

FIZYCZNE I CHEMICZNE ASPEKTY WYSTĘPOWANIA ZANIECZYSZCZEŃ NA POWIERZCHNIACH WYMIANY CIEPŁA W SIŁOWNIACH PAROWYCH

W artykule scharakteryzowano rodzaje zanieczyszczeń gromadzących się na powierzchniach wymiany ciepła w okrętowych i lądowych siłowniach parowych, w szczególności podjęto kwestię obecności zanieczyszczeń stałych, tj. osadów. Zwrócono uwagę na odmiennie własności oraz zjawiska towarzyszące osadom tworzącym się na powierzchni wymiany ciepła po stronie wody, a także po stronie pary wodnej aparatów wymiany ciepła. Ponadto wskazano na specyficzne właściwości osadów biologicznych, tzw. bioosadów, które w niektórych przypadkach mogą wywoływać nawet pożądane efekty, np. spowalniać proces korozji powierzchni wymiany ciepła. Zaprezentowano również zalecane własności fizykochemiczne dla wody i pary wodnej stosowanej jako medium robocze w okrętowych i lądowych kondensacyjnych siłowniach parowych.

Słowa kluczowe: siłownie parowe, aparaty wymiany ciepła, zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła, uzdatnianie wody na cele energetyczne.

WSTĘP

Termin „zanieczyszczenie” (ang. *fouling*) Knudsen definiuje jako substancję, która osiada na powierzchni wymiany ciepła i jednocześnie stawia dodatkowy opór cieplny w procesach wymiany ciepła [18]. Zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła bywają zamiennie nazywane osadami, choć nazwa „osad” (ang. *deposit*), jak zauważa Taborek [34], powinna być przynależna tylko zanieczyszczeniom występującym w postaci ciała stałego. Przyjmując tradycyjny podział stanów skupienia, jako kryterium klasyfikacji zanieczyszczeń powierzchni wymiany ciepła wymienników siłowni parowych, wyróżnia się [16, 31]:

- zanieczyszczenia stałe, np. kamień kotłowy, kamień wodny, tlenki metali, szlam, muł, glina [7, 10, 11, 17, 29];
- zanieczyszczenia ciekłe, np. olej smarny turbinowy [13];
- zanieczyszczenia lotne, np. powietrze jako gaz inertyny [6, 35].

Strumień ciepła Q_C wymienianego przez aparat wymiany ciepła o powierzchni wymiany A bez osadów (C – ang. *clean*) przy różnicy temperatur ΔT_{log} można opisać następującą formułą:

$$\dot{Q}_C = \frac{1}{r_{k,C}} \times A \times \Delta T_{\log}, \quad (1)$$

gdzie:

$r_{k,C}$ – opór cieplny właściwy przenikaniu ciepła dla wymiennika bez osadów.

Następstwem tworzenia się zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła danego wymiennika, z racji ich dużego oporu przewodzenia ciepła r_f , jest zazwyczaj utrata wydajności cieplnej wymiennika do wartości \dot{Q}_F (F – ang. *fouled*), nazywana coraz częściej mianem **degradacji termicznej (cieplnej)** wymiennika ciepła [5, 6]. Powyższą kwestię można uzasadnić na podstawie zależności:

$$\dot{Q}_F = \frac{1}{r_{k,F}} \times A \times \Delta T_{\log}. \quad (2)$$

Ponieważ

$$r_{k,F} = r_{k,C} + r_f \wedge r_f > 0 \Rightarrow \frac{1}{r_{k,C} + r_f} < \frac{1}{r_{k,C}},$$

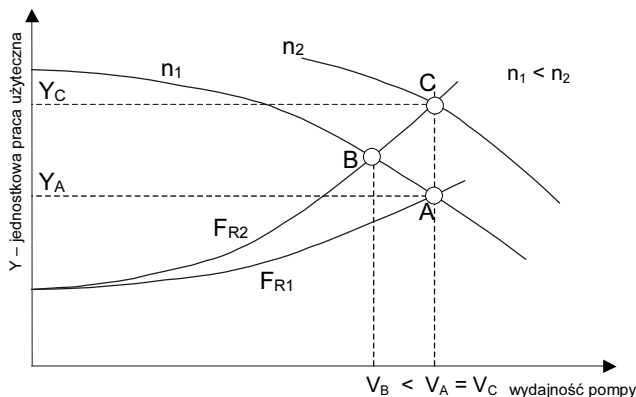
to uwzględniając zależności (1), (2), ostateczną konkluzję można zapisać następująco:

