

Paweł REGUCKI*, Barbara ENGLER**

ANALIZA ZMIAN STĘŻENIA SIARCZANÓW W ZAMKNIĘTYM OBIEGU WODY CHŁODZĄCEJ BLOKU ENERGETYCZNEGO

W pracy przedstawiono model matematyczny opisujący zmianę stężenia jonów siarczanowych SO_4^{2-} w zamkniętym obiegu wody chłodzącej bloku energetycznego. Analizowana instalacja obejmuje układ chłodzenia, w skład którego wchodzi: skraplacze bloków energetycznych oraz chłodnie kominowe połączone systemem kanałów ssących i kolektorów tłocznych. Cyrkulująca w układzie woda jest podgrzewana w kondensatorze na skutek odbioru ciepła skraplania z pracującej pary wodnej za ostatnim stopniem turbiny, a następnie schładzana w chłodni kominowej. Głównym mechanizmem wymiany ciepła w chłodni jest częściowe odparowanie przepływającej przez nią wody, co powoduje jednak wzrost zawartości związków chemicznych w cyrkulującej wodzie. Jest to efekt niekorzystny, ponieważ nadmierny wzrost stężenia jonów siarczanowych SO_4^{2-} w obiegu może powodować korozję betonowych części przewodów oraz elementów konstrukcyjnych chłodni. Jedynym mechanizmem umożliwiającym obniżenie w obiegu chłodzącym stężenia niepożądanych związków chemicznych jest okresowy zrzut części wody do przyzakładowej oczyszczalni ścieków. Zgodnie z najnowszymi rozporządzeniami prawnymi; Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 roku oraz dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych [1], od początku roku 2016 obowiązują nowe limity dotyczące składu chemicznego ścieków technologicznych kierowanych do zbiorników naturalnych, które wymuszają planową i oszczędną gospodarkę wodno-ściekową przedsiębiorstwa. Prezentowany model matematyczny umożliwia przewidywanie dobowego wzrostu stężenia jonów siarczanowych SO_4^{2-} w obiegu wodnym kondensatory – chłodnie kominowe oraz pozwala określić optymalny strumień objętości odprowadzanych ścieków ze względu na aktualną konfigurację pracy bloków energetycznych elektrowni zawodowej.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, pawel.regucki@pwr.edu.pl.

** Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, barbara.engler@pwr.edu.pl.

1. WPROWADZENIE

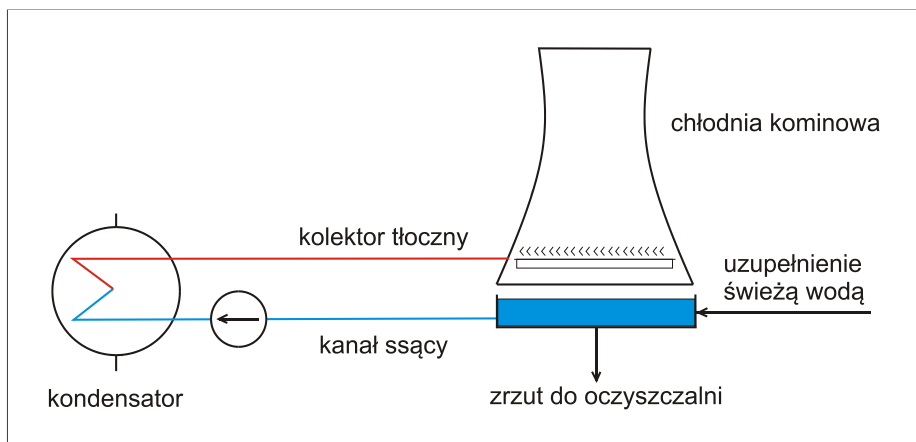
W elektrowniach zawodowych i elektrociepłowniach woda jest powszechnie wykorzystywana w szeregu procesach technologicznych obejmujących między innymi: obieg wodno-parowy kotła energetycznego, układ chłodzący boku energetycznego, instalacje chłodzące urządzenia pomocnicze kotła czy układ oczyszczania spalin. Każdy z wymienionych procesów technologicznych wymaga zapewnienia dostaw wody o odpowiednich własnościach fizyko-chemicznych w celu utrzymania ciągłości wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej [3]. Prawidłowa gospodarka wodno-ściekowa przedsiębiorstwa musi uwzględniać najnowsze rozporządzenia prawne; Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 roku oraz dyrektywę Unii Europejskiej [1], które nakładają z początkiem roku 2016 nowe limity dotyczące składu fizykochemicznego ścieków technologicznych kierowanych do zbiorników naturalnych. Wprowadzone ograniczenia mają szczególne znaczenie dla elektrowni zawodowych, ponieważ dobowe zapotrzebowanie na świeżą wodę w tych zakładach nierzadko sięga kilkudziesięciu tysięcy m³. Powoduje to, że są one lokalizowane przy rzekach, naturalnych jeziorach lub zbiornikach retencyjnych, do których odprowadzane są również ścieki przemysłowe w ilości od kilku do kilkunastu tysięcy m³ na dobę.

