



УДК 628.16:621.9.048

**IDENTIFICATION OF DEPOSITS IN TURBINE CONDENSERS  
ACCORDING TO STEAM TURBINE PLANT WORK PARAMETERS  
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВІДКЛАДЕНЬ В КОНДЕНСАТОРАХ ЗА ПАРАМЕТРАМИ  
РОБОТИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК**

**Kochmarskii V.Z./Кочмарський В.З.***c.f.-m.s, prof./к.ф.-м.н., проф.*

ORCID:0000-0003-2036-8841

*National University of water and environmental engineering,**Rivne, Soborna 11, 33028,**Національний університет водного господарства та природокористування,**Рівне, Соборна 11, 33028.*

**Анотація.** Розглядається алгоритм ідентифікації відкладень в конденсаторах турбін за зміною температури конденсації пари та її тиску, що виникають внаслідок забруднення відкладеннями поверхонь теплопередачі. Для характеристики відкладень використовують спеціальний параметр - «фактор відкладень» - величину, що рівна різниці теплового опору шару забруднень та зміни коефіцієнта тепловіддачі від забрудненої стінки трубки до охолодної води. З фактором відкладень безпосередньо пов'язані зміни параметрів роботи паротурбінної установи (ПТУ) і він може бути визначений за їх поточними вимірюваннями. Для представлення фактора відкладень через режимні параметри ПТУ, використовують рівняння теплового балансу і визначають коефіцієнт теплопередачі чистого конденсатора, або його трубок. За моніторингом температури конденсації пари впродовж кампанії блока та динамікою її зміни розраховують фактор відкладень і за його величиною судять, чи причиною погіршення вакууму є відкладення на трубній системі, чи інші фактори. При відомому коефіцієнті теплопровідності оцінюють товщину відкладень, а також втрати електричної потужності блоком ВВЕР-1000 та його бруто ККД.

**Ключові слова:** конденсатори, коефіцієнт теплопередачі, фактор відкладень, температура конденсації.

**Вступ**

За законами термодинаміки в електроенергію можна перетворити лише частину теплоти згенерованої в котлах чи ядерних реакторах. Неперетворена частина теплоти (анергія) розсіюється в доквіллі системами охолодження. На ТЕС та АЕС переважно використовують оборотні системи охолодження (ОСО) [1-7], що споживають поверхневі води. Отримане оборотною водою (ОВ) в конденсаторах турбін (КТ) тепло розсіюється в доквіллі переважно випаровуванням завдяки тому, що кожен кг випареної води виносить  $\approx 2.45$  МДж тепла. Проте випаровування має також негативну сторону – воно в ОВ призводить до концентрування солей. Через те, що поверхневі води, які використовують в ОСО, належать до гідрокарбонатного класу [4], то солями, які виділяються з ОВ і формують відкладення на внутрішній (водній) поверхні трубок КТ є карбонати.

Дослідження [3] показали, що основою відкладень є карбонат кальцію  $\text{CaCO}_3$ . Карбонат магнію практично не створює відкладень. Це зумовлено тим, що розчинність  $\text{MgCO}_3$  у сотні раз більша порівняно з розчинністю  $\text{CaCO}_3$  і в ОВ іони  $\text{Mg}^{2+}$  ведуть себе подібно до іонів  $\text{Cl}^-$ , маючи практично однаковий ступінь концентрування [7]. Якщо ОВ нестабільна щодо  $\text{CaCO}_3$ , то повністю



позбутися відкладень практично не можливо [8].

Забруднення КТ призводить до зменшення його коефіцієнту теплопередачі (КТП), росту температури і тиску в паровому просторі та зменшення ефективності ПТУ, зокрема, недовиробітку електроенергії [5,7]. Фінансові втрати, пов'язані з недовиробітком електроенергії на потужних блоках внаслідок забруднень КТ, можуть за рік сягати сотень мільйонів грн. Проте цим шкода від відкладень не обмежується, адже під відкладеннями розвивається пittingова корозія трубок та втрата герметичності парового простору КТ, що призводить до присмокування ОВ в паровий простір, зниження якості конденсату і утворення відкладень на паровій стороні трубних систем (ТС).