$$\dot{Q}_F < \dot{Q}_C, q.e.d.$$

Obecność zanieczyszczeń na powierzchni rurek wymienników ciepła w układach parowych siłowni cieplnych okrętowych i lądowych (skraplacze, regeneracyjne podgrzewacze wody zasilającej) jest przyczyną m.in. wzrostu spiętrzeń temperatur, a w przypadku skraplaczy – związanego z tym pogorszenia stopnia próżni [4, 6, 8, 15, 37]. Ostatecznie proces degradacji termicznej wymienników ciepła prowadzi do zmniejszenia sprawności danego bloku energetycznego [8, 19, 22]. Powoduje to zawsze wzrost kosztów przetwarzania energii, w konsekwencji prowadząc do zwiększonej degradacji środowiska naturalnego, chociażby poprzez większe niż to konieczne zużycie surowców energetycznych [32]. Warto dodać, że zanieczyszczenia odkładające się wewnątrz rur wymiennika ciepła, tj. po stronie wody, mogą dodatkowo zapoczątkować proces obliteracji przewodów. W szczególności zjawisko to jest charakterystyczne dla skraplaczy cieplnych chłodzonych wodą morską [16, 34]. Zmniejszając światło pojedynczej rury, osady powodują wzrost oporów przepływu z jednoczesnym zmniejszeniem wydajności pompy wody chłodzącej skraplacz (rys. 1, pkt B). W efekcie prowadzi to do zmniejszenia prędkości przepływu wody, co skutkuje dodatkowym wzrostem oporu wnikania ciepła. Zmniejszenie prędkości przepływu wody powoduje ponadto wzrost intensywności wytrącania się osadów [3, 26], nasilając w ten sposób zjawisko zarastania rurek.

Aby z powrotem uzyskać nominalne natężenie przepływu wody chłodzącej przez zanieczyszczony skraplacz, należałoby zmienić charakterystykę przepływu pompy wody chłodzącej, np. zwiększając odpowiednio jej obroty. Jednak taki zabieg wiąże się ze zwiększonym zapotrzebowaniem mocy silnika napędowego pompy, w konsekwencji powodując wzrost energochłonności układu chłodzenia siłowni parowej (rys. 1, punkt C). Zatem uwzględniając dodatkowo zjawisko obliteracji

zur, np. w skraplaczach siłowni parowych, można stwierdzić, że w tym przypadku obecność zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła prowadzi nie tylko do ich degradacji cieplnej, ale szerzej – do ich **degradacji cieplno-przepływowej**.



Rys. 1. Współpraca pompy wody chłodzącej skraplacz siłowni parowej wyposażonej w regulację prędkości obrotowej n z instalacją o różnych oporach przepływu F_R ; F_{R1} – skraplacz bez osadów, F_{R2} – skraplacz z osadami

Fig. 1. Cooperation between the condenser cooling pump equipped with speed control and the steam power plant installation in different flow resistance state F_R ; F_{R1} – condenser without deposits, F_{R2} – condenser with deposits

Źródłem pochodzenia zanieczyszczeń stałych gromadzących się na powierzchniach wymiany ciepła wymienników siłowni parowych jest niedostateczna jakość mediów chłodzących i czynnika obiegowego oraz występujące procesy fizykochemiczne, m.in. procesy korozyjne i erozyjne [10, 11, 21]. Wynikające z tego poważne trudności eksploatacyjne wpływają na ustalanie coraz ostrzejszych wymagań w stosunku do jakości zarówno wody, jak i pary wodnej [2, 8, 33, 36]. Nadto napełnienie obiegu wodą odpowiednio oczyszczoną i przygotowaną chemicznie nie gwarantuje jeszcze prawidłowej pracy urządzeń siłowni parowej, gdyż wysoka temperatura i ciśnienie, a także duże obciążenie cieplne powierzchni wymiany ciepła są przyczyną szeregu złożonych przemian fizykochemicznych, zmieniających właściwości wody oraz jej reaktywność wobec materiałów konstrukcyjnych urządzeń energetycznych. Mechanizm tych przemian do dzisiaj nie jest całkowicie rozpoznany. Dlatego należy stale kontrolować jakość czynnika obiegowego i korygować jego skład, aby urządzenia mogły być eksploatowane zgodnie z wytycznymi projektantów i producentów urządzeń. Wszelkie zaś zaniedbania i błędy w eksploatacji urządzeń uzdatniania czynnika obiegowego prowadzą do zakłóceń i awarii, wskutek zachodzących procesów korozyjnych lub tworzenia się osadów. Zazwyczaj procesy powstawania osadów na powierzchniach wymiany ciepła oraz procesy korozyjne są ze sobą ściśle powiązane.

