio przeciwdziałać powstawaniu osadów. W warunkach eksploatacyjnych substancje osadotwórcze nie występują na ogół pojedynczo, zatem trudno jest określić dokładną wartość współczynnika przewodzenia ciepła.

Równie trudne jest ustalenie grubości warstwy osadu, jak i nierównomierności jego rozkładu na powierzchni wymiany ciepła. Wpływ na to może mieć wiele czynników, m.in. sama konstrukcja wymiennika, kształt powierzchni wymiany ciepła, powłoka ochronna, materiał z którego wykonany jest wymiennik, prędkość przepływu płynu i jego ewentualne zawirowania oraz zmiany temperatury.

Wpływ występowania osadów (zanieczyszczenia, zakamienienia) na działanie wymiennika ciepła

Na rys. 2 przedstawiono płytowy wymiennik ciepła, na którego powierzchniach wymiany ciepła osadził się kamień. Problemy eksploatacyjne w wymiennikach ciepła stwarzają nie tylko zanieczyszczenia w postaci osadów mineralnych, ale również w postaci osadów biologicznych [22].

Zarówno jedne jak i drugie osady przyczyniają się do wzrostu oporów przepływu płynu, prowadzą do zatykania się rur i powierzchni przepływu płynu, zmniejszają skuteczność wymiany ciepła,. W skrajnych przypadkach powodują całkowite zatkanie się powierzchni przepły-



Rys.2
Zakamienienie płytowego wymiennika ciepła

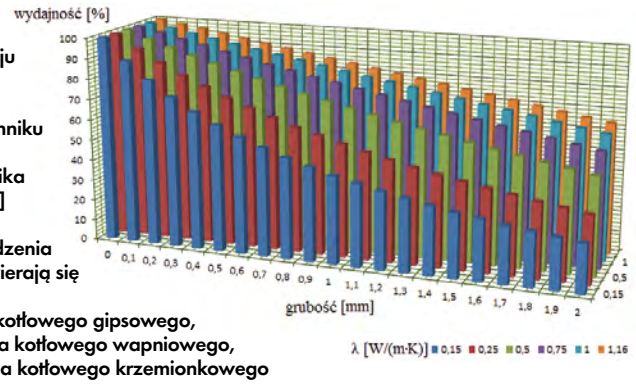
wu płynu. Ponadto, w zależności od rodzaju substancji istnieje również ryzyko przyspieszonej degradacji materiału konstrukcyjnego, w tym przyspieszenia procesów korozyjnych. Chropowatość osadów ma również wpływ na proces wnikania ciepła. W instalacjach chłodniczych powstające osady są częstą przyczyną zmian w parametrach pracy instalacji i tak, np. zanieczyszczenie powierzchni skraplacza chłodzonego wodą, na skutek utrudnionej wymiany ciepła, powoduje wzrost temperatury czynnika chłodniczego przepływającego przez skraplacz, a w konsekwencji również powoduje wzrost ciśnienia skraplania, co ostatecznie nie tylko pogarsza warunki pracy, ale również może być przyczyną występowania sytuacji awaryjnych (zadziałanie presostatu wysokiego ciśnienia), a nawet być przyczyną rozszczelnienia i uszkodzenia instalacji, a tym samym wydostania się czynnika chłodniczego do atmosfery.

W przypadku chłodnic lub nagrzewnic wodnych, pierwszym objawem, wykazującym występowanie zanieczyszczenia wymiennika jest z reguły całkowite otwieranie się zaworu regulacyjnego przy jednoczesnym braku mocy chłodniczej lub cieplnej. W skrajnych przypadkach dochodzi do wyłączenia instalacji, spowodowanego zadziałaniem zabezpieczeń przeciw zamrożeniowych. Twarde osady mogą być również przyczyną uszkodzeń elementów hydraulicznych automatyki wymienników ciepła [9]. Zanieczyszczenia wymienników ciepła są zatem przyczyną niestabilnej pracy układu i zwiększonej awaryjności. Problemy związane z występowaniem osadów są szczególnie zauważalne w układach wentylatorowych chłodni wieżowych. Temperatura wody w wentylatorowych chłodniach wieżowych w okresie lata jest dosyć wysoka, co w połączeniu z pozostałymi czynnikami wzmaga procesy korozyjne. Na okres zimy, ze względu na ryzyko zamarznięcia, upuszcza się wodę z wentylatorowych chłodni wieżowych, co ułatwia bezpośredni kontakt wewnętrznych powierzchni elementów – dotąd zalanych wodą – z powietrzem zawierającym tlen. Po sezonie zimowym następuje ponowne napełnienie układu świeżą wodą. Niestety taka sytuacja wzmaga procesy korozji elementów stalowych. W okresie czyszczenia instalacji ślady korozji zauważalne są gołym okiem w postaci drobnych łusek rdzy, które osiadają w dyszach rozpylających znajdujących się w wieżach chłodniczych oraz na filtrach wodnych [9]. Jeżeli nie wykona się oczyszczenia tych elementów, to przepływ wody w instalacji zostanie utrudniony nawet do tego stopnia, że eksploatowanie układu chłodniczego nie będzie możliwe.

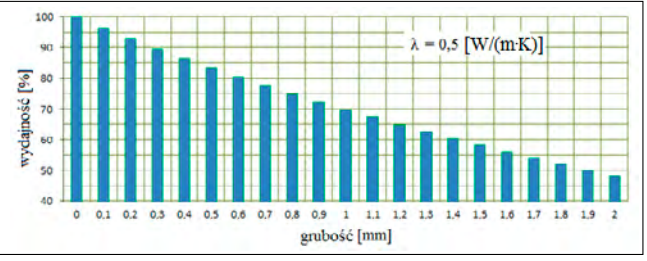
Niezależnie od rodzaju wymiennika ciepła, w którym występują osady i zanieczyszczenia, należy liczyć się ze zwiększonymi kosztami energetycznymi w porównaniu z instalacjami, w których osady i zanieczyszczenia są usuwane, a wymienniki mają czyste powierzchnie wymiany ciepła. Straty energetyczne w instalacjach zanieczyszczonych spowodowane są koniecznością wydłużonego czasu pracy np. sprężarek, pomp, wentylatorów.

