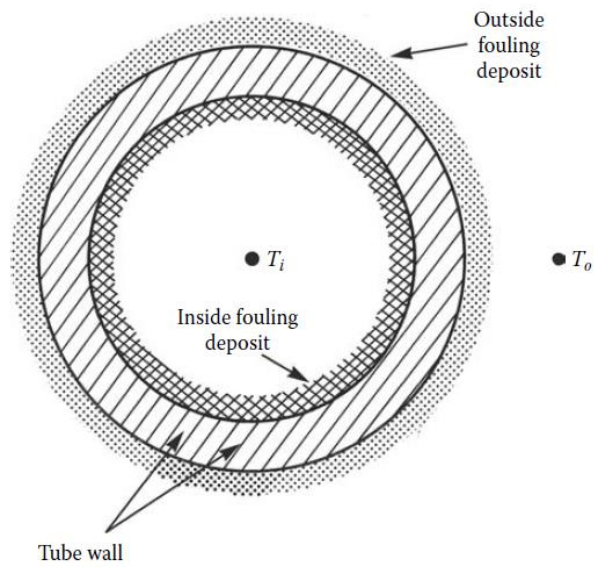


Osadzanie się zanieczyszczeń na powierzchniach wewnętrznych wymienników

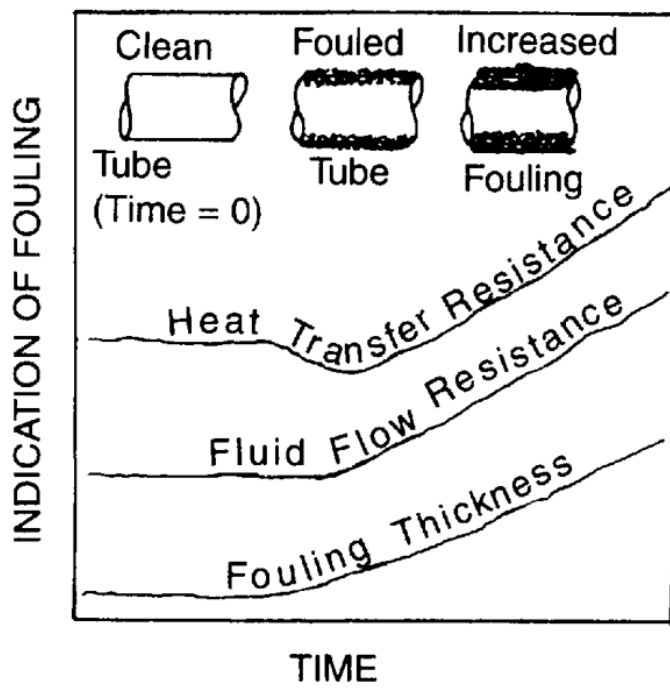
1. Wstęp

Podczas pracy wymiennika ciepła często dochodzi do osadzania się substancji stałych lub gęstych płynów w jego wnętrzu, w tym na powierzchniach wymiany ciepła. Zanieczyszczenia zgromadzone na powierzchniach wymiany ciepła zwiększają opór cieplny przewodzenia przez przegrodę. Zanieczyszczenia te także zmniejszają przekroje poprzeczne kanałów, którymi przepływają czynniki, powodując wzrost oporów przepływu. Przyczyną zwiększonego spadku ciśnienia w kanałach mogą być też właściwości zanieczyszczeń pokrywających wewnętrzne powierzchnie wymiennika. Gromadzenie się zanieczyszczeń w wymienniku może powodować konieczność jego okresowego wyłączenia z eksploatacji i czyszczenia.