1. ZANIECZYSZCZENIA POWIERZCHNI WYMIANY CIEPŁA PO STRONIE WODY

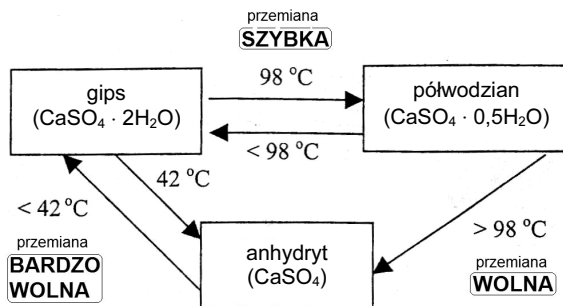
Skład chemiczny osadów powstałych po stronie wody w wymiennikach ciepła okrętowych i lądowych siłowni parowych zależy w dużej mierze od typu konstrukcyjnego samego wymiennika ciepła oraz pełnionej przez niego funkcji (skraplacze, wymienniki regeneracyjne nisko- i wysokoprężne). Dla skraplaczy dodatkowo zróżnicowanie składu chemicznego osadów powstałych po stronie wodnej wynika z zastosowanego systemu chłodzenia (układ otwarty, zamknięty lub mieszany). W obiegu chłodzącym zamkniętym część wody stale odparowuje, stąd też powstałe ubytki należy uzupełniać wodą uzdatnioną. Natomiast w obiegu chłodzącym otwartym świeża woda jest przetłaczana cały czas, pobierana w zależności od dostępności źródła, tj. z morza, rzeki lub innego zbiornika wodnego (staw, jezioro). W takim przypadku chłodzenie wody następuje przez naturalne jej odparowanie do atmosfery, a uzupełnianie ubytków odbywa się także w sposób naturalny (opady atmosferyczne, dopływy itp.) [27]. Osady powstałe po stronie wody mają bezpośredni związek z jakością wody, gdyż w przyrodzie woda nie występuje jako idealnie czysty chemicznie związek H_2O . Podstawowe grupy zanieczyszczeń obecnych w wodzie to [14, 25, 30]:

- osady cząsteczkowo-dyspersyjne – do tej grupy w dużej mierze należą rozpuszczone w wodzie sole i gazy oraz niektóre substancje organiczne. Najczęściej występujące sole to: sole wapniowe ($Ca(HCO_3)_2$, $CaCO_3$) oraz siarczan wapnia ($CaSO_4$, $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ulegające wewnętrznym przemianom fazowym w zależności od temperatury (rys. 2, badania Glatera [25]). Pozostałe związki to: chlorek wapnia, sole magnezu ($Mg(HCO_3)_2$, $MgCO_3$, $MgSO_4$, $MgCl_2$), żelaza i manganu ($Fe(HCO_3)_2$, $Mn(HCO_3)_2$, $FeSO_4$, $MnSO_4$), sodowe i potasowe ($NaCl$, KCl , K_2SO_4), krzemionka (SiO_2) i krzemiany, tzw. szkło wodne (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3);
- osady koloidalne – rozmiar cząsteczek od 10^{-9} do 10^{-7} m; przechodzą przez bibułę filtracyjną, są jednak zatrzymywane podczas filtracji w specjalnych ultrafiltrach ceramicznych. Cząstki zawiesiny koloidalnej mogą łączyć się z cząsteczkami wody, tworząc tzw. hydraty. Przykładem trudno usuwalnego związku w procesach uzdatniania wody jest krzemionka koloidalna $Si(OH)_4$;
- osady mechaniczne (grubodyspersyjne) – wielkość cząstek powyżej 10^{-7} m, w czasie filtrowania są zatrzymywane na bibule filtracyjnej; dzielą się na zawiesiny organiczne i nieorganiczne.

Wartości gęstości ρ i współczynnika przewodzenia λ dla kamieni kotłowych wynoszą [31]:

- osad siarczanowy: $\rho = 2000\text{--}2700$ [kg/m^3], $\lambda = 0,60\text{--}2,60$ [$W/(mK)$];
- osad węglanowy: $\rho = 1000\text{--}2500$ [kg/m^3], $\lambda = 0,15\text{--}1,83$ [$W/(mK)$];
- osad krzemionkowy: $\rho = 300\text{--}1200$ [kg/m^3], $\lambda = 0,08\text{--}0,27$ [$W/(mK)$].

Warto dodać, że wartość współczynnika przewodności cieplnej osadu ściśle zależy od jego struktury, np. stopnia porowatości (badania Krischera [3]).



Rys. 2. Model przejść fazowych w środowisku wodnym dla siarczanu wapnia (wg [25])
Fig. 2. Model of calcium sulphate phase transitions within the hydrous environment;
 (based on [25])

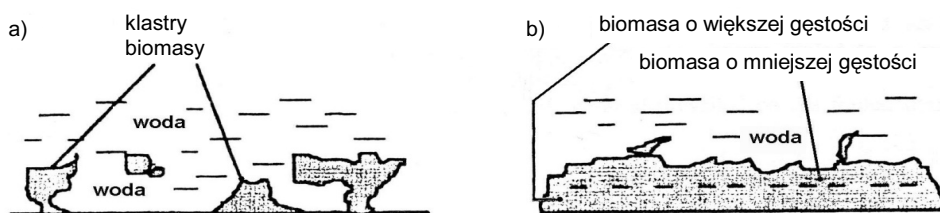
W przypadku podgrzewaczy regeneracji nisko- i wysokoprężnej elektrowni krajowych większość przeprowadzonych analiz chemicznych osadów gromadzących się od strony wodnej wskazuje, że powstałe osady w swym składzie zawierają głównie tlenki żelaza w postaci magnetytu (Fe_3O_4) oraz związki miedzi. Do określenia ilości osadów wprowadza się pojęcie jednostkowej masy powierzchniowej $m_{A,f}$ wyrażanej w g/m^2 . Jak wykazują badania Dobosiewicza [10, 11], przeprowadzone dla wymienników regeneracji wysokoprężnej w blokach energetycznych 200 MW i 360 MW elektrowni krajowych, $m_{A,f}$ dla osadów od strony wodnej wynosi średnio 700–900 g/m^2 . Dodatkowym źródłem zanieczyszczeń powierzchni wymiany ciepła podgrzewaczy regeneracyjnych są osady naniesione „drogą” przecieków, np. przecieki wody chłodzącej skraplacz lub przecieki oleju turbinowego. Szczególnie niekorzystne są te ostatnie, gdyż olej ulega stopniowemu rozkładowi i tworzy osady będące mieszaniną związków organicznych z tlenkami metali: Fe, Cu i Zn [13].