Na rys. 2 i rys. 3 przedstawiono wpływ osadów na wydajność wymiennika ciepła. W obliczeniach wykorzystano wzory 3 i 4 dla wymiennika przeponowego wykonanego z rurek cylindrycznych. Wydajność cieplna 100% dotyczy wymiennika bez osadów. Jako zmienne przyjęto grubość osadu oraz współczynnik przewodzenia ciepła. Jak można zauważyć, im grubsza warstwa osadów na powierzchni wymiennika, tym mniejsza jego wydajność cieplna.

Na podstawie powyższych rozważań można przewidzieć, że dla utrzymania początkowej wydajności cieplnej wymiennika przy zanieczyszczonej jego powierzchni konieczne będzie podjęcie działań, których skutkiem będzie zwiększenie zużycia energii (np. zmiana parametrów pracy, natężenia przepływu płynu, wydłużenie czasu pracy silników elektrycznych pomp). Reasumując: obniżenie wydajności cieplnej spowodowanej zanieczyszczeniem powierzchni wymiennika ściśle koreluje ze stratami energetycznymi, powstającymi z uwagi na konieczność wprowadzania dodatkowej energii niezbędnej do utrzymania wartości początkowej wydajności cieplnej wymiennika. Korzystając z rys. 2 i 3 można analogicznie przewidywać, jakie będą straty wydajności cieplnej wymiennika zanieczyszczonego i jak zanieczyszczenia powierzchni wpłyną na zużycie energii koniecznej do zapewnienia wydajności początkowej dla czystego wymiennika. Na rys. 4 i rys. 5 przedstawiono przewidywane straty energetyczne związane z występowaniem osadów w wymiennikach ciepła oraz przewidywany, szacunkowy wzrost zużycia energii. Na przedstawionym wykresie przyjęto, że dla wymiennika bez osadów straty nie występują i w odniesieniu właśnie do takiego wymiennika, przedstawiono straty energetyczne dla pozostałych przypadków. Zużycie energii 100% oznacza wartość niezbędną dla zapewnienia



Rys.2
Wpływ grubości i rodzaju osadu (kamienia, zanieczyszczenia) o określonym współczynniku przewodzenia ciepła λ na wydajność wymiennika ciepła. W literaturze [18] typowe wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] zawierają się w granicach:
0,6 ÷ 2,6 dla kamienia kotłowego gipsowego,
0,15 ÷ 1,83 dla kamienia kotłowego wapniowego,
0,08 ÷ 0,27 dla kamienia kotłowego krzemionkowego



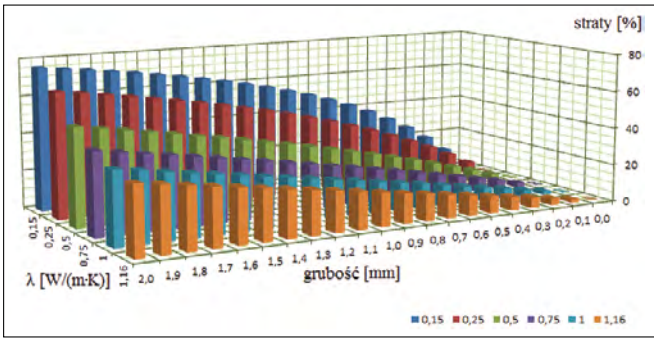
Rys.3
Wpływ grubości osadu (kamienia, zanieczyszczenia) o współczynniku przewodzenia ciepła λ = 0,5 [W/(m·K)] na wydajność wymiennika ciepła

działania wymiennika bez osadów. W rzeczywistych warunkach pracy wartości te mogą różnić się z uwagi na dynamikę zachodzących procesów oraz różny skład chemiczny osadów i zanieczyszczeń, jednak wykresy te wyraźnie wskazują, jak duże znaczenie eksploatacyjne ma czystość wymienników ciepła, zarówno w aspekcie poprawności działania, jak również w aspekcie występowania strat energetycznych, a tym samym wzrostu kosztów eksploatacyjnych.

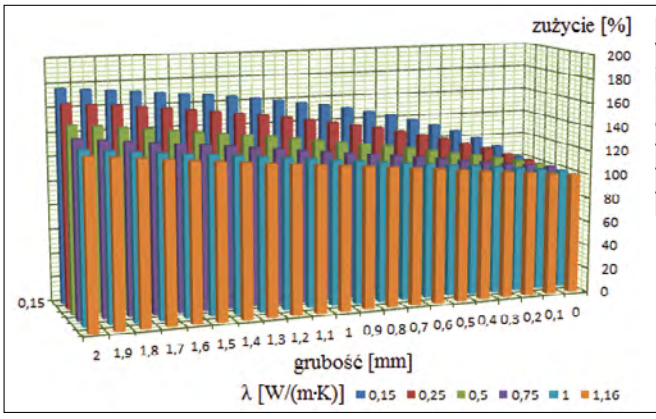
osadów oraz grubości powstałej z nich warstwy.

Prowadząc badania [20] wykazano, że pięciokrotny wzrost grubości warstwy osadu o współczynniku 0,5 [W/(m·K)] prowadzi do zmniejszenia sprawności cieplnej wymiennika o 47%.

Istotnym elementem w procesie eksploatacji wymienników ciepła jest zatem odpowiednie przygotowanie wody chłodzącej, np. wody chłodzącej skraplacz, w taki sposób, aby zmniejszyć ryzyko



Rys.4 Straty energetyczne spowodowane występowaniem osadów w wymienniku ciepła w zależności od ich grubości oraz ich współczynnika przewodzenia ciepła λ



Rys.5 Wpływ grubości i rodzaju osadu (kamienia, zanieczyszczenia) o określonym współczynniku przewodzenia ciepła λ na wzrost zużycia energii

Powyższe rozważania są czysto teoretyczne, oparte na powszechnie znanych zależnościach wymiany ciepła dla wymienników przeponowych. Niestety, dokładne obliczenia dotyczące rzeczywistych warunków pracy wymienników i wpływu zanieczyszczenia ich powierzchni na wydajność cieplną zależą od wielu zmiennych, dlatego w tym zakresie wciąż realizowane są prace badawcze.