Szczególnym ważnym elementem bloku energetycznego, z punktu widzenia gospodarki wodno-ściekowej, jest zamknięty układ chłodzenia w skład którego wchodzi: skraplacze bloków energetycznych oraz chłodnie kominowe połączone systemem kanałów ssących i kolektorów tłocznych. Cyrkulująca w układzie woda najpierw jest podgrzewana w kondensatorze w skutek odbioru ciepła skraplania kondensującej pary wodnej za ostatnim stopniem turbiny, a następnie schładzana w chłodni kominowej. Głównym mechanizmem wymiany ciepła w chłodni jest częściowe odparowanie przepływającej przez nią wody, co powoduje jednak wzrost zawartości związków chemicznych w cyrkulującej wodzie. Jest to efekt niekorzystny, ponieważ na przykład nadmierny wzrost stężenia jonów siarczanowych SO₄²⁻ w obiegu może powodować korozję betonowych części przewodów oraz elementów konstrukcyjnych chłodni, zaś wzrost stężenia soli wapnia może przyspieszać proces ich odkładania na powierzchniach wymienników pogarszając tym samym proces wymiany ciepła [2, 4].

Prostym mechanizmem umożliwiającym obniżenie w obiegu chłodzącym zawartości niepożądanych związków chemicznych jest okresowy zrzut części wody do przyzakładowej oczyszczalni ścieków. W artykule przedstawiono matematyczny model opisujący dobowe zmiany stężenia jonów siarczanowych SO₄²⁻ w obiegu wodnym kondensatory – chłodnie kominowe. Zaprezentowane wyniki obliczeń pozwalają przewidywać dobowe zmiany stężenia siarczanów w zależności od strumienia objętości wody świeżej dostarczanej do układu oraz ilości odprowadzanych ścieków. Umożliwia to wyznaczenie optymalnego strumienia objętości odprowadzanych ścieków ze względu na aktualną konfigurację pracy bloków energetycznych elektrowni zawodowej.

2. ZAMKNIĘTY UKŁAD CHŁODZENIA BLOKU ENERGETYCZNEGO

Integralną częścią obiegu wodno-parowego kotła jest skraplacz, w którym zachodzi proces kondensacji pary wodnej z ostatniego stopnia turbiny [3]. Strumienie objętości wody chłodzącej przepływającej przez kondensator wynoszą, w zależności od mocy cieplnej kotła, od kilku do nawet kilkudziesięciu tysięcy m^3/h . Ze względu na specyficzny układ hydrologiczny głównych rzek Polski oraz brak dużych zbiorników wodnych, w przeważającej większości elektrociepłowni i elektrowni zawodowych stosowane jest rozwiązanie oparte na zamkniętym układzie obiegu wody chłodzącej. Podgrzana w skraplaczu woda jest ponownie schładzana w chłodniach kominowych lub wentylatorowych, głównie poprzez jej częściowe odparowanie. Wykorzystanie w procesie wymiany ciepła przejścia fazowego jest bowiem jednym z najefektywniejszych mechanizmów schładzania ciecży. Poglądowy schemat zamkniętego układu wody chłodzącej został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Poglądowy schemat zamkniętego układu wody chłodzącej