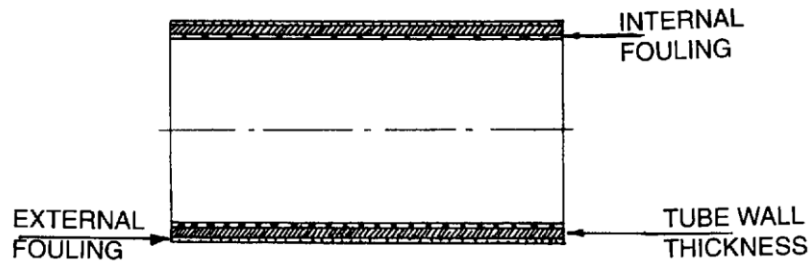
Możliwość gromadzenia się zanieczyszczeń w wymienniku wpływa na wybór typu i konstrukcji wymiennika. Wymiennik powinien być tak skonstruowany, aby można było go okresowo wyczyścić: szybko, tanio i dokładnie.



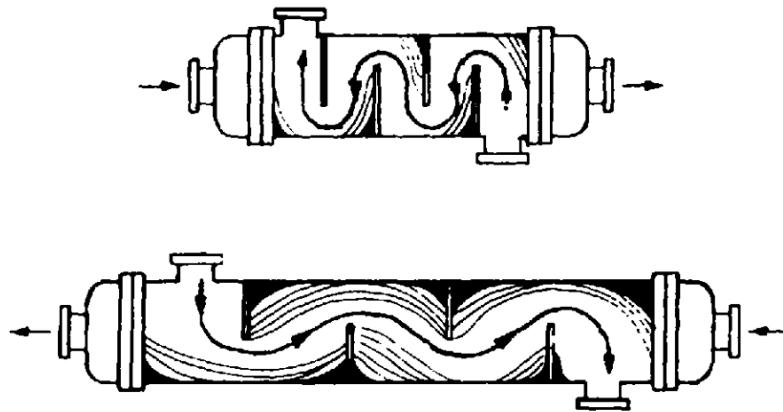
Rys. 1-1. Rurka zanieczyszczona wewnątrz i na zewnątrz.



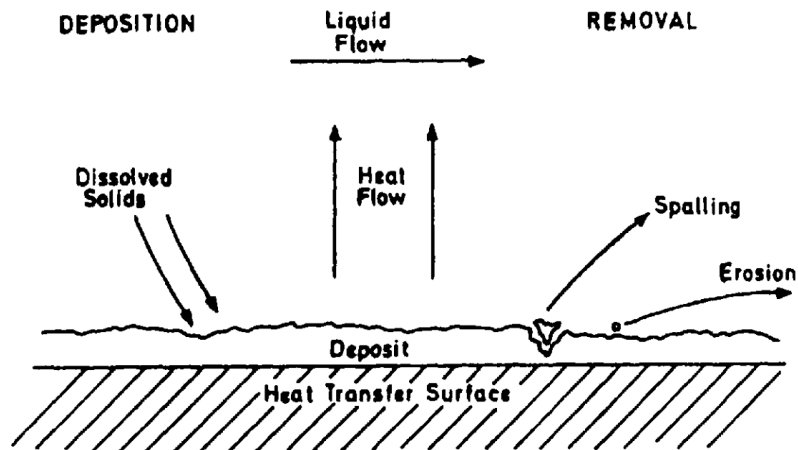
Rys. 1-1a. Skutki zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła.



Rys. 1-1b. Odkładanie się zanieczyszczeń na powierzchniach wymiany ciepła.



Rys. 1-1c. Odkładanie się zanieczyszczeń w wymiennikach z przegrodami segmentowymi.



Rys. 1-1d. Schemat zanieczyszczenia i samooczyszczania powierzchni wymiany ciepła.

2. Typy zanieczyszczeń powierzchni wymiany ciepła

- Zanieczyszczenia cząstkami stałymi zawieszonymi (zawartymi) w płynach.
- Zanieczyszczenie produktami reakcji chemicznych, w których nie uczestniczy powierzchnia wymiany ciepła.
- Zanieczyszczenie wskutek korozji powierzchni wymiany ciepła.
- Zanieczyszczenie produktami krystalizacji zanieczyszczeń mineralnych rozpuszczonych w płynie.
- Zanieczyszczenie wskutek osadzania się i rozwoju organizmów – osady biologiczne.
- Zanieczyszczenie wskutek osadzania się produktów krzepnięcia lub zamarzania.