Odrębny problem w eksploatacji wymienników ciepła w siłowniach parowych stanowi obecność zanieczyszczeń biologicznych zwanych bioosadami (ang. *biofouling*). Są to zanieczyszczenia utworzone przez organizmy znajdujące się w wodzie lub w powietrzu [14, 23]. Wyróżnia się dwa główne typy bioosadów:

- makroosady, wywołane przez makroorganizmy, np. małże, skorupiaki;
- mikroosady, tworzone przez mikroorganizmy, np. bakterie, grzyby, glony.

Makroosady zasadniczo występują w otwartych systemach chłodzenia skraplaczy energetycznych. Są one szczególnie obecne w obiegach chłodzących skraplacze siłowni okrętowych oraz elektrowni i elektrociepłowni, w których skraplacze są chłodzone wodą morską. Struktura tworzona przez makroosady zależy w dużej mierze od ilości i różnorodności składników osadotwórczych w wodzie. Makroosady czasami wręcz całkowicie blokują przepływ w rurach i przepustach. Według Epsteina [12] obecnie istnieje ok. 2000 rozpoznanych gatunków organizmów żyjących w wodzie morskiej, które tworzą bioosady. Makroosady, z racji swojej wielkości, wywołują dodatkowo procesy erozyjne, np. wibrujące muszle małż. W obliczeniach oporów cieplnych, spowodowanych obecnością bioosadów, przyjmuje się, że wartość ich współczynnika przewodzenia ciepła równa się w przybliżeniu współczynnikowi przewodzenia dla wody [18].

Mikroosady występują z reguły we wszystkich systemach chłodzenia. Podstawową formacją biologiczną jest tzw. biofilm, utworzony przez żywe komórki grzybów, glonów i bakterii oraz produktów ich metabolizmu [9]. Warto dodać, że bakterie są drobnoustrojami o zaskakująco dużym zasięgu występowania w środowisku, olbrzymiej różnorodności gatunkowej, ekologicznej i metabolicznej. Potrafią one żyć w ekstremalnych warunkach otoczenia, np.: brak tlenu, temperatura w zakresie od -250°C do $+120^{\circ}\text{C}$, ciśnienie ok. 60 MPa oraz szeroki zakres pH. Mikroosady rozwijają się na wilgotnych powierzchniach, tworząc zróżnicowane struktury: od galaretowatych klastrów do litych warstw porowatych, których gęstość wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przepływającej wody (badania Botta, Christensena i Characklisa oraz Vieiry, rys. 3) [23].



Rys. 3. Modele strukturalne bioosadów: a) skupiska biomasy i biopolimerów rozdzielonych kanałami wodnymi (struktura mniej odporna na działanie biocydów), b) porowata warstwa biomasy o różnej gęstości warstwy (wg [23])

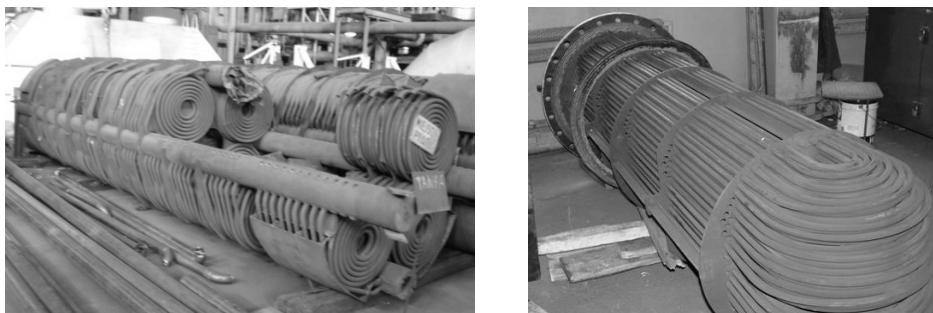
Fig. 3. The structural biofouling models a) concentrations of biomass and biopolymers separated by water channels – the structure less resistant to biocides treatment, b) a porous layer of biomass with different layer densities (based on [23])

Obecność mikroosadów na powierzchniach wymiany ciepła wymienników siłowni parowych prowadzi często do tzw. korozji mikrobiologicznej. Korozję tę powodują kwasy produkowane przez bakterie. Do najważniejszych mikroorganizmów odpowiedzialnych za zjawiska korozyjne należą między innymi bakterie utleniające związki żelaza i manganu: *Thiobacillus ferrooxidans*, *Ferrobacillus ferrooxidans*, *Galionella*, *Metalogenium symbioticum* [14]. Niekiedy jednak bakterie mogą wywoływać pożądane efekty, np. według badań prowadzonych przez amerykański instytut badawczy Electric Power Research Institute bakterie aerobowe tworzą biofilmy o działaniu ochronnym przed korozją, powodując aż 40-krotne spowolnienie procesu korozji stali [26].