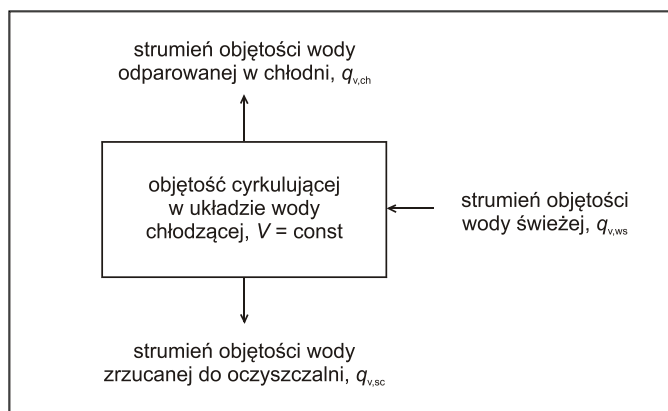
3. MATEMATYCZNY MODEL ZMIAN STĘŻENIA SIARCZANÓW W ZAMKNIĘTYM UKŁADZIE CHŁODZENIA

Przewidywanie zmian stężenia siarczanów w zamkniętym obiegu chłodzenia ma istotne znaczenie z punktu widzenia przestrzegania dopuszczalnych norm emisji ścieków, jak również optymalnego prowadzenia gospodarki wodno-ściekowej elektrowni. W tym celu monitoruje się wartości stężenia jonów SO_4^{2-} w różnych punktach pomiarowych układu. Głównym czynnikiem powodującym wzrost stężenia siarczanów w zamkniętym układzie chłodzenia jest proces częściowego odparowania wody chłodzącej w chłodni kominowej. Szacuje się, że w trakcie przepływu przez chłodnię kominową odparowuje około 1% masy

przepływającej wody chłodzącej. Jeżeli zatem w zespole chłodni całkowity strumień objętości cyrkulującej wody chłodzącej wynosi np. 200 tys. m³/h, to w ciągu doby z układu ubywa w przybliżeniu 48 tys. m³ wody. Ponadto, w celu utrzymania w układzie prawidłowego stężenia jonów SO₄²⁻, następuje rzut wody do przyzakładowej oczyszczalni w ilości około 5 tys. m³/d. Opisane ubytki uzupełniane są na bieżąco wodą świeżą w ilości 53 tys. m³/d tak, aby całkowita objętość wody chłodzącej cyrkulującej w układzie pozostała stała.

Bilansując zmianę stężenia jonów SO₄²⁻ w układzie należy uwzględnić procesy schematyczne przedstawione na rysunku 2 (przyjęto strumienie objętości wody w m³/d, stężenia siarczanów w mg/l):

- odparowanie wody w chłodniach kominowych, $q_{v,ch}$,
- zrzut wody chłodzącej do przyzakładowej oczyszczalni ścieków, $q_{v,sc}$,
- uzupełnianie układu wodą świeżą, $q_{v,ws}$.



Rys. 2. Poglądowy bilans wody chłodzącej w zamkniętym układzie wody chłodzącej

Ponieważ w zamkniętym układzie chłodzenia całkowita objętość cyrkulującej wody chłodzącej pozostaje stała ($V = \text{const}$), poszczególne strumienie masy wody muszą się bilansować:

$$q_{v,ws} = q_{v,ch} + q_{v,sc} \quad (1)$$

Powyższa analiza strat i uzupełnień czynnika pozwala na sformułowanie równania różniczkowego opisującego dobową zmianę stężenia siarczanów w postaci:

$$V \cdot \frac{d x(t)}{dt} = -q_{v,sc} \cdot x(t) - q_{v,ch} \cdot x_{ch} + q_{v,ws} \cdot x_{ws} \quad (2)$$

gdzie: $x(t)$ - aktualne stężenie siarczanów w zamkniętym układzie chłodzenia, x_{ch} - stężenie siarczanów w parze wodnej powstającej w chłodni kominowej, x_{ws} - stężenie siarczanów w

wodzie świeżej doprowadzanej do układu. Równanie (2) można rozwiązać analitycznie przyjmując, że strumienie objętości: $q_{v,sc}$ i $q_{v,ch}$ oraz stężenia siarczanów: x_{ch} i x_{ws} pozostają stałe. Uproszczona postać (2) przyjmuje wówczas formę równania różniczkowe liniowego pierwszego rzędu:

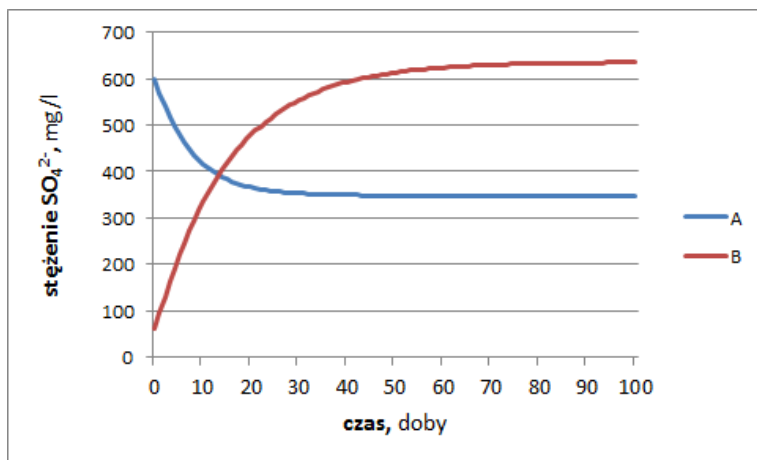
$$\frac{d x(t)}{dt} = -a \cdot x(t) + b \quad (3)$$

gdzie: $a = q_{v,sc}/V$, $b = (q_{v,ws}x_{ws} - q_{v,ch}x_{ch})/V$. Rozwiązaniem równania (3) jest funkcja określająca zależność stężenia jonów siarczanowych od czasu $x(t)$:

$$x(t) = \frac{b}{a} + \left(x_0 - \frac{b}{a} \right) e^{-at} \quad (4)$$

gdzie x_0 - początkowe stężenie jonów SO_4^{2-} w zamkniętym układzie chłodzenia. Stężenie siarczanów w wodach naturalnych wynosi od 40 do 60 mg/l zatem do modelu przyjęto stężenie siarczanów w wodzie świeżej $x_{ws} = 60$ mg/l, zaś para wodna emitowana z chłodni kominowej nie zawiera siarczanów ($x_{ch} = 0$ mg/l).

Przedstawione na rysunku 3 przykładowe rozwiązania wyznaczono przyjmując $q_{v,ch} = 48000$ m³/d dla całkowitej objętości wody w układzie chłodzenia $V = 76745$ m³.



Rys. 3. Przykładowe rozwiązania równania (4) dla przypadków: A – $x_0 = 600$ mg/l, $q_{v,sc} = 10$ tys. m³/d; B – $x_0 = 60$ mg/l, $q_{v,sc} = 5$ tys. m³/d

Analizując zaprezentowane rozwiązania można zauważyć, że dla strumienia objętości ścieków $q_{v,sc} = 10$ tys. m³/d krzywa A ma charakter malejący, zaś krzywa B, dla $q_{v,sc} = 5$ tys. m³/d, ma charakter rosnący. Wynika stąd, że można sterować stężeniem jonów

siarczanowych w zamkniętym układzie chłodzenia poprzez zmianę strumienia objętości odprowadzanych ścieków. Interesujący jest również fakt istnienia asymptotycznego rozwiązania $x(t)$ wskazujący, że nie jest możliwe dowolne obniżenie lub zwiększenie stężenia siarczanów w cyrkulującej wodzie przy zadanych parametrach strumieni objętości $q_{v,sc}$ i $q_{v,ch}$ (wartość strumienia $q_{v,ws}$ jest wówczas jednoznacznie określona na podstawie równania (1)). Dla krzywej A, przy $q_{v,sc} = 10$ tys. m^3/d , graniczna wartość stężenia jonów SO_4^{2-} wynosi $x_{gr} = 348$ mg/l, zaś dla krzywej B, parametryzowanej wartością $q_{v,sc} = 5$ tys. m^3/d , graniczna wartość stężenia jonów SO_4^{2-} wynosi $x_{gr} = 636$ mg/l. Asymptotyczne rozwiązanie x_{gr} funkcji $x(t)$ można wyznaczyć analitycznie obliczając granicę wyrażenia:

$$x_{gr} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{b}{a} + \left(x_0 - \frac{b}{a} \right) e^{-at} = \frac{b}{a} \quad (5)$$