Незважаючи на це, що проблема відкладень в КТ має давню історію [1-6, 8-10] в останні роки цікавість до цього питання знову зросла у зв'язку з глобальним потеплінням і намаганням обмежити шкідливі викиди у тепла та продуктів згорання органічних палив [7,11]. Ситуація усугубляється також ростом цін на паливо і помилковим рішенням урядів багатьох країн щодо обмеження розвитку ядерної енергетики, закінченням термінів експлуатації діючих ядерних енергетичних реакторів та пов'язаного з цим дефіцитом електроенергії в розвинутих країнах.

**Метою роботи** є розрахунок впливу відкладень на зміни режимних параметрів ПТУ в процесі їх експлуатації та ідентифікація відкладень як причини відхилення режиму роботи ПТУ від нормативного.

### 1. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі забрудненого КТ

Визначимо зміну теплового потоку відпрацьованої пари до КТ, що виникає внаслідок забруднення КТ. Для цього скористаємося даними з експлуатації ПТУ [1-6], які вказують на те, що роботу ПТУ припиняють і чистять КТ, якщо ККД ПТУ зменшується більше ніж на два відсотки ( $\Delta\eta_6 < 0.02$ ), а тиск в паровому просторі КТ збільшується до 10 кПа.

Оцінимо нагрів ОВ при її проходженні через брудний КТ. Для цього використаємо рівняння теплового балансу КТ по охолодній воді,

$$c_b \cdot G_b \cdot \Delta t_b = Ne / \eta_6 \cdot (1 - \eta_6), \quad (1)$$

$c_b$ ,  $G_b$  - масові теплоємність та витрата охолодної води, кг/с;  $\Delta t_b$  - нагрів ОВ в трубках КТ.

Використовуючи (1) будемо вважати, що відкладення не впливають на витрату води через КТ та подачу теплоти в ПТУ. На підставі (1) та прийнявши максимально допустиме зменшення ККД  $\delta\eta_6 = 0.02$ , для  $\eta_6 = 0.33$ , отримуємо відносна зміну температури нагріву ОВ,

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_{b0}}{\Delta t_{b0}} = \frac{\delta\eta_6}{1 - \eta_{60}} \approx 0.03, \quad (2)$$

індекс «0» стосується параметрів чистого конденсатора.

Бачимо, що відносна зміна нагріву води в КТ менша від 3%, що при  $\Delta t_b = 9^\circ\text{C}$  дає абсолютний приріст температури нагріву ОВ

$$\delta\Delta t_b = 0.27^\circ\text{C} < 0.3^\circ\text{C}, \quad (3)$$

цей приріст температури нагріву ОВ надто малий і тому він не може служити надійним ідентифікатором відкладень.



Якщо припустити, що при забрудненні КТ його поверхня теплопередачі не змінюється, то з похибкою меншою ніж 3% можемо прирівняти потоки тепла від відпрацьованої пари до ОВ для чистого та забрудненого КТ, що дає

$$\frac{K_0}{\ln\left(\frac{t_{k0} - t_{1B}}{t_{k0} - t_{1B} - \Delta t_B}\right)} = \frac{K}{\ln\left(\frac{t_k - t_{1B}}{t_k - t_{1B} - \Delta t_B}\right)}, \quad (4)$$

$t_k$  – температура конденсації пари в брудному КТ; тут прийнято, що  $\Delta t_{B0} = \Delta t_B$  та температура води  $t_{1B}$  на вході в КТ в обох випадках однакова.

Встановимо зв'язок між КТП чистого та брудного конденсаторів. Теплопередача в КТ реалізується через його ТС, що складається з  $N$  паралельно включених однакових трубок, тому приблизно можемо записати,

$$Q_{КТ} = F \cdot K \cdot \Delta t_{\ln КТ} \approx N_{тр} \cdot f_{тр} \cdot \Delta t_{\ln тр}; \quad F \cdot K = N_{тр} \cdot F / N_{тр} k_{тр}; \quad K = k_{тр}. \quad (5)$$

$k_{тр}$  – КТП для окремих трубок; в цьому наближенні ми отримали, що КТП конденсатора і його окремих трубок співпадають.