Jedną z metod obliczeniowych oceny działania wymiennika jest metoda efektywności NTU opracowana przez Kaysa i Londona [3, 6], którzy to zdefiniowali bezwymiarowy parametr zwany efektywnością wymiennika ciepła, będący stosunkiem aktualnej rzeczywistej wydajności wymiany ciepła do maksymalnej możliwej wydajności wymiany ciepła. Tak więc efektywność wymiennika jest stosunkiem dwóch mocy cieplnych: aktualnej i możliwej – maksymalnej [9]. Zatem rzeczywista efektywność wymiennika ciepła, na którym pojawiły się osady, zależy od rodzaju

występowania osadów oraz procesów korozyjnych na powierzchniach wymiany ciepła.

Wymagania dla wody chłodzącej

Odczyn wody chłodzącej jest jednym z decydujących czynników wpływających na szybkość korozji, dlatego woda ta powinna wykazywać właściwości lekko alkaliczne, tzn. mieć pH = 8,3 ÷ 10 [1]. Korozja (*łac. corrosio – zżeranie*) to proces niszczenia (chemicznego lub elektro-chemicznego) metali lub ich stopów oraz tworzyw niemetalowych. Korozja zachodzi na skutek reakcji chemicznych, elektrochemicznych lub biologicznych.

Intensywność korozji elektrochemicznej zwiększa obecność soli w wodzie chłodzącej. Wśród substancji rozpuszczonych bardzo niebezpieczne są głównie siarczany i chlorki. Są to związki intensyfikujące korozyjny charakter wody w stosunku do metali. Ponadto siarczany mogą być powodem niszczenia betonowych elementów układu chłodniczego, którymi są np. zbiorniki akumulacyjne wody lodowej.

Głównym powodem wytrącania się osadów chemicznych na powierzchniach wymiany ciepła jest twardość węglanowa wody oraz nadmierne jej zasolenie . Głównym składnikiem osadów jest węglan wapniowy, który powstaje w wyniku rozkładu wodorowęglanu wapniowego zgodnie z reakcją:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + CO_2\uparrow + H_2O \qquad (5)$$

W przypadku soli odwrotnie rozpuszczalnych w stosunku do temperatury, takich jak węglan wapnia $CaCO_3$ występujący w formie kalcytu, wytrącanie się soli z roztworu wodnego na ściankach aparatów, może prowadzić do wzrostu kryształów kalcytu na ogrzanych powierzchniach [16].

Podczas ogrzewania wody nierozpuszczalne węglany gromadzą się jako szlam lub kamień wodny (kamień węglanowy).

Do utrzymania w roztworze $Ca(HCO_3)_2$ konieczna jest obecność określonej ilości CO_2. Wzrost temperatury wody chłodzącej z jednej strony powoduje zmniejszenie rozpuszczalności dwutlenku węgla w wodzie, a więc zmniejszenie jego stężenia, a z drugiej zwiększa wymaganą ilość CO_2 niezbędną do zapobiegania wytrącaniu się $CaCO_3$. Zachodzące zmiany powodują rozpad $Ca(HCO_3)_2$ i ostatecznie wytrącanie $CaCO_3$ w postaci osadu krystalicznego lub bezpostaciowego tworzącego obrosty na ściankach lub zwiększającego mętność wody [13].

W tab. 1 i 2 przedstawiono wymagania dla wody chłodzącej w obiegach przemysłowych.

Dopuszczalne wskaźniki zanieczyszczenia wody chłodzącej powinny zapewnić spełnienie następujących warunków [10]:

- uniknięcie wytrącania osadów, mułu i kamienia na ochładzanych elementach urządzeń,
- ograniczenie do minimum korozji metalowych części urządzeń,
- zmniejszenie stopnia niszczenia niemetalowych tworzyw stykających się z wodą chłodzącą.

Wiodący producenci wymienników ciepła przedstawiają wymagania stawiane wodzie przeznaczonej do celów chłodniczych pracujących z ich aparatami. Wymagania te w znacznej mierze zależą od rodzaju zastosowanego materiału konstrukcyjnego i warunków środowiska pracy.

Tab.1 Wymagania dla wody chłodzącej w obiegach przemysłowych na podstawie [4, 17, 19]

Wymagania	Jednostka	Obieg otwarty	Obieg cyrkulacyjny otwarty
Twardość ogólna	mval/dm^3	do 18	do 28,5
Odczyn pH	-	7,2 – 9,5	7,2 – 9,2
Twardość węglanowa	mval/dm^3	2,8 – 5,4	1,4 – 5,4
Zawartość wolnego CO_2	mg/dm^3	do 20	do 30
Zawartość zawiesin	mg/dm^3	ograniczona[1)]	
Zawartość chlorków Cl^-	mg/dm^3	do 1000 *(w obiegu zamkniętym <300 [4, 17])*	
Zawartość siarczanów SO_4^{2-}	mg/dm^3	-	do 150[2)]
Zawartość żelaza Fe^{2+} i Fe^{3+}	mg/dm^3	do 1,0	
Zawartość manganu Mn^{2+}	mg/dm^3	do 0,15	
Zawartość oleju	mg/dm^3	0	
Ogólna zawartość soli	mg/dm^3	do 3000	
Zawartość wolnego chloru Cl_2	mg/dm^3	0,1 – 0,5 przy chlorowaniu ciągłym, 4 – 8 przy chlorowaniu dawkami uderzeniowymi	
Rozwój glonów i mikroorganizmów	-	niedopuszczalny	
Zawartość zawiesin wg [4, 17]	jak najmniejsza		

1) poniżej 20 mg/dm^3, jeżeli nie można utrzymać zadanego poziomu zawiesin, należy stosować filtrację bocznikową
2) wg innych źródeł do 450 mg/dm^3
3) 1 mval/l = 28 mg CaO/l

Tab.2 Wymagania stawiane wodzie chłodzącej wg VDI 3803 [21]

Wskaźnik jakości wody	Jednostka	Materiał mający kontakt z wodą		
		Stal węglowa i metale kolorowe[1)]	Stal węglowa, inne metale powlekane	Tworzywa sztuczne, stal Cr-Ni-Mo
Wymagania ogólne		woda klarowna, bezbarwna, bez zawiesin		
Odczyn pH[2)]	-	7,5 – 8,5		
Ogólne zasolenie	mg/l	< 1800	< 2100	< 2500
Przewodnictwo elektryczne	µS/cm	< 2200	< 2500	< 3000
Wapń	mg/l	> 20		
Twardość węglanowa	°dH	< 4		
Twardość węglanowa przy stabilizacji chemicznej[3)]	°dH	< 20		
Chlorki[4)]	mg/l	< 200	< 250	< 400
Siarczany[4)]	mg/l	< 325	< 400	< 600
Utlenialność ($KMnO_4$)	mg/l	< 100		
Liczba bakterii w 1 ml	-	możliwe < 10000[5)]		