Wyrażenie (b/a) upraszcza się przy założeniu, że $x_{ch} = 0$, do postaci:

$$x_{gr} = \frac{b}{a} = \frac{(q_{v,ws} \cdot x_{ws} - q_{v,ch} \cdot x_{ch})}{V} \cdot \frac{V}{q_{v,sc}} = \frac{q_{v,ws} \cdot x_{ws}}{q_{v,sc}} = \frac{(q_{v,sc} + q_{v,ch}) \cdot x_{ws}}{q_{v,sc}} \quad (6)$$

Z formuły (6) wynika, że graniczna wartość stężenia siarczanów x_{gr} , dla zadanych wartości: strumienia objętości odprowadzanych ścieków $q_{v,sc}$ oraz stężenia jonów siarczanowych w wodzie świeżej x_{ws} , jest parametryzowana tylko liczbą pracujących chłodni kominowych (a więc strumieniem objętości $q_{v,ch}$). Przykładowe wartości stężeń granicznych x_{gr} dla $q_{v,ch} = 48$ tys. m^3/d oraz wybranych wartości strumienia objętości $q_{v,sc}$ oraz stężeń jonów SO_4^{2-} x_{ws} zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe wartości stężeń granicznych x_{gr} dla wybranych wartości strumienia objętości $q_{v,sc}$ oraz stężeń jonów SO_4^{2-} w wodzie świeżej x_{ws} (przy ustalonym $q_{v,ch} = 48$ tys. m^3/d)

stężenie siarczanów x_{ws} , [mg/l]	40	45	50	55	60
strumień objętości ścieków $q_{v,sc}$, [m^3/d]					
5000	424	477	530	583	636
7500	296	333	370	407	444
10000	232	261	290	319	348
12500	194	218	242	266	290
15000	168	189	210	231	252

Najnowsze regulacje określają limit stężenia jonów SO_4^{2-} w wodzie chłodzącej, dla powierzchni chłodzonych o temperaturze poniżej 60 °C, na 500 mg/l [1]. Z danych przedstawionych w tabeli 1 (dla wartości strumienia objętości $q_{v,ch} = 48$ tys. m^3/d) wynika, że powyższy warunek spełniony jest w przypadku albo niskich stężeń siarczanów w wodzie

świeżej $x_{ws} < 50$ mg/l lub dużych strumieni objętości odprowadzanych ścieków $q_{v,sc} \geq 7500$ m³/d.

Przedstawiony w pracy model umożliwia również wyznaczenie strumienia objętości $q_{v,sc}$, dla którego graniczna wartość stężenia SO_4^{2-} wynosi $x_{gr} = 500$ mg/l. Przekształcając wyrażenie (6) otrzymujemy:

$$q_{v,sc} = \frac{q_{v,ch} \cdot x_{ws}}{(x_{gr} - x_{ws})} \quad (7)$$

Z formuły (7) wynika, że wartość $q_{v,sc}$ zależy tylko od strumienia objętości wody odparowanej w chłodni kominowej $q_{v,ch}$ oraz stężenia siarczanów w wodzie świeżej x_{ws} . W tabeli 2 zestawiono przykładowe wartości strumieni objętości odprowadzanych ścieków $q_{v,sc}$, dla których graniczna wartość stężenia SO_4^{2-} wynosi $x_{gr} = 500$ mg/l, parametryzowane wartościami: stężenia jonów SO_4^{2-} w wodzie świeżej i strumienia objętości $q_{v,ch}$.