Przykłady zanieczyszczeń

Zanieczyszczenia cząstkami stałymi

Gdy chłodziwem jest woda pochodząca z rzeki, jeziora lub morza, może ona zawierać piasek, błoto, muł i inne osady, które odkładają się na powierzchni wymiany ciepła. Na powierzchni wymiany ciepła odkłada się też sadza, którą zawierają gazy spalinowe oraz różnego rodzaju pyły zawarte w powietrzu.

Zanieczyszczenie produktami reakcji chemicznych

Typowe przykłady to stałe produkty koksowania olejów w wysokich temperaturach i produkty polimeryzacji węglowodorów również w wysokich temperaturach. Produkty tych procesów osadzają się na powierzchniach wymiany ciepła wymienników.

Zanieczyszczenie wskutek korozji

Powierzchnia wymiany ciepła reaguje z tlenem, który jest rozpuszczony w czynniku omywającym tę powierzchnię, tworząc tlenki. Np. na powierzchni stalowej powstają tlenki żelaza.

Zanieczyszczenie produktami krystalizacji

Ten typ zanieczyszczeń występuje przede wszystkim w instalacjach wodnych, gdzie rozpuszczone w wodzie sole, przede wszystkim węglany wapnia, krystalizują w wysokich temperaturach i osadzają się na powierzchniach wymiany ciepła.

Zanieczyszczenie osadami biologicznymi

Zanieczyszczenia tego typu występują przede wszystkim w układach chłodzenia, gdzie czynnikiem chłodzącym jest woda pobierana bezpośrednio z rzeki, jeziora, czy morza. Zanieczyszczenia te mogą być mikroorganizmami, np.: bakteriami, glonami, grzybami, itp. lub makroorganizmami, np.: wodorostami, gąbkami, rybami, itp.

Zanieczyszczenie produktami krzepnięcia lub zamarzania

Zanieczyszczenia tego typu pojawiają się na powierzchniach niskotemperaturowych wskutek krzepnięcia lub zamarzania na nich cieczy. Przykładami tego zjawiska mogą być np.: skraplanie się pary wodnej zawartej w powietrzu na powierzchni wymiany ciepła i zamarzanie wykroplonej wody, zamarzanie wody chłodzącej na powierzchni wymiany ciepła, wydzielanie się parafiny z węglowodorów.

3. Wpływ zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła na przenikanie ciepła

Strumień przenikającego ciepła dla wymiennika czystego

$$Q = A_z k_z \Delta T_{sr} \quad (3.1)$$

gdzie indeks z oznacza zewnętrzną powierzchnię wymiany ciepła.

Strumień przenikającego ciepła dla wymiennika zanieczyszczonego

$$Q_b = A_{zb}k_{zb}\Delta T_{srb} \quad (3.2)$$

Współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika zanieczyszczzonego

$$\frac{1}{k_{zb}} = \frac{1}{k_z} + R_b \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.3)$$

gdzie R_b jest całkowitym oporem cieplnym wynikającym z obecności zanieczyszczeń po dwóch stronach przegrody

$$R_b = \frac{A_z}{A_w} \times R_{bw} + R_{bz} \quad (3.4)$$

Aby przez zanieczyszczoną przegrodę przepływał taki sam strumień ciepła, jak w przypadku przegrody czystej, prawe strony równań (3.1) oraz (3.2) muszą być równe

$$A_z k_z \Delta T_{sr} = A_{zb} k_{zb} \Delta T_{srb} \quad (3.5)$$

Ponadto procesy technologiczne zazwyczaj wymagają, aby temperatury wlotowe i wylotowe czynników były jednakowe w wymienniku czystym i zanieczyszczonym. Stąd