2. ZANIECZYSZCZENIA POWIERZCHNI WYMIANY CIEPŁA PO STRONIE PARY WODNEJ

W literaturze przedmiotu dotyczącej osadów powstałych od strony parowej (zewnątrzna powierzchnia rur) na powierzchni wymiany ciepła wymienników regeneracji nisko- i wysokoprężnej (rys. 4) oraz skraplaczy siłowni parowych lądowych i morskich wykazuje się, że tego typu osady składają się głównie

z tlenków żelaza w postaci: Fe_3O_4 , $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, Fe_2O_3 i FeO oraz związków miedzi. Udział procentowy wymienionych związków w osadzie jest różny i zależy od materiału rury wymiennika ciepła [20, 21].



Rys. 4. Osady gromadzące się na powierzchniach wymiany ciepła aparatów wymiany ciepła siłowni parowych elektrowni i elektrociepłowni krajowych po stronie pary wodnej: a) wymiennik regeneracji wysokoprężnej z elektrowni RE, b) wymiennik regeneracji niskoprężnej z elektrociepłowni SEC (zdjęcia dzięki uprzejmości elektrowni Rybnik i elektrociepłowni Siekierki, opr. wł.)

Fig. 4. Deposits accumulated on vapour side heat transfer surfaces of the steam power plant heat exchangers i.e.: a) high-pressure heat recovery exchanger from the RE power plant; b) low-pressure heat recovery exchanger from the SEC heat-and-power station (courtesy of Rybnik Power Plant and Siekierki Power Plant, own photo)

Przykładowe wyniki badań osadów od strony parowej zaczerpnięto z prac [21, 31]. Badania składu i ilości osadów przeprowadzono w elektrowni Turów na skraplaczu turbinowym bloku nr 6, wykonanym z rur miedzioniklowych (MNŻ51), i na skraplaczu turbinowym bloku nr 8, wykonanym z rur mosiężnych (MC70). Badania pokazały, że podstawowym składnikiem osadów po stronie parowej tych wymienników są związki żelaza. Udział tych związków w przeliczeniu na Fe_3O_4 wynosi: dla rur miedzioniklowych 71,26%, dla rur mosiężnych 59,84%. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla Fe_2O_3 wynosi $\lambda_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,1 \text{ W}/(\text{mK})$. Drugim istotnym składnikiem tego rodzaju osadów są związki miedzi, których udział w przeliczeniu na czystą Cu wynosi: 24,34% dla rur miedzioniklowych i 26,8% dla rur mosiężnych. Ponadto w znaczących ilościach występują związki cynku i niklu, których udział w przeliczeniu na Ni i ZnO wynosi dla rur miedzioniklowych 1,99% Ni i 10,86% ZnO. Udziały pozostałych składników osadów są mniejsze od 1%. Na jednostkę powierzchni przypadało: dla rur miedzioniklowych ok. $500 \text{ g}/\text{m}^2$ osadów, dla rur mosiężnych ok. $325 \text{ g}/\text{m}^2$ [21]. Warto nadmienić, że grubość osadu jest trudna do oszacowania, ponieważ osad nie tworzy jednorodnej zwartej warstwy na powierzchni rurek wymiennika ciepła. Jest zazwyczaj rozłożony nierównomiernie na tej powierzchni oraz posiada zróżnicowaną grubość, miejscami nawet dochodzącą do kilku milimetrów [20]. Stąd często wprowadza się pojęcie tzw. średniej zastępczej grubości osadu jako wynik iloczynu jednostkowej masy powierzchniowej i masy właściwej osadów.

3. WYMAGANIA DLA WODY UŻYTKOWANEJ W ENERGETYCE

W okrętowych i lądowych siłowniach parowych wyróżnia się następujące podstawowe obiegi wodne [15, 24, 31]:

- obieg kotłowy (wodno-parowy) – podstawowy obieg realizowany w blokach energetycznych, w którym wodę jako czynnik obiegowy podzielono na: wodę surową, wodę uzdatnioną, wodę zasilającą, wodę kotłową, skropliny, destylat, odmuliny, odsoliny;
- obieg chłodzący skraplacz (zamknięty, otwarty, mieszany);
- obieg ciepłowniczy (związany z gospodarką skojarzoną lub oparty na podgrzewaniu wody w kotłach wodnych).

Jakość różnego rodzaju wody na cele energetyczne można określić, sporządzając jej pełną analizę właściwości fizycznych i chemicznych. Do celów eksploatacyjnych wystarczające jest zastosowanie tzw. skróconej analizy wody określającej jej podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne.

Fizyczne właściwości wody są wyznaczane za pomocą wskaźników, charakteryzujących stopień zanieczyszczenia wody substancjami powodującymi szczególne zmiany jej własności fizycznych, bądź wyrażających jej stan termiczny. W tej grupie wyróżnia się następujące wskaźniki: a) mętność i przezroczystość, b) barwę, c) zapach, d) smak, e) temperaturę. Natomiast chemiczne właściwości wody determinują w znacznym stopniu jej przydatność do celów przemysłowych (np. jako medium chłodzące), gdyż są one bezpośrednim wyznacznikiem „kamieniotwórczości” oraz korozyjności wody.