Нехтуючи кривизною забрудненої трубки, її КТП представимо у вигляді,

$$k_{тр} = \frac{1}{\alpha_1^{-1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \alpha_2^{-1} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + \Delta \left( \frac{1}{\alpha_1} \right)} = \frac{k_{тр0}}{1 + k_{тр0} \cdot depF}. \quad (6)$$

$$k_{тр0} = \frac{1}{\alpha_1^{-1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \alpha_2^{-1}}, \quad depF = \frac{\delta_d}{\lambda_d} - \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1 + \Delta \alpha_1}, \quad (6a)$$

$\alpha_2$ ,  $\alpha_1$  – коефіцієнти тепловіддачі від пари до зовнішньої стінки трубки та від внутрішньої стінки до води в чистому КТ;  $\delta_{ст}$ ,  $\lambda_{ст}$  – товщина стінки трубки і теплопровідність матеріалу трубки;  $\delta_d$ ,  $\lambda_d$  – товщина шару відкладень на внутрішній поверхні трубки та теплопровідність відкладень;  $\Delta \alpha_1$  – зміна коефіцієнту тепловіддачі від внутрішньої стінки, покритої відкладеннями, до ОВ порівняно з чистою трубкою; *depF* - **фактор відкладень**. У випадку, коли нехтуємо зміною коефіцієнту тепловіддачі від поверхні трубки до ОВ, фактор відкладень рівний тепловому опору відкладень,  $depF = \delta_d / \lambda_d$ .

Зауважимо, що переважно у всіх випадках, коли обговорюється вплив відкладень на роботу ПТУ, не враховують зміни  $\alpha_1$  хоча зрозуміло, що стінка покрита відкладеннями має інші теплогідродинамічні властивості порівняно з чистою. На підставі (5) отримуємо [6,7,11],

$$K \approx \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot depF}. \quad (7)$$

З другої сторони співвідношення між КТП брудного і чистого КТ дається виразом (4).

Прийmemo, що початкові параметри режиму роботи відповідають ПТУ К-1000-60/3000 з конденсаторами 1000КЦС-1, які використовуються на АЕС з реакторами ВВЕР-1000,

$$t_{k0} = 29 \text{ }^\circ\text{C}, \quad P_K = 4.0 \text{ кПа}, \quad t_{1B} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \Delta t_B = 9 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (8)$$



Позначимо комплекс, що характеризує нормативний режим роботи ПТУ у формулі (4),

$$H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B) = \frac{t_{k0} - t_{1B}}{t_{k0} - t_{1B} - \Delta t_B}, \quad (9)$$

$H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B)$  впродовж кампанії блока вважається сталим і за даними (8)  $H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B) = 2.8$ .

Припустимо, що з *невідомих причин* температура конденсації пари в КТ збільшилась на  $\delta t_k = 10^\circ\text{C}$ . За цих умов знаходимо співвідношення між  $K$  та  $K_0$

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\ln\left(\frac{t_{k0} + \delta t_k - t_{1B}}{t_{k0} + \delta t_k - t_{1B} - \Delta t_B}\right)}{\ln[H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B)]} = \frac{\ln\left(\frac{29 + 10 - 15}{29 + 10 - 15 - 9}\right)}{\ln(2.8)} = 0.46. \quad (9a)$$

Поточна величина  $K/K_0$ , як це впливає з (9a), залежить від температури конденсації пари  $t_k = t_{k0} + \delta t_k$  та від початкових параметрів ПТУ. Бачимо з (9a), що росту температури конденсації пари на  $\delta t_k = 10^\circ\text{C}$  КТП конденсатора зменшується на 54%. Проте отриманий результат не свідчить однозначно, що причиною зменшення КТП і відповідного збільшення температури конденсації є відкладення. Зменшення КТП може відбуватися також внаслідок підсмоктувань повітря в паровий простір КТ. Щоб переконатися, що причиною зменшення КТП є відкладення, необхідно його визначити за формулою (7) при аналогічних умовах і порівняти результат з (9a).

За виразами (4), (7) та (9) розраховуємо **фактор відкладень**,

$$\text{depF} = \left[ \ln\left(\frac{t_k - t_{1B}}{t_k - t_{1B} - \Delta t_B}\right) \cdot [\ln(H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B))]^{-1} - 1 \right] \cdot K_0^{-1}. \quad (10)$$

Неперервний моніторинг  $t_k$  у заданому режимі роботи ПТУ (початкові параметри:  $t_{k0}$ ,  $t_{1B}$ , та  $\Delta t_B = \text{Const}$ ) дозволяє розрахувати  $\text{depF}$ , пов'язати відхилення роботи КТ від нормативного режиму з його величиною, тобто з відкладеннями, та встановити чи саме відкладення є причиною таких відхилень.

Як бачимо з (7) та (10) для отримання фактора відкладень, потрібно визначити КТП чистого КТ.