$$\Delta T_{sr} = \Delta T_{srb} \quad (3.6)$$

Stąd

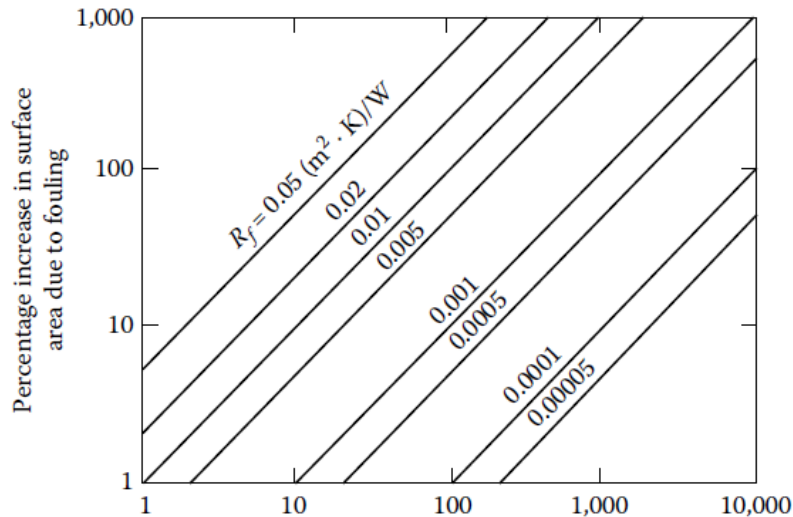
$$\frac{A_{zb}}{A_z} = \frac{k_z}{k_{zb}} \quad (3.7)$$

Po pomnożeniu równania (3.3) stronami przez k_z dostajemy

$$\frac{k_z}{k_{zb}} = 1 + k_z R_b \quad (3.8)$$

Po podstawieniu prawej strony równania (3.8) do równania (3.7) otrzymujemy

$$\frac{A_{zb}}{A_z} = 1 + k_z R_b \quad (3.9)$$



Współczynnik przenikania ciepła dla powierzchni czystej, k_z , W/(m²K)

Rys. 3-1. Wpływ zanieczyszczeń na wielkość wymaganej powierzchni wymiany ciepła. Na rysunku R_b jest oznaczone jako R_f .

Współczynnik przenikania ciepła odniesiony do zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła dla rurki zanieczyszczonej po wewnętrznej i zewnętrznej stronie można obliczyć z równania

$$\frac{1}{k_{zb}} = \frac{A_z}{A_w \alpha_w} + \frac{A_z R_{bw}}{A_w} + \frac{A_z \ln(d_z/d_w)}{2\pi\lambda L} + R_{bz} + \frac{1}{\alpha_z} \quad (3.10)$$

Opór cieplny przewodzenia zanieczyszczeń osadzonych na:

- ściance płaskiej

$$R_b = \frac{\delta_b}{\lambda_b} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.11)$$

- wewnętrznej powierzchni ścianki cylindrycznej

$$R_{bw} = \frac{d \ln(d/d_{bw})}{2\lambda_{bw}} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.12)$$

- zewnętrznej powierzchni ścianki cylindrycznej

$$R_{bz} = \frac{D_{bz} \ln(D_{bz}/D_z)}{2\lambda_{bz}} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.13)$$

Tablica 3-1. Całkowity opór przewodzenia ciepła przez warstwy zanieczyszczeń wewnątrz i na zewnątrz rurki, $R_b \times 10^4$, m^2K/W

Tube Side	Shell Side		
	Vapor	Liquid	Two Phase
Vapor	3.7	5.1	4.8
Liquid	6.0	7.9	6.5
Two phase	5.1	6.7	5.1

Tablica 3-2. Wymagana dodatkowa powierzchnia wymiany ciepła z powodu zanieczyszczeń powierzchni wymiany ciepła