1) instalacja mieszana
2) przy stosowaniu chemikaliów kondycjonujących optymalna wartość pH może leżeć poza podanym zakresem
3) stabilizacja przy użyciu fosforanów organicznych i środków dyspergujących, w zależności od działania stabilizującego możliwe również wyższe stężenie
4) przy stosowaniu inhibitorów dopuszczalne są w szczególnych przypadkach wyższe stężenia (zalecana kontrola korozyjności)
5) w razie wzrostu liczby bakterii ponad 100000 jtk/ml konieczne jest stosowanie biocydu (dawki uderzeniowe)

Eksploatacja otwartych instalacji wodnych wymaga szczególnej uwagi ze względu na kontakt nośnika ciepła z powietrzem zawierającym tlen, zanieczyszczenia stałe i biologiczne oraz nieznaczne ilości gazów takich, jak np. dwutlenek węgla, a więc substancje, które mogą być przyczyną intensyfikowania procesów korozyjnych i osadotwórczych.

Przyczyny zanieczyszczeń skraplaczy wyparnych w chłodnictwie

Skraplacze wyparne, wieże wyparne typu „otwartego" oraz wentylatorowe chłodnie wieżowe wykorzystują zjawisko wymiany ciepła pomiędzy opadającą wodą, a przepływającym powietrzem. Przepływ powietrza realizowany jest najczęściej w przeciwprądzie, czyli z dołu do góry.

Woda w obiegu skraplacza , w wyniku wymiany ciepła pomiędzy ośrodkami, schładza się o kilka stopni Celsjusza, tym samym ochładzając rurki wężownicy skraplacza amoniaku, wskutek odparowania wody z obiegu wodnego. W przypadku wieży chłodniczej schłodzona woda stanowi medium schładzające produkt, czy też poprzez wymiennik ciepła oddziałuje na inne zachodzące w układzie procesy. W każdym z tych przypadków dochodzi do odparowania z obiegu pewnej ilości wody, co w konsekwencji powoduje wzrost stężenia rozpuszczonych w wodzie składników mineralnych (zatężanie). W wyniku zatężania składników mineralnych może dochodzić do wytrącania się z wody obiegowej osadów, przede wszystkim soli wapnia. Wytrącone sole stanowią wówczas kamień wodny analogiczny do kamienia kotłowego (węglan wapnia).

Negatywne zjawiska, jakie można zaobserwować w skraplaczach, wieżach wyparnych oraz wentylatorowych chłodniach wieżowych związane są z:

- wytrącaniem się mineralnych osadów kamienia wodnego,
- wytrącaniem się organicznych osadów, w tym glonów,
- korozją konstrukcji metalowych, a w szczególności korozją ocynkowanych zabezpieczeń blach, stalowych belek i rur wymiennika ciepła w skraplaczach.

Jednym z podstawowych problemów eksploatacji skraplaczy, wież natryskowo – wyparnych oraz wentylatorowych chłodni wieżowych jest zarastanie osadami kamienia wodnego, wytrąconego z wody obiegowej cyrkulującej w układzie, zewnętrznych powierzchni wymiany ciepła skraplaczy, wież wyparnych i wentylatorowych chłodni wieżowych.

Zjawisko zanieczyszczania osadami ścian i elementów grzejnych oraz elementów rozbryzgowych i demisterów powstaje w efekcie uzupełniania obiegów wodnych wodą surową, nieuzdatnioną, dostarczaną bezpośrednio ze studni lub z wodociągu, szczególnie w przypadku, gdy twardość tej wody jest wyższa od 2,8 mval/dm^3. Obserwuje się wówczas systematyczne wypadanie trudno rozpuszczalnego osadu węglanu wapnia $CaCO_3$ na ciepłych rurkach skraplacza, zgodnie z reakcją:

$$Ca^{2+} + 2(HCO_3)^- = CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2\uparrow \qquad (6)$$

W wodzie, w której występują w znacznej ilości siarczany, w wyniku reakcji z zawartymi w niej również związkami wapnia, może w pewnych przypadkach dochodzić do wytrącania się gipsu, tj. dwuwodnego siarczanu wapnia w formie osadu:

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2\,H_2O = CaSO_4 \times 2\,H_2O\downarrow \qquad (7)$$

Powstała na powierzchniach wymienników warstwa osadu działa niekorzystnie na ich prawidłowe działanie i odpowiada za występowanie wielu problemów eksploatacyjnych w systemach chłodniczych, w tym przede wszystkim odpowiedzialna jest za:

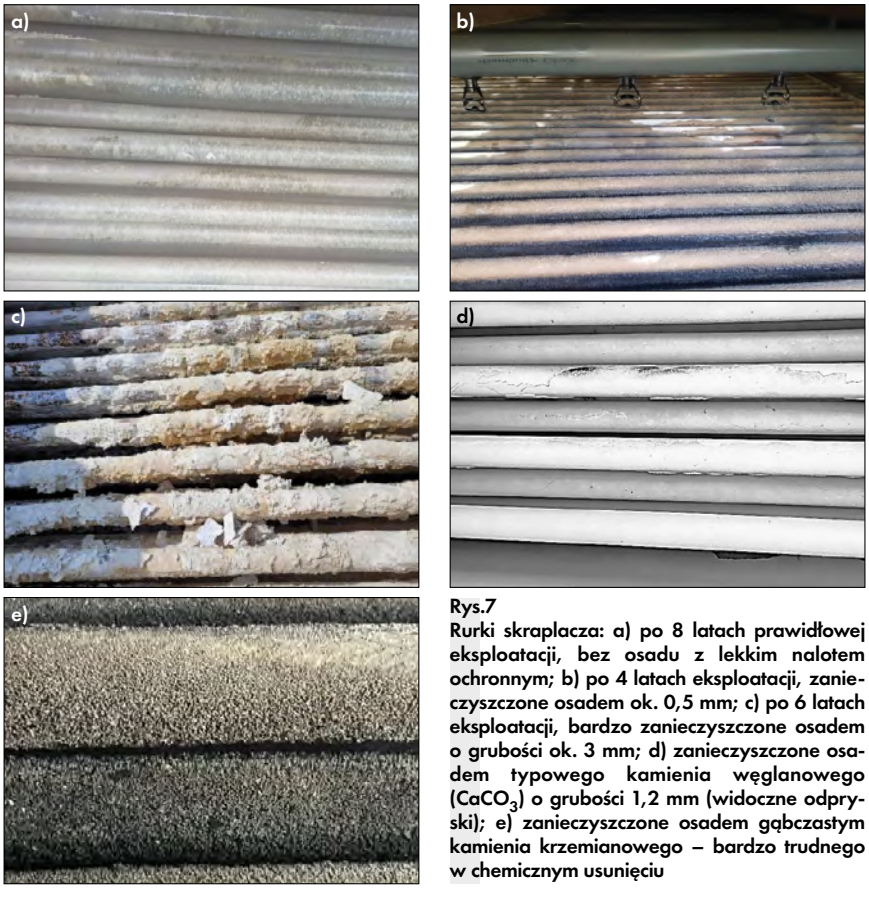
- wyższą niż obliczeniowa temperaturę skraplania amoniaku (lub innego zastosowanego w układzie czynnika chłodniczego),
- wysokie ciśnienie amoniaku w układzie (lub innego zastosowanego w układzie czynnika chłodniczego w układzie),

- zwiększone zużycie energii elektrycznej niezbędnej do zasilania wentylatorów, pomp wodnych i sprężarek.

Na rys.6 przedstawiono baterię wyparnych skraplaczy amoniaku, natomiast na rys.7 przedstawiono różne formy osadów kamienia wodnego w skraplaczach. Formy przybierane przez osady zależą od składu chemicznego wody i stopnia odsalania oraz stosowanych antyskalantów.

Osady powstające na rurkach skraplaczy w konsekwencji są powodem problemów eksploatacyjnych. Mając na uwadze ten fakt należy przedsięwziąć odpowiednie kroki zapobiegawcze, zatem, aby na rurkach skraplaczy, wewnątrz których znajduje się ciepły amoniak, nie pojawiał się osad kamienia wodnego, nie następował wzrost procesów korozyjnych ocynkowanych powierzchni oraz rur stalowych po utracie cynkowej powłoki ochronnej, należy monitorować wodę w obiegu pod względem fizykochemicznym.

Rys.6
Bateria wyparnych skraplaczy amoniaku

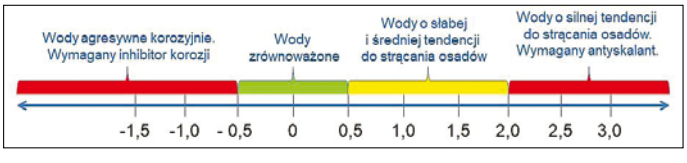


Rys.7
Rurki skraplacza: a) po 8 latach prawidłowej eksploatacji, bez osadu z lekkim nalotem ochronnym; b) po 4 latach eksploatacji, zanieczyszczone osadem ok. 0,5 mm; c) po 6 latach eksploatacji, bardzo zanieczyszczone osadem o grubości ok. 3 mm; d) zanieczyszczone osadem typowego kamienia węglanowego ($CaCO_3$) o grubości 1,2 mm (widoczne odpryski); e) zanieczyszczone osadem gąbczastym kamienia krzemianowego – bardzo trudnego w chemicznym usunięciu

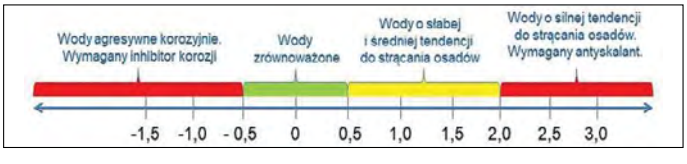
Do oceny jakości wody w chłodnictwie najczęściej znajdują zastosowanie trzy indeksy, a mianowicie:

– indeks stabilności Langeliera (ang. LSI) – na jego podstawie można oszacować, jak duża istnieje w układzie tendencja do wytrącania osadów węglanów wapnia i magnezu (kamień wodny). Przyjęte za optymalne wartości indeksu Langeliera mieszczą się w zakresie od –0,5 do 0,5. Przyjmuje się również, że w tym zakresie wytrącanie osadów w ogóle nie zachodzi. Zakres indeksu od 0,5 do 2,0 określa się jako obszar słabego strącania osadów i warunkowo dopuszcza się pracę układu chłodzenia w takim zakresie. Natomiast, dla wartości indeksu przekraczających 2,0 występuje proces szybkiego wytrącania dużych ilości osadów: węglanów wapnia i magnezu, mogących prowadzić do całkowitego zarastania powierzchni wymiany ciepła. Praca układu chłodzenia dla tych wartości indeksu jest niezalecana, a przy bardzo wysokich wartościach powinna być niedopuszczalna. Indeks stabilności Langeliera przedstawiono graficznie na rys.8.
– indeks nasycenia kalcytem (ang. CSI) – czyli wskaźnik określający potencjał do wytrącania kalcytu (podstawowej formy krystalicznej węglanu wapnia – $CaCO_3$) z badanej wody. Jest on wyrażany jako stosunek iloczynu aktywności jonów wapniowych i węglanowych do iloczynu rozpuszczalności kalcytu. Wartości powyżej 1,0 wskazują na tendencje do wytrącania się kalcytu na powierzchni stali, natomiast poniżej 1,0 informują o skłonności wody do rozpuszczania osadów kalcytu. Zakres skutecznego działania antyskalantów często jest limitowany dopuszczalną górną granicą CSI. Indeks nasycenia kalcytem przedstawiono graficznie na rys.9.
– indeks stabilności Larsona – Skolda (ang. ILS) – informuje o potencjalnym zagrożeniu materiałów konstrukcyjnych korozją wżerową, powodowaną przez jony chlorkowe i siarczanowe. Jest on obliczany na podstawie zmierzonych stężeń chlorków i siarczanów w wodzie obiegowej. Indeks ten może przyjmować wysokie wartości, nawet w przypadkach optymalnych wartości indeksu Langeliera, ponieważ oba te indeksy odnoszą się do innego mechanizmu korozji (indeks Langeliera – korozja równomierna, indeks Larsona – Skolda – narażenie na korozję wżerową). Przyjęty za optymalny zakres wartości indeksu jest niższy od wartości 0,8, natomiast przyjęty za dopuszczalny zawiera się poniżej wartości 1,2. Powyżej wartości 1,2 należy liczyć się z możliwością wystąpienia w układzie korozji wżerowej, tym intensywniejszej im wyższa jest wartość tego indeksu. Indeks stabilności Larsona – Skolda przedstawiono graficznie na rys.10.