## 2. Розрахунок КТП чистого КТ та фактора відкладень

При розрахунку коефіцієнта теплопередачі чистого КТ використаємо, що  $K_0 = k_{\text{тp}0}$  і з рівняння теплового балансу для трубки,

$$J_0 = k_{\text{тp}0} \cdot \Delta t_B \cdot (\ln H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B))^{-1}, \quad (11)$$

$J_0$  – питомий тепловий потік на трубку в чистому КТ типу 1000КЦС-1 у вибраному режимі роботи ПТУ,  $J_0 \approx 20.2$  кВт/м<sup>2</sup>.

З рівняння (11) отримуємо,

$$k_{\text{тp}0} = \frac{J_0}{\Delta t_B} \cdot \ln H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B). \quad (12)$$

Відповідно, для КТ 1000КЦС-1  $k_{\text{тp}0} = 2.31 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) і для вибраного режиму роботи ця величина не змінюється.



Оцінимо фактор відкладень для КТ 1000КЦС-1, де, як вже згадувалось раніше, за невідомих причин температура конденсації пари зросла на  $\delta t_k = 10^\circ\text{C}$  тобто  $t_k = 39^\circ\text{C}$ , а тиск відповідно збільшився до  $P_k = 7.0$  кПа.

$$\text{depF} = \left( \frac{K_0}{K} - 1 \right) \cdot K_0^{-1} = \frac{2.17 - 1}{2310} = 5.1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \quad (13)$$

За означенням  $\text{depF}$ , див. (6), знехтувавши  $\Delta\alpha_1/\alpha_1^2$ , отримуємо нижню оцінку гіпотетичної товщини відкладень, яка при  $\lambda_d = 2.5 \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  рівна,

$$\delta_d = \text{depF} \cdot \lambda_d = 5.1 \cdot 10^{-4} \cdot 2.5 \approx 1.270 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 1.3 \text{ мм}. \quad (14)$$

Розрахована товщина відкладень близька до спостережуваної при чистках КТ, що дає підставу вважати, **що саме відкладення є причиною постульованого раніше (9а) росту температури конденсації пари.**

Оцінимо похибку до якої призводить нехтування зміною коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_1$  у формулі (6). Прийmemo, що відкладення змінюють величину  $\alpha_1 = 3 \cdot 10^3 \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  на 50%. Тоді зміна величини  $\delta_d$  буде рівною

$$\Delta(\delta_d) = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1 + \Delta\alpha_1} \cdot \lambda_d = \frac{0.5}{4.5 \cdot 10^3} \cdot 2.5 = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0.28 \text{ мм} \quad (15)$$

що становить 22% від величини  $\delta_d$ . Тобто врахування зміни  $\alpha_1$  (на 50%) внаслідок відкладень збільшує на 22% розрахункову товщину відкладень до 1.58 мм, проте не змінює її в рази. Зауважимо, при розрахунках (15) вважалось, що  $\Delta\alpha_1 > 0$ , проте це не завжди так, особливо для органічних відкладень.

### 3. Оцінка втрат генерації електроенергії внаслідок забруднення КТ

Визначимо втрату потужності блоком з ВВР-1000 при товщині відкладень в 1.3 мм. Для цього врахуємо, що зміна ентальпії відпрацьованої пари при переході від її конденсації при  $P_k 0.004$  МПа до  $P_k = 0.007$  МПа становить

$$\Delta h = h_k(0.007) - h_k(0.004) = 2572 - 2554 = 0.018 \text{ (МДж/кг)}.$$

Зменшення теплоти пари, що перетворюється в електричну (втрата генерації електроенергії) становить [12],

$$\Delta N_e = D_k \cdot \Delta h = 909 \cdot 18 = 16.4 \text{ (МВт)},$$

$D_k$  - витрата пари, кг/с, що подається в КТ.

Отже втрата електричної потужності блоком внаслідок забруднення трубок КТ відкладеннями товщиною 1.3 мм становить,

$$\Delta N_e = 16.4 \text{ МВт}, \quad (16)$$

а відносна зміна ККД блока з ВВЕР-1000 досягає

$$\Delta\eta/\eta = \Delta N_e/N_e = 0.0164 \rightarrow 1.6\%.$$

Зауважимо, що втрата електричної потужності 16.4 МВт енергоблоком для АЕС рівна додатковому тепловому навантаженню на доквілля, а для ТЕС дозволяє поряд з цим оцінити забруднення пов'язані з перепалом палива.