Shell Side (Boiling or Condensation)	h_o	$R_{ft} \times 10^4$	U_c	U_f	Increase in Area (%)
<i>Tube side: gas at very low pressure; $h_i = 50 W/m^2 \cdot K$</i>					
Medium organics	1,000	4.8	47.6	46.5	2.3
Water, low pressure	5,000	4.8	49.5	48.4	2.4
Water, high pressure	10,000	4.8	49.8	48.6	2.4
<i>Tube side: gas at high pressure; $h_i = 500 W/m^2 \cdot K$</i>					
Light organics	1,000	4.8	333.3	287.3	16.0
Medium organics	5,000	4.8	454.5	373.1	21.8
Steam	10,000	4.8	476.2	387.6	22.9
<i>Tube side: medium organic liquids; $h_i = 1,000 W/m^2 \cdot K$</i>					
Medium organics	1,000	6.5	500.0	377.4	32.5
Water, low pressure	5,000	6.5	833.3	540.5	54.2
Water, high pressure	10,000	6.5	909.1	571.4	59.1
<i>Tube side: water; $h_i = 5,000 W/m^2 \cdot K$</i>					
Light organics	1,000	6.5	833.3	287.3	54.2
Medium organics	5,000	6.5	2500.0	373.1	162.5
Water	10,000	6.5	3333.3	387.6	216.7

h_o, h_i – współczynniki wnikania ciepła odpowiednio od strony płaszczka i rurek

R_{ft} – całkowity opór cieplny zanieczyszczeń

U_c, U_f – współczynniki przenikania ciepła odpowiednio dla czystej i zanieczyszczonej powierzchni wymiany ciepła

4. Wpływ zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła na opory hydrauliczne

Spadek ciśnienia w rurce spowodowany tarciem można obliczyć ze wzoru

$$\Delta p = 4f \left(\frac{L}{d_w} \right) \frac{\rho w^2}{2} \quad (4.1)$$

gdzie f jest współczynnikiem tarcia *Fanninga*.

Strumień czynnika w rurce można obliczyć z zależności

$$m = \frac{\pi d^2}{4} w \rho \quad (4.2)$$

Warstwa zanieczyszczeń wewnątrz rurki powoduje zmniejszenie wewnętrznej średnicy rurki i najczęściej zwiększa chropowatość wewnętrznej powierzchni rurki. Związek pomiędzy spadkiem ciśnienia w rurce zanieczyszczonej i rurce niezanieczyszczonej jest następujący

$$\frac{\Delta p_b}{\Delta p} = \frac{f_b}{f} \frac{d}{d_b} \left(\frac{w_b}{w} \right)^2 \quad (4.3)$$

Zakładamy, że strumień czynnika w rurce zanieczyszczonej i niezanieczyszczonej jest taki sam

$$m = \frac{\pi d^2}{4} w \rho = \frac{\pi d_b^2}{4} w_b \rho \quad (4.4)$$

Stąd

$$\frac{w_b}{w} = \frac{d^2}{d_b^2} \quad (4.5)$$

Podstawiamy teraz prawą stronę równania (4.5) do równania (4.3) otrzymując

$$\frac{\Delta p_b}{\Delta p} = \frac{f_b}{f} \left(\frac{d}{d_b} \right)^5 \quad (4.6)$$

Tablica 4-1. Wzrost spadku ciśnienia wewnątrz rurki o średnicy wewnętrznej 22,1 mm, zanieczyszczonej różnymi materiałami

Material	Thermal Conductivity (W/m · K)	Fouling ^a Thickness, <i>t</i> (mm)	Area Remaining (%)	Increase in Pressure Drop (%)
Hematite	0.6055	0.24	95.7	11.6
Biofilm	0.7093	0.28	95.0	13.7
Calcite	0.9342	0.37	93.5	18.4
Serpentine	1.0380	0.41	92.8	20.7
Gypsum	1.3148	0.51	90.9	26.9
Magnesium phosphate	2.1625	0.83	85.5	47.9
Calcium sulphate	2.3355	0.90	84.4	52.6
Calcium phosphate	2.5950	0.99	82.9	59.9
Magnetic iron oxide	2.8718	1.09	81.2	68.2
Calcium carbonate	2.9410	1.12	80.8	70.3

Hematite – hematyt – tlenek żelaza

Calcite - kalcyt – węglan wapnia

Serpentine - serpentyna, uwodniony krzemian magnezu

Magnesium phosphate – fosforan magnezu

Calcium sulphate – siarczan wapnia

Calcium phosphate - fosforan wapniowy

Calcium carbonate – węglan wapnia

Wyniki przedstawione w tablicy 4-1 uzyskano przy założeniu

oporu cieplnego zanieczyszczenia $R_b = 4 \times 10^{-4} m^2 K / W$.