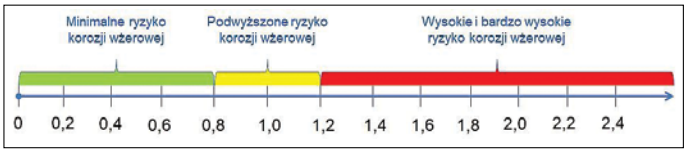
Dla zapewnienia ochrony przed osa-



Rys.8
Charakterystyka wód na podstawie interpretacji indeksu Langeliera [14, 15]



Rys.9
Charakterystyka wód na podstawie interpretacji indeksu CSI [14, 15]



Rys.10 Charakterystyka korozyjna wody na podstawie interpretacji indeksu Larsona – Skolda [14, 15]

dzaniem się kamienia wodnego na powierzchniach skraplaczy wyparnych, a także ochrony przed korozją należy zapewnić [15]:

- właściwe uzdatnienie wody uzupełniającej układ chłodzenia;
- utrzymanie właściwej jakości wody w obiegu układu chłodzenia, poprzez odfiltrowywanie części wytrąconych osadów mineralnych i biologicznych;
- nieprzekraczanie zalecanych przez producentów skraplaczy stężeń składników fizykochemicznych wody w zależności od rodzaju tworzywa konstrukcyjnego, poprzez regulację poziomu dozwolonego zasolenia – w szczególności także chlorków;
- korekcję chemiczną wody antyskalantami i inhibitorami korozji;

Dozowanie antyskalantów zapobiega wytwarzaniu się osadów kamienia wodnego, a inhibitor korozji zapobiega intensyfikacji procesów korozyjnych stali ocynkowanej oraz nierdzewnej, np. w sytuacjach wysokiego stężenia chlorków (powyżej 150 mg/l).

- wprowadzanie do układu wodnego biocydów w celu zatrzymania procesu pojawiania się biofilmu i zakwitu glonów rys.11. Dezynfekcję można prowadzić w sposób okresowy poprzez dozowanie do obiegu wodnego „dawki szokowej" biocydu lub w sposób ciągły, dozując określoną dawkę proporcjonalną do ilości wody uzupełniającej instalację. Wielkość dozowanej dawki zależy od rodzaju biocydu. Korzystna jest także okresowa zmiana biocydu tzn. z biocydu o właściwościach utleniających na nieutleniające, w celu zapobiegania mutowaniu mikroorganizmów, których formy żywe oraz przetrwalnikowe mogłyby zwiększyć swoją odporność na dozowany w sposób ciągły jeden rodzaj stosowanej substancji.

Rys.11 Glony w wentylatorowej chłodni wieżowej [9]

Metody uzdatniania wody na potrzeby skraplaczy

Zmiękczanie wody na silnie kwaśnym kationicie w cyklu sodowym

Zmiękczacz wody przeciwdziała wytrącaniu się osadów kamienia wodnego. Woda częściowo zmiękczona do poziomu twardości 3 ÷ 5°dH nie wytrąca dużych ilości osadów wapniowo – magnezowych i jednocześnie nie intensyfikuje procesów korozyjnych. Za pomocą złoża jonowymiennego w zmiękczaczu wraz z usuwaniem jonów wapnia i magnezu, usuwana jest twardość węglanowa i stała, co następuje zgodnie z reakcjami:

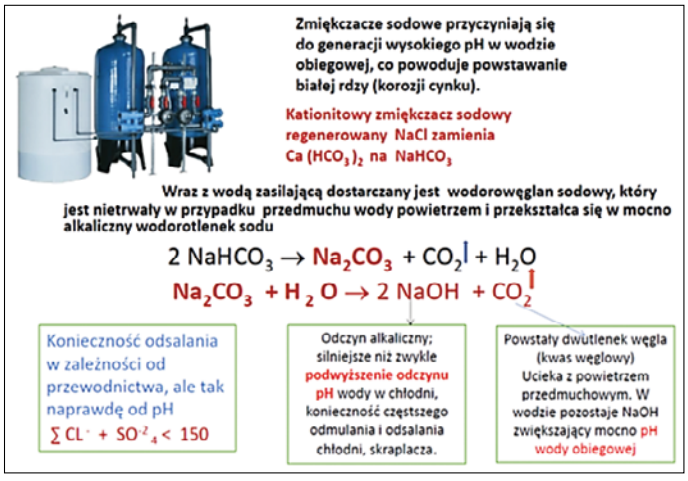
$$Kt - Na_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow Kt - Ca + 2NaHCO_3 \quad (7)$$

$$Kt - Na_2 + CaCl_2 \rightarrow Kt - Ca + 2NaCl \quad (8)$$

Usunięcie z wody jonów wapnia i magnezu, a więc kationów osadotwórczych i zastąpienie ich jonem sodowym – posiadającym wysoką rozpuszczalność w połączeniu z wieloma anionami, np. CO_3^{2-}, SO_4^{2} – – gwarantuje zahamowanie procesów wytrącania się osadów. Wymieniony przez jonit kation sodu tworzy w wodzie wodorowęglan sodowy $NaHCO_3$. Związek ten hydrolizuje w wodzie, zarówno na gorąco, jak i na zimno. Reakcja przesuwa się cały czas z lewej strony na stronę prawą, gdyż na skutek przedmuchiwania wody powietrzem, ulatnia się uwolniony dwutlenek węgla, powstały z rozkładu słabego kwasu węglowego.

$$NaHCO_3 + H_2O \rightarrow NaOH + H_2O + CO_2\uparrow \quad (9)$$

Uzdatnianie wody tą metodą prowadzi zatem do jej alkalizacji (pojawia się NaOH) i wzrostu odczynu pH, o ile jest ono prowadzone w instalacji równocześnie z przedmuchiwaniem wody powietrzem w sposób, w jaki prowadzi się to w układach wyparnych z wymuszoną wentylacją. Zmiękczacze są regenerowane za pomocą roztworów chlorku sodu NaCl, czyli soli tabletkowanej. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że technika zmiękczania wody na kationicie nie wpływa na zmniejszenie jej przewodnictwa. Na rys.12 przedstawiono proces zachowania się zmiękczonej wody w obiegu wyparnym chłodzenia.