Chemiczne właściwości wody są określane przez następujące wskaźniki: a) odczyn pH, b) twardość węglanowa i niewęglanowa, c) zasadowość, d) utlenialność, e) sucha pozostałość i straty po prażeniu, f) przewodnictwo elektryczne, g) zawartość związków azotu, h) zawartość chlorków, i) zawartość siarczanów, j) zawartość związków żelaza i manganu, k) zawartość związków krzemu, l) zawartość tlenu, ł) zawartość dwutlenku węgla, m) stabilność i termostabilność, n) korozyjność [31].

Jakość wody surowej można opisać wskaźnikami [1, 28, 31]:

- Langeliera (LSI, ang. *Langelier Saturation Index*) – określa ogólnie zdolności korozyjne i kamieniotwórcze wody w stosunku do stali;
- Ryznara (RSI, ang. *Ryznar Stability Index*) – opisuje intensywność tworzenia się kamienia węglanowego i osadów korozyjnych;
- Larsona-Skolda (LSCI, ang. *Larson-Skold Corrosive Index*) – określa zdolności korozyjne wody w stosunku do stali niskowęglowych;
- Oddo-Tomsona (OTI, ang. *Oddo-Tomson Index*) – uwzględnia wpływ zmian ciśnienia wody na: pH wody, ciśnienie cząstkowe zawartego w wodzie dwutlenku węgla oraz na rozpuszczalność węglanu wapnia.

Dla wszystkich typów kotłów woda zasilająca powinna być bezbarwna i przezroczysta, o utlenialności mniejszej niż 10 mg $\text{KMnO}_4/\text{dm}^3$. Natomiast pH powinno wynosić 7–9,5, chyba że wymagania dostawcy kotła stanowią inaczej. Niekiedy w praktyce bywa tak, że wymagania użytkownika kotła są bardziej surowe niż wymogi producenckie. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry

fizykochemiczne wody zasilającej bloki energetyczne o mocy 360 MW w Elektrowni Bełchatów. Parametry przedstawiono w różnych reżimach technologicznych. Zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową kotłów typu BB-1150 producenta kotłów Rafako woda zasilająca kocioł powinna spełniać wymagania odpowiadające reżimowi alkalicznemu, natomiast w Elektrowni Bełchatów obowiązywał bardziej restrykcyjny reżim kombi [2].

Tabela 1. Podstawowe wymagania dla wody zasilającej kotły energetyczne na wysokie parametry, obowiązujące w różnych reżimach chemicznych (wg [2])

Table 1. Basic requirements for feed water of high performance boilers applied in the different chemical regimes (according to [2])

Lp.	Parametr	Jednostka	Reżim		
			Alkaliczny niski tlen	Neutralny tlenowy	Kombi
1.	Przewodność elektrolityczna za H ⁺ kationitem dla +25°C	μS/cm	< 0,20	< 0,15	< 0,15
2.	Przewodność elektrolityczna przed H ⁺ kationitem dla +25°C	μS/cm	3–3,5	–	0,7–1,7
3.	Wartość pH dla +25°C	–	9,1–9,3	7,0–7,5	8,3–8,5
4.	Zawartość tlenu (O ₂)	μg/dm ³	< 20	100–200	50–200
5.	Zawartość żelaza (Fe)	μg/dm ³	< 20	< 20	< 20
6.	Zawartość miedzi (Cu)	μg/dm ³	< 3	< 3	< 3
7.	Zawartość sodu (Na)	μg/dm ³	< 15	< 10	< 10
8.	Zawartość krzemionki (SiO ₂)	μg/dm ³	< 20	< 20	< 20
9.	Zawartość hydrazyny (N ₂ H ₄)	μg/dm ³	> 10	–	–

4. WYMAGANIA STAWIANE PARZE WODNEJ NA CELE ENERGETYCZNE

Znajomość zawartości zanieczyszczeń w parze, szczególnie tak agresywnych związków, jak NaOH, NaCl, Na₂SO₄, Na₃PO₄, jest bardzo ważna, gdyż mają one zasadniczy wpływ na przebieg procesów korozyjnych, zarówno układu przepływowego turbiny, jak i całego bloku energetycznego (aparaty wymiany ciepła). Jedną z metod określenia przybliżonej zawartości soli (zanieczyszczeń) w parze stanowi pomiar przewodnictwa elektrycznego jej skroplin. Zanieczyszczenia te mogą przedostawać się do pary na drodze: fizycznego rozpuszczania soli w parze, mechanicznego porywania zanieczyszczeń do pary, termicznego rozpadu soli amonowych i węglanowych, hydrolitycznego rozpadu soli, pienienia się wody kotłowej. Ogólnie można przyjąć, że zawartość zanieczyszczeń w parze zależy bezpośrednio od stężenia i rodzaju zanieczyszczeń występujących w wodzie kotłowej. Zalecane parametry fizykochemiczne pary wodnej to [31, 33]:

- przewodność elektrolityczna (+25°C, za kolumną H⁺) < 0,2 [μS/cm];
- zawartość krzemionki (SiO₂) < 0,020 [mg/kg pary wodnej];
- zawartość żelaza ogólnego (Fe) < 0,020 [mg/kg pary wodnej];

- zawartość miedzi ogólnej (Cu) < 0,003 [mg/kg pary wodnej];
- zawartość sodu (Na) < 0,010 [mg/kg pary wodnej].