5. Zapobieganie zanieczyszczeniom

Zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła cząstkami stałymi zawieszonymi (zawartymi) w płynach można ograniczyć stosując filtrowanie płynów przed wlotem do wymiennika. Proces filtracji można wzmocnić stosując flokulanty, czyli

substancje łączące zanieczyszczenia w większe skupiska co ułatwia ich wychwycenie przez filtry. W samym wymienniku można zastosować dyspergatory, które zapobiegają agregacji cząstek, i w ten sposób zmniejszają ilość cząstek zawieszin osiadających na powierzchni wymiany ciepła.

Zanieczyszczenie produktami reakcji chemicznych można ograniczyć poprzez niedopuszczenie do nadmiernego przegrzania powierzchni wymiany ciepła. W przypadku węglowodorów należy ograniczyć ich kontakt z tlenem, wyeliminowanie lub ograniczyć zawartość węglowodorów nienasyconych, usunąć związki siarki i sole.

Zanieczyszczenie powierzchni wymiany ciepła wskutek jej korozji można całkowicie uniknąć stosując odpowiednie niekorodujące materiały. Korozję można zmniejszyć stosując różnego rodzaju substancje tworzące filmy zabezpieczające powierzchnie metaliczne. Korozję można ograniczyć usuwając tlen z czynnika (o ile tlen nie jest integralnym składnikiem czynnika, jak to ma miejsce w przypadku powietrza).

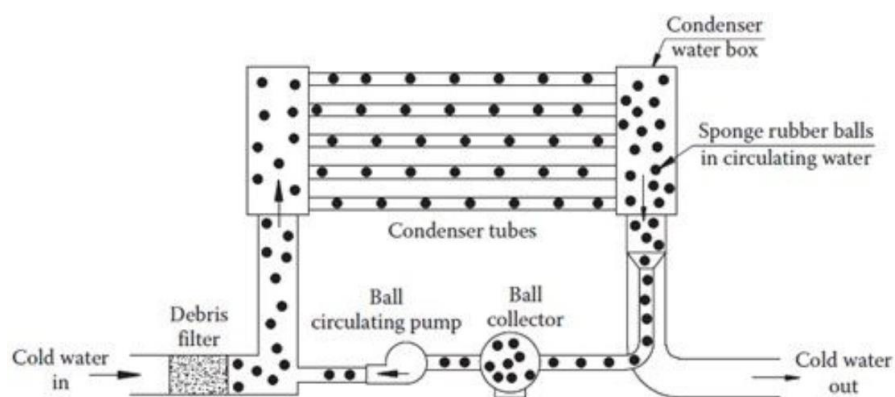
Zanieczyszczenie produktami krystalizacji związków mineralnych rozpuszczonych w płynie dotyczy przede wszystkim wody. Zapobieganie powstawaniu osadów polega głównie na dodawaniu do wody odpowiednich chemikaliów, np. kwasów i polifosforanów.

Tworzeniu się osadów biologicznych zapobiega stosowanie chloru i inne biocydów.

Zanieczyszczenia wskutek osadzania się produktów krzepnięcia lub zamarzania można uniknąć nie dopuszczając do zbyt niskiej temperatury powierzchni wymiany ciepła. Temperaturę ścianki można podwyższyć stosując przepływ współprądowy zamiast przeciwnieprądowego.

6. Metody czyszczenia wymienników ciepła

Stosuje się metody mechaniczne (szczotki, kulki gumowo-gąbczaste), ultradźwiękowe, hydrauliczne (woda pod wysokim ciśnieniem), pneumatyczne, a także połączenia tych metod, np. czyszczenie mechaniczno-hydrauliczne.



Rys. 6.1. Czyszczenie wewnętrznych powierzchni rurek skraplacza kulkami gumowo-gąbczastymi.