Отже вирази (9) – (15) представляють алгоритм визначення **фактора відкладень** та ймовірної товщини відкладень за поточними даними температури конденсації пари в КТ, якщо відомі параметри номінального режиму роботи ПТУ



і дозволяють встановити причини (діагностувати) відхилення режимних параметрів від номінальних.

### Висновки

1. Представлена схема розрахунку *фактора відкладень* за поточними вимірюваннями температури конденсації пари та КТП чистої трубки КТ.

2. *Фактор відкладень* – величина, яка рівна різниці теплового опору шару забруднень та зміни коефіцієнта тепловіддачі від забрудненої стінки трубки до охолодної води. Розрахунок КТП конденсатора чи окремої трубки робимо за рівнянням питомого теплового потоку до окремої трубки.

3. Виконуючи моніторинг температури конденсації пари впродовж кампанії блока, розраховують за її динамікою зміну КТП та фактор відкладень і за їх величинами встановлюють, що є причиною погіршення вакууму є відкладення на ТС. У випадку відкладень оцінюють їх товщину і при необхідності розробляють і впроваджують відповідні заходи їм протидії.

### Література

1. Кучеренко Д.И. Обратное водоснабжение (Системы водяного охлаждения). Москва. Стройиздат, 1980. 169 с.

2. Топольницький М.В. Атомні електричні станції. – Львів: "Бескид Біт", 2005. 523 с.

3. Кочмарський В.З., Поспелов Д.Н. Состояние проблемы противонакипной обработки воды. Київ, Знання. РДЕНТП. 1986. 24 с.

4. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Ленинград. Гидрометеиздат.1970. 444 с.

5. Шелепов І.Г. Теплотехнические установки электростанций (исследование и расчет низкопотенциальных комплексов ТЭС и АЭС). Шелепов І.Г., Заруба В.К., Яцкевич С.В. Київ. УМКВО. 1993, - 200 с.

6. Шелепов І.Г., Михайський Д.В. Диагностирование конденсаторов паровых турбин на основе уравнения теплопередачи. Східноєвропейський журнал передових технологій. №5(5). 2003. С. 74-77.

7. Kochmarskii V.Z. Control of cooling water stability with respect to Carbonate deposits. ВіВТ. НТ- вісті. № 2 (27). 2020. Ст. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-9300.2722020209.843>

8. Кочмарський В.З., Костюк О.П. Тимейчук О.Ю. Відкладення у водогрійних котлах та їх наслідки. Вісник НУВГП, вип. 3(95). Рівне, 2021. С. 75-84.

9. Грішин А.А., Кочмарський В.З., Поспелов Д.Н. Состояние и перспективы применения безреагентных методов противонакипной водоподготовки на предприятиях Минэнерго. Мат. Республ. н.т. конф. Рівне, 1988. С. 6-8.

10. Kochmarskii V.Z. Magnetic Treatment of Water. Possible mechanisms and conditions for applications. Magnetic and Electrical Separation. 1996, v.7. p. 77- 107.

11. Кочмарський В.З. Моделювання процесу виділення карбонату кальцію і алгоритм оперативного контролю стану водогрійних котлів. Енергетика і електрифікація. № 10. 2015. С. 4 - 8.



12. Теплообменники энергетических установок. <https://openedu.urfu.ru/files/book%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F.html>

**Abstract** The algorithm for identification of deposits in turbine condensers based on changes in steam condensation temperature and pressure resulting from contamination of heat transfer surfaces by deposits is considered. To characterize deposits, a special parameter is used - "**deposit factor**" - a value equal to the difference in the thermal resistance of the pollution layer and the change in the heat transfer coefficient from the polluted tube wall to the cooling water. Changes in the operating parameters of the steam turbine plant (STP) are directly related to the deposit factor and can be determined from their current measurements. To represent the deposit factor through the mode parameters of the STP, the heat balance equation is used and the heat transfer coefficient of the pure condenser or its tubes is determined. By monitoring the steam condensation temperature during the unit campaign and the dynamics of its change, the deposit factor is calculated, and by its value it is judged whether the cause of vacuum deterioration is due to deposits on the pipe system or other factors. With a known coefficient of thermal conductivity, the thickness of deposits is estimated, as well as the loss of electric power by the WWER-1000 block and its gross efficiency.

**Key words:** turbine condensers, heat transfer coefficient, deposition factor, condensation temperature.