Doświadczenia z eksploatacji siłowni parowych w elektrowniach krajowych wskazują, że stosowanie aminowych preparatów korekcyjnych, rozcieńczanych kondensatem, przyczyniło się do powstania zjawiska „samoistnego oczyszczania się” rurek mosiężnych z osadów tlenkowych po stronie parowej skraplacza. Osady te stawały się luźne w swojej strukturze oraz łatwo usuwalne z powierzchni wymiany ciepła; jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie przegród, na odcinku kilkunastu centymetrów, były jeszcze twarde, ściśle przylegające i trudno usuwalne. W bloku energetycznym, w którym nie zastosowano korekcji aminowej, osady tlenkowe powstałe po stronie parowej skraplacza, na całej długości rurek, były twarde i trudno usuwalne [27].

PODSUMOWANIE

Zmniejszanie energochłonności systemów w szeroko rozumianej technice cieplnej stanowi obecnie jedno z głównych kryteriów zasady poszanowania energii. Zadanie to ściśle koreluje z sozologicznym podejściem w projektowaniu i eksploatacji współczesnych okrętowych i lądowych siłowni parowych. Jednym ze sposobów wzrostu ich sprawności jest racjonalne projektowanie podukładów cieplnych, m.in. wymienników ciepła. Istotny cel optymalnego projektowania tych wymienników stanowi minimalizacja wszystkich oporów cieplnych, co jest równoznaczne z intensyfikacją zjawisk wymiany ciepła.

Modele matematyczne wspomagające projektowanie wymienników ciepła w siłowniach parowych zawierające cechy tzw. degradacji termicznej, które biorą pod uwagę mechanizmy tworzenia się różnych rodzajów zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła, nie zostały jeszcze dostatecznie rozpoznane. Stąd do budowy takich modeli niezbędna jest znajomość właściwości osadów oraz mechanizmów ich powstawania na powierzchniach wymiany ciepła. Wiedza ta przydaje się również w trakcie eksploatacji wymienników ciepła, tj. w diagnostyce cieplno-przepływowej, oraz w pracach remontowych tych aparatów, np. w modyfikacji metod usuwania osadów z powierzchni wymiany ciepła.

LITERATURA

1. Barcewicz K., *Ćwiczenia laboratoryjne z chemii paliw, smarów i wody*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 2001.
2. Bednarek G., Maciejko M., *Reżim chemiczny stosowany w eksploatacji bloków energetycznych o mocy 360 MW w Elektrowni Belchatów*, Energetyka, 2003, vol. XLVIII, nr 5, s. 309–321.
3. Brahim F., Augustin W., Bohnet M., *Numerical simulation of the fouling structured heat transfer surfaces*, [in:] *ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. Fundamentals and Applications*, Santa Fe 2003.