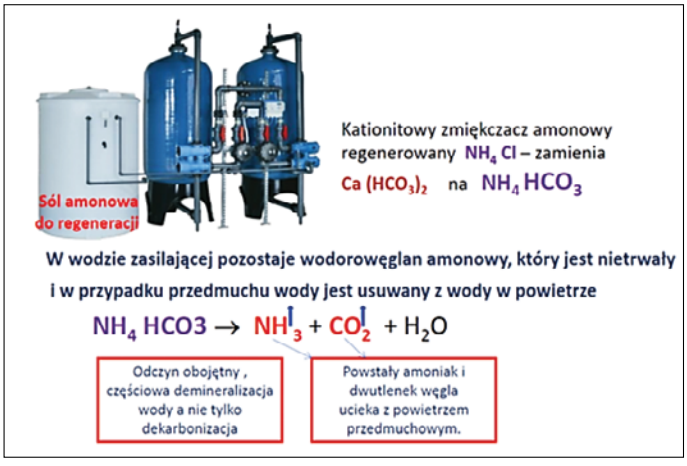


Rys.12 Graficzne przedstawienie klasycznej metody zmiękczania wody dla układów chłodzenia [14]

Częściowa demineralizacja wody po wymianie jonowej (metoda amonowa)

Metoda amonowa to całkowicie nowa metoda, autorstwa Jana Marjanowskiego, wg patentu PL 235279 z marca 2020 r. Metoda ta w swoim działaniu wykorzystuje te same urządzenia, co metoda zmiękczania sodowego. Różnica polega jednak na tym, że do regeneracji zmiękczaczy wykorzystano sole amonowe zamiast chlorku sodowego chlorek amonowy, który daje bardzo korzystne efekty. Zasada działania metody amonowej jest następująca: podczas przepływu wody przez złoże jonitowe jony wapnia i magnezu są wymieniane na jony amonowe, które są wprowadzane do zmiękczonej wody. Następnie, w wyniku działania wentylatora skraplacza natryskowo – wyparnego, woda obiegowa z układu zostaje przedmuchana powietrzem. Podczas kontaktu wody i powietrza sole amonowe

z wody zostają przeobrażone w lotne związki amonowe i dwutlenek węgla, które ulatniają się z parą wodną i tym samym zmniejszają przewodnictwo wody eliminując lub zmniejszając konieczność odsalania. Zasadę działania amonowej metody uzdatniania wody przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13 Zasada działania amonowej metody uzdatniania wody [14]

W wodzie pozostają chlorki, siarczany i azotany. Sole te po hydrolizie mają odczyn kwaśny, a od wielkości ich stężenia w wodzie zależy, czy układ ocynkowany jest bezpieczny z uwagi na oddziaływania korozyjne. Większość wód głębinowych w Polsce zawiera bardzo mało chlorków i siarczanów i z tego powodu to właśnie te wody nadają się doskonale na stosowanie metody amonowej.

Przedstawiona powyżej metoda, popularnie nazywana w chłodnictwie metodą amonową, została wdrożona – w ciągu 4 lat w kilkunastu dużych obiektach chłodniczych – zapewniając tym obiektom:

- zmniejszone zużycie wody uzupełniającej obieg chłodniczy;

W zależności od składu chemicznego wody zmniejszono zużycie nawet do 50%.

- zmniejszone zużycie chemii korekcyjnej (antyskalantów, inhibitorów korozji).

W zależności od składu chemicznego wody zmniejszono zużycie środków chemicznych nawet do 50%.

Czas zwrotu nakładów finansowych na instalację dla metody amonowej to niepełny rok [15].

Podsumowanie

Wzrost osadów na powierzchniach wymienników ciepła przyczynia się do zwiększenia zużycia energii, wzrostu strat energetycznych, spadku wydajności cieplnej wymienników, występowania nieprawidłowości w ich działaniu i występowania stanów awaryjnych, uszkodzenia wymienników, przyspiesza degradację oraz korozję powierzchni wymienników. W obiegach wodnych nagromadzone osady ułatwiają rozwój mikroorganizmów w instalacji.

W przypadku wentylatorowych chłodni wieżowych istnieje ryzyko rozwoju drobnoustrojów chorobotwórczych m. in. bakterii rodzaju *Legionella*, co jest konsekwencją pojawienia się sprzyjających warunków środowiskowych związanych z występowaniem osadów, a także temperaturą wody chłodzącej sprzyjającej rozwojowi tych mikroorganizmów.

Najczęstszym problemem występującym w obiegach wodnych nagrzewnic, chłodnic, parowników i skraplaczy jest ich zanieczyszczenie osadami, wytrącającymi się z wody. W wentylatorowych chłodniach wieżowych w wyniku odparowania wody obiegowej stopniowo wzrasta jej zasolenie, co w konsekwencji może prowadzić do wytrącania się osadów soli trudno rozpuszczalnych i wzrostu stężenia agresywnych jonów. Ponadto, w wyniku rozpylania wody w dyszach następuje częściowa utrata wody w postaci mgły wodnej, w której również znajdują się sole. Sole te również odkładają się w dyszach powodując ich zapychanie się. W układach zamkniętych wody następuje wzrost zawartości soli mineralnych (chlorków i siarczanów), które wpływają na zwiększenie twardości niewęglanowej wody. Usunięcie tych związków wymaga przynajmniej częściowej demineralizacji wody. W tym celu stosuje się wymienniki jonitowe.

Korozyjne oddziaływanie wody stosowanej w instalacjach chłodniczych w dużej mierze wiąże się z odczynem wody oraz zawartością wolnego (tzw. agresywnego) CO_2.