Tabela 2. Przykładowe wartości strumieni objętości odprowadzanych ścieków $q_{v,sc}$, dla których graniczna wartość stężenia SO_4^{2-} wynosi $x_{gr} = 500$ mg/l, w zależności od stężenia jonów SO_4^{2-} w wodzie świeżej i strumienia objętości $q_{v,ch}$

stężenie siarczanów x_{ws} , [mg/l]	40	45	50	55	60
strumień objętości $q_{v,ch}$, [m ³ /d]					
9600	835	949	1067	1187	1309
19200	1670	1899	2133	2373	2618
28800	2504	2848	3200	3560	3927
38400	3339	3798	4267	4746	5236
48000	4174	4747	5333	5933	6545

Przedstawione w tabeli 2 dane pozwalają określić minimalną wartość strumienia objętości odprowadzanych ścieków zapewniającą utrzymanie stężenia siarczanów w zamkniętym układzie chłodzenia na poziomie wymaganym przez stosowne akty prawne. Opracowany model umożliwia przewidywanie wielkości strumienia odprowadzanych ścieków w zależności od aktualnej konfiguracji pracy bloków energetycznych. Znając bowiem wydajności pomp tłoczących wodę chłodzącą do kondensatorów poszczególnych bloków energetycznych można obliczyć aktualny strumień objętości wody chłodzącej cyrkulującej w instalacji a tym samym oszacować ubytki wody na skutek odparowania w zespole chłodni kominowych. Na tej podstawie, oraz znając stężenia jonów SO_4^{2-} w wodzie uzupełniającej, można wyznaczyć bieżącą minimalną wartość $q_{v,sc}$.

4. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono matematyczny model opisujący dobowe zmiany stężenia siarczanów w zamkniętym układzie chłodzenia obejmującym kondensatory bloków energetycznych oraz chłodnie kominowe. Na podstawie analitycznego rozwiązania uzyskano asymptotyczne wartości stężeń jonów SO_4^{2-} w zależności od strumienia objętości odprowadzanych ścieków. Analiza rozwiązania umożliwiła również określenie minimalnej wartości strumienia odprowadzanych ścieków gwarantującego dotrzymanie limitów stężenia siarczanów w układzie chłodzenia na poziomie 500 mg/l.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych (Dz. Urz. WE L 135 z 30.05.1991, str. 40, z późn. zm.; Dz. Urz. UE Polskie wydanie specjalne, rozdz. 15, t. 2, str. 26), dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) (wersja przekształcona) (Dz. Urz. WE L 334 z 17.12.2010, str. 17, z późn. zm.
- [2] HERMANOWICZ W., *Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2010.
- [3] LAUDYN D., PAWLIK M., STRZELCZYK F., *Elektrownie*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 1997.
- [4] STAŃDA J., *Woda do kotłów parowych i obiegów chłodzących siłowni ciepłych*, Wydanie trzecie rozszerzone, Wydawnictwa WNT, Warszawa 1992.

ANALYSIS OF CHANGES IN SULPHATES CONCENTRATION IN CLOSED SYSTEM OF COOLING WATER CIRCULATION IN POWER UNIT

The paper presents a mathematical model describing the changes in SO_4^{2-} concentration in a closed system of cooling water circulation in a professional power plant. The analyzed installation consists of: condensers and cooling towers connected by a system of channels. At first, circulating water is heated in the condenser due to condensation of a spent steam from the last stage of the turbine, and next cooled down in the cooling tower. The main mechanism of heat transfer in the cooling tower base on partial evaporation of water, resulting in the increase of concentration of chemical components in the circulating water. This is the unfavorable effect because an excessive increase in the SO_4^{2-} concentration in the system may cause corrosion of the concrete part of the channels and cooling towers. The only mechanism to decrease concentration of undesirable chemicals in the circulating water is its periodic discharge to the sewage treatment plant. According to the latest government regulations; Regulation of the Minister of Environment dated 18 November 2014 and the Directive of the European Parliament and of the Council 2010/75 / EU of 24 November 2010 on industrial emissions [1], from the beginning of 2016 the new limits on the chemical components of a wastewater led to the natural tanks has been accepted what forced planned and cost-effective water treatment in a power plants. Presented mathematical model enables the prediction of the daily increase in the concentration of sulfate ions SO_4^{2-} in the closed cooling water system and determines the optimal volumetric flow rate of wastewater due to the current configuration of operating power units in a professional power plant.