4. Brodowicz K., *Teoria wymienników ciepła i masy*, PWN, Warszawa 1982.
5. Butrymowicz D., Hajduk T., *Zagadnienia degradacji termicznej wymienników ciepła*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 2006, R. XIII, nr 3(121), s. 111–117.
6. Butrymowicz D., *Influence of fouling and inert gases on the performance of regenerative feedwater heaters*, Archives of Thermodynamics, 2001, vol. 23, no. 1–2, p. 127–140.
7. Carpentier H., McCrean L., Lister D.H., *Deposition of corrosion product particles onto heat exchange surfaces in bulk boiling*, [in:] *Heat Exchanger Fouling. Fundamental Approaches & Technical Solutions*, H. Müller-Steinhagen (ed.), Publico Publications, Essen 2002.
8. Chmielniak T., *Technologie energetyczne*, WNT, Warszawa 2008.
9. Cowbourne M.A., Lester D.A., Bott T.R., *The effectiveness of environmentally friendly biocides and biocides*, [in:] *Heat Exchanger Fouling. Fundamental Approaches & Technical Solutions*, H. Müller-Steinhagen (ed.), Publico Publications, Essen 2002.
10. Dobosiewicz J., *Awaryjność skraplaczy turbin parowych*, Energetyka, 1994, vol. XLVIII, nr 11(485), s. 404–405.
11. Dobosiewicz J., *Korozja mosiężnych rurek skraplaczy od strony pary wodnej*, Energetyka, 1996, vol. L, nr 5(503), s. 300–301.
12. Epstein N., *Particle deposition and its mitigation*, [in:] *Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation*, T.R. Bott (ed.), Begell House, Inc., New York (USA) 1999.
13. Filipczyk K., Bania A., *Chemiczne oczyszczanie regeneracyjnych podgrzewaczy wysokoprężnych z osadów eksploatacyjnych*, Energetyka, 1999, vol. LIII, nr 3, s. 152–154.
14. Giebień R., *Biokorozja w energetyce*, Energetyka, 2002, nr 8, s. 579–586.
15. Górski Z., *Budowa i działanie okrętowych wymienników ciepła. Construction and working of marine heat exchangers*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2007.
16. Hajduk T., *Woda w obiegach chłodzących skraplaczy urządzeń chłodniczych*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 2004, R. XI, nr 5, s. 177–180.
17. Hobler T., *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa 1986.
18. Knudsen J.G., *Fouling in heat exchangers*, [in:] *Handbook of Heat Exchanger Design*, G.F. Hewitt (ed.), Begell House, Inc., New York 1992.
19. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, WNT, Warszawa 1997.
20. Łodej M., *Nowa metoda chemicznego oczyszczania regeneracyjnych podgrzewaczy wysokoprężnych po stronie parowej*, Energetyka, 2002, nr 10/11, s. 809–811.
21. Maciejko M., Twardowski S., *Metoda oczyszczania skraplaczy turbinowych z osadów eksploatacyjnych*, Energetyka, 1991, vol. XLV, nr 10(448), s. 363–365.
22. Marecki J., *Podstawy przemian energetycznych*, WNT, Warszawa 1995.
23. Melo L.F., *An overview of biofouling: from basic science to mitigation*, [in:] *Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation*, T.R. Bott (ed.), Begell House, Inc., New York 1999.
24. Mizielińska K., Olszak J., *Parowe źródła ciepła*, WNT, Warszawa 2013.
25. Mwaba M.G., Rindt C.C.M., Vorstman M.A.G., Steenhoven van A.A., *Calcium sulfate deposition on a heated plate and removal characteristics*, [in:] *Heat Exchanger Fouling. Fundamental Approaches & Technical Solutions*, H. Müller-Steinhagen (ed.), Publico Publications, Essen 2002.
26. Olszowiec P., *Mikrobiologia w walce z korozją*, Energetyka, 2001, nr 3, s. 162.
27. Piecha A., *Korekcja czynnika obiegowego bloków energetycznych*, Energetyka, 1998, vol. LII, nr 12(534), s. 104–108.
28. Prisyazhniuk V.A., *Prognosticating scale-forming properties of water*, Applied Thermal Engineering, 2007, vol. 27, s. 1637–1641.
29. Rusowicz A., *Analiza powstających osadów w rurach skraplacza energetycznego*, [w:] *XII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy*, t. 2, Kraków 2004.
30. Skwara J., *Występowanie krzemionki koloidalnej w wodach naturalnych i jej usuwanie z wody uzdatnianej dla celów energetycznych*, Energetyka, 2005, nr 11, s. 802–808.

31. Stańda J., *Woda do kotłów parowych i obiegów siłowni cieplnych*, WNT, Warszawa 1999.
32. Szargut J., *Ekologiczne uwarunkowania energetyki*, Energetyka, 1993, vol. XLVII, nr 1(463), s. 378–383.
33. Śliwa A., *Wpływ stopnia czystości pary na procesy korozyjne występujące w części przepływowej turbiny*, Energetyka, 2003, nr 6, s. 407–410.
34. Taborek J., *Effects of Fouling on Marine Condenser Design*, [in:] *Power Condenser Heat Transfer Technology*, P.J. Marto, R.H. Nunn (eds), Hemisphere Publishing Co., 1981.
35. Trela M., Butrymowicz D., Matysko R., *Diagnostic of Flow and Thermal Processes in Power Plant Heat Transfer Equipment*, [in:] *Diagnostics of New-Generation Thermal Power Plants*, T. Chmielniak, M. Trela (eds), The Szewalski Institute of Fluid-Flow Machinery Polish Academy of Sciences, Gdańsk 2008.
36. Twardowski S., Maciejko M., Kozupa M., *Nowoczesne środki aminowe do korekcji czynnika roboczego w obiegach bloków energetycznych*, Energetyka, 2000, vol. LIV, nr 9, s. 75–79.
37. Zbroińska-Szczechura E., Dobosiewicz J., *Diagnostyka materiałowa i cieplna skraplaczy*, Energetyka, 2000, vol. LIV, nr 3(549), s. 122–124.

THE PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS OF FOULING PRESENCE WITHIN THE HEAT TRANSFER SURFACES OF THE STEAM POWER PLANTS' HEAT EXCHANGERS

Summary

The article describes sorts of the fouling can build up on the heat exchange surfaces within the marine power plants and the stationary ones and is devoted to the presence of solid impurities i.e. deposits, in particular. The differences between properties of the deposits and the deposits forming phenomena on the water and steam side of the heat transfer surfaces has been taken into consideration. Furthermore, it was focused on the specific properties of biological fouling, which in some cases may cause the desired operational effects, e.g. slowing down the heat exchange surface corrosion process. There was also presented some recommended physicochemical properties for water used as a working medium within the marine and the stationary power plants, in the paper.

Keywords: *the steam power plants, condensers, low and high pressure heat recovery exchangers, heat transfer surface fouling, water treatment for the steam power plants.*