

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.182.4:696.42

<https://doi.org/10.31713/vt420227>

Кочмарський В. З., к.ф.-м.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.z.kochmarskii@nuwm.edu.ua)

ПОРУШЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ЕНЕРГОБЛОКІВ ВНАСЛІДОК ВІДКЛАДЕНЬ В КОНДЕНСАТОРАХ ТУРБІН

Запропоновано схему розрахунку зміни температури конденсації пари в КТ, тиску та втрат генерації електроенергії, що виникають внаслідок забруднення відкладеннями поверхонь теплопередачі в конденсаторах турбін (КТ). Температура конденсації та коефіцієнт теплопередачі брудного КТ виражаються через коефіцієнт теплопередачі (КТП) окремої чистої трубки та «фактор відкладень». Фактор відкладень – величина, що рівна різниці теплового опору шару забруднень та зміни коефіцієнта тепловіддачі від забрудненої стінки трубки до охолодної води. Ця величина безпосередньо пов'язана зі змінами параметрів роботи паротурбінної установки (ПТУ) і визначається за даними поточних вимірювань. Фактор відкладень є ідентифікатором впливу забруднень на відхилення режиму ПТУ від нормативного. Перевага використання фактора відкладень в тому, що для його розрахунку не потрібно додаткової інформації, наприклад про коефіцієнт теплопровідності відкладень. Визначивши фактор відкладень за наявності даних про теплопровідність відкладень, можна оцінити товщину їх шару. Розрахунок КТП окремої трубки пропонується робити за рівнянням теплового балансу питомого теплового потоку пари до окремої трубки. Виконуючи моніторинг КТП в КТ впродовж кампанії блока, можна за динамікою зміни КТП та фактора відкладень встановити чи причиною погіршення вакууму є відкладення на трубній системі, оцінити їх товщину і розробляти відповідні заходи протидії відкладенням.

Ключові слова: конденсатор турбіни; відкладення; температура конденсації; коефіцієнт теплопередачі.

Одними з найбільших споживачів поверхневих вод в Україні є ТЕС та АЕС. Майже 94% споживаної ними води використовується в оборотних системах охолодження (ОСО) для відбору теплоти відпрацьованої пари в конденсаторах турбін (КТ) [1; 2]. Теплота згорання палива (розпаду в реакторі ядер U^{235}) Q_{KT} , яка передається доквіллю конденсаторами енергоблоків, оцінюється за виразом,

$$Q_{KT} = Q_{PTT} \cdot (1 - \eta_6), \quad \eta_6 = Ne/Q_{PTT}, \quad (1)$$

Ne – номінальна електрична потужність блока; $Q_{PTT} = Ne/\eta_6$ – теплота, яка подається на паротурбінну установку (ПТУ); η_6 – ККД бруто ПТУ.

Наприклад, при $Ne = 1000$ МВт у доквілля скидають при $\eta_6 = 0.33$ теплову потужність, що за (1) рівна ≈ 2000 МВт. Ефективність ПТУ характеризується ККД бруто, який рівний частці теплоти Q_{PTT} , що перетворюється в електроенергію. При експлуатації ПТУ намагаються зменшити скид теплоти в доквілля, тобто працювати в номінальному режимі з оптимізованим ККД [3; 4].

Теплота відпрацьованої в турбіні пари в герметичному паровому просторі КТ передається конденсацією трубній системі (ТС) і забирається текучою в ТС охолодною водою (ОВ) завдяки її нагріванню. Отримане ОВ в КТ тепло розсіюється в доквіллі переважно випаровуванням, адже кожен кг випареної води виносить ≈ 2.45 МДж тепла. Проте випаровування, яке забезпечує розсіювання тепла, має негативну сторону – воно в охолодній воді ОСО призводить до концентрування солей. Оскільки поверхневі води, які в Україні використовують в ОСО, належать до гідрокарбонатного класу [5], то солі, які за умови перевищення ними добутку розчинності, можуть виділятися з ОВ і формувати відкладення на внутрішній (водній) поверхні трубок КТ, є карбонатами.

Причому в усьому діапазоні робочих температур ОВ є нестабільною щодо виділення $CaCO_3$ [5]. Дослідження [2; 6] показали, що основою відкладень є карбонат кальцію $CaCO_3$ з малою домішкою $MgCO_3$. Це зумовлено набагато більшою розчинністю (біля 2000 раз) $MgCO_3$ порівняно з $CaCO_3$, і в ОВ іони Mg^{2+} ведуть себе подібно до іонів Cl^- , маючи практично однаковий ступінь концентрування. Тому рекомендації оцінювати стабільність ОВ щодо твердих відкладень за загальною твердістю некоректні.