Niezależnie od rodzaju zastosowanego wymiennika, czy to wyparnego, czy też przeponowego, niezbędne są podczas eksploatacji: bezwzględna dbałość o właściwą jakość wody w układzie i wykonywanie okresowych kontroli jakości wody w instalacji oraz podejmowanie działań profilaktycznych mających na celu zachowanie urządzeń w czystości tzn. usuwanie osadów i kamienia.

Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że w zależności od mocy cieplnej jaką posiada wymiennik ciepła, to w sytuacji pojawienia się na jego powierzchni osadów, zachowanie tej samej wydajności cieplnej, będzie odpowiednio generowało większe nakłady energetyczne.

Osady często powodują zwiększenie chropowatości rur w związku z czym wzrastają opory przepływu i konieczne jest zwiększone wydatkowanie energii na ich pokonanie. Aby wymienniki ciepła działały poprawnie i niezawodnie konieczne jest ich okresowe czyszczenie i usuwanie nagromadzonych osadów.

Właściwe przygotowanie wody zasilającej oraz obróbka wody obiegowej w układzie chłodzenia wymagają szerokiej wiedzy specjalistycznej i znajomości procesów zachodzących w układzie (odparowanie, zatężanie, alkalizacja, itp.). Opracowanie technologii przygotowania wody niezbędnej do przebiegu procesów cieplnych i technologicznych należy zawsze rozpoczynać od oględzin i rozpoznania układu zarówno pod względem materiałów konstrukcyjnych, rodzaju zastosowanych urządzeń (skraplacze, wieże wyparne, sprężarki, pompy, armatura, rurociągi) i zachodzących w obiegach procesów. Kolejnym etapem opracowania technologii jest dobór odpowiedniej, optymalnej w danych warunkach, techniki przygotowania wody uzupełniającej (zmiękczanie, demineralizacja). Ostatni etap opracowania, zmierzający do osiągnięcia właściwej jakości wody obiegowej, jest najbardziej złożony i niejednokrotnie wymaga zastosowania całego spektrum metod korekcyjnych – począwszy od filtracji, poprzez automatyczne odsalanie, aż po dozowanie środków chemicznych. Nieodzowne dla prawidłowego działania układu chłodzenia i niezbędne w prawidłowej eksploatacji jest prowadzenie przynajmniej okresowego monitoringu parametrów wody i stanu elementów. Dane te są konieczne podczas diagnozowania stanu układu, a wyniki badań stanowią podstawę do zastosowania ewentualnej korekty w prowadzonych procesach obróbki wody przeznaczonej do układów chłodniczych.

LITERATURA

[1] Barcewicz K.: Ćwiczenia laboratoryjne z chemii paliw, smarów i wody. Wydanie II, Wyższa

Szkoła Morska. Dział Wydawnictw, Gdynia 2001
[2] Chung D.D.: Materials for thermal conduction, Appl. Therm. Eng. 21 (2001) 1593–1605
[3] Guo Z.Y., Liu X.B., Tao W.Q., Shah R.K.: Effectiveness–thermal resistance method for heat exchanger design and analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 53, Issues 13 – 14, 2877 – 2884, 2010
[4] Hajduk T.: Woda w obiegach chłodzących skraplacze urządzeń chłodniczych. TCHiK Nr 5/2004, str.177 – 180
[5] Han Z., Fina A.: Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review, Prog. Polym. Sci. Oxf. 36 (2011) 914–944
[6] Hao, J., Chen, Q., Li, X. et al. A Correction Factor-Based General Thermal Resistance Formula for Heat Exchanger Design and Performance Analysis. J. Therm. Sci. 30, 892 – 901, 2021
[7] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1979
[8] Kaiser K.: Technik chłodnictwa i klimatyzacji oraz pomp ciepła. Poradnik. Wyd. EURO–MEDIA, Warszawa 2022
[9] Kaiser K., Wolski A. Klimatyzacja i wentylacja w szpitalach. Wyd. MASTA, Gdańsk 2007
[10] Kaiser K.: Zaopatrywanie instalacji klimatyzacyjnych w wodę lodową – uwagi eksploatacyjne. TCHiK Nr 6 – 7/2006, str. 242 – 248
[11] Kaleta A., Chojnacka A.: Rozważania na temat metod zwiększania efektywności wymiany ciepła w wymiennikach ciepła stosowanych w przemyśle mleczarskim. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 1/2009, str. 91 – 97
[12] Kalinowski E.: Przekazywanie ciepła. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984
[13] Kowal A. L., Świderska – Bróż M.: Oczyszczanie wody. Wydanie III, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., Warszawa – Wrocław 1998
[14] Marjanowski J., Nalikowski A.: Chemiczne czyszczenie skraplaczy i wież wyparnych jako element prawidłowej eksploatacji układu chłodzenia. Cz.2. Profilaktyka w zakresie utrzymania stanu urządzeń bez osadów i korozji. Przemysł Fermentacyjny i Owocowo – Warzywny 6/2020, SIGMA-NOT, str. 25 – 30
[15] Marjanowski J., Nalikowski A.: Profilaktyka utrzymania powierzchni układów chłodzenia bez osadów i korozji. Przegląd Mleczarski 4/2022, str. 45 – 52
[16] Pääkkönen T.M., Riihimäki M., Simonson C.J., Muurinen E., Keiski R.L.: Modeling CaCO3 crystallization fouling on a heat exchanger surface – Definition of fouling layer properties and model parameters. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 83, April 2015, Pages 84 – 98
[17] Poradnik chłodnictwa WNT, Warszawa 1965
[18] Pudlik W.: Termodynamika. Podręcznik PG, Gdańsk 2011
[19] Sierakowski E., Mrożek J.: Kontrola wody i pary w energetyce. Wyd. ZPBE Energopomiar, Gliwice 1998
[20] Teleszewski T.J., Żukowski M.: The influence of sludge on thermal performace of heat exchanger tubes inside in an anaerobic digester. Ochrona Środowiska. Volume 20, 763 – 779, 2018
[21] Norma VDI 3803 – Wymagania jakości wody chłodniczej
[22] Marjanowski J., Leaks and scaling in stainless steel heat exchanger. Rules of selection of chemical bath for scale removal. Part.1. Instal, Nr 9, 2018, s. 26 – 32.

■