Аналіз зразків трубок, вирізаних з ТС конденсаторів, показує, що відкладення мають шарувату структуру. Ближче до стінки трубки знаходяться щільні відкладення $CaCO_3$ у формі кальциту з

вираженою кристалічною структурою і теплопровідністю 2.8–3.4 Вт/(м·К), а на віддалі 0.5–1.0 мм від стінки формується змішаний пористий шар органіко-мінеральних відкладень малої міцності та теплопровідності, який успішно видаляється системою кулькової очистки (СКО). Проте, навіть при застосуванні СКО відкладення можуть залишатися у вигляді тонкого шару 0.15–0.30 мм твердого CaCO_3 , і якщо ОВ нестабільна щодо CaCO_3 , то повністю позбутися відкладень практично неможливо.

Забруднення КТ призводить до зменшення його коефіцієнта теплопередачі (КТП), росту температури і тиску в паровому просторі КТ та зменшення ефективності ПТУ. Зниження ККД ПТУ внаслідок відкладень означає, що частка теплоти, яка перетворюється в електроенергію, зменшується і відповідно збільшується її кількість, яка в конденсаторі передається ОВ і розсіюється в довкіллі, забруднюючи його теплом та змінюючи локальний клімат.

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 пітінгова 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 ТС.

Проблема відкладень в КТ внаслідок згаданих вище причин досліджувалась з початку ХХ ст. паралельно з розвитком тепло- та електроенергетики. Було запропоновано багато способів очистки КТ та іншого теплообмінного обладнання від забруднень [1; 2; 7; 8] і розроблено засоби реагентної та безреагентної стабілізації ОВ щодо виділення CaCO_3 [7; 9]. Проте в останні роки цікавість до цієї проблеми знову зростає у зв'язку з глобальним потеплінням і намаганням зменшити шкідливі викиди у довкілля продуктів згорання органічних палив та обмежити теплове забруднення атмосфери. Проблема 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'язаним з цим дефіцитом електроенергії в розвинутих країнах.

Метою роботи є формулювання простої методики визначення змін режимних параметрів блоків, які є характерними для забруднених КТ і які дозволяють виокремити зменшення ККД

внаслідок відкладень на фоні інших причин, наприклад підсмоктування повітря в паровий простір КТ, нещільностей ТС та нештатної роботи ежекторів. Робиться також оцінка недовиробітку енергії, що зумовлена відкладеннями.

1. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі забрудненого КТ та фактора відкладень

Як вже згадувалося, забруднення призводять до зниження ККД, тобто до зменшення частини теплової енергії, що перетворюється електричну. Відповідно, частина не перетвореного в електроенергію тепла $\Delta Q_{\text{пт}} = \Delta Ne / \eta_6$ скидається через КТ в довкілля. Визначимо зміну теплового потоку від ПТУ до КТ, що виникає внаслідок забруднення КТ. Для цього скористаємося даними з експлуатації ПТУ [2; 3], 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. Причиною цьому є значні втрати виробництва електроенергії та зростання нещільностей трубної системи КТ.

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

$$c_v \cdot G_v \cdot \Delta t_v = Ne / \eta_6 \cdot (1 - \eta_6), \quad (2)$$

де c_v , G_v – масові теплоємність та витрата охолодної води; Δt_v – нагрів ОВ після проходження трубок КТ.

При використанні (2) будемо вважати, що витрата води через КТ та подача теплоти в ПТУ при забрудненні КТ не змінюється.

На підставі (2) та прийнявши максимально допустиме зменшення $\delta \eta_6 = 0.02$, для $\eta_6 = 0.33$, отримуємо відносну зміну температури нагріву ОВ,

$$\varepsilon_{\text{тв}} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_{\text{в0}}}{\Delta t_{\text{в0}}} = \frac{\delta \eta_6}{1 - \eta_{60}} \approx 0.029, \quad (3)$$

індекс «0» стосується параметрів чистого конденсатора.

Бачимо, що відносна зміна нагріву води в КТ менша від 3%, що при $\Delta t_v = 10^\circ \text{C}$ дає абсолютний приріст температури нагріву ОВ

$$\delta \Delta t_v < 0.3^\circ \text{C}. \quad (3a)$$

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

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

де t_k – температура конденсації пари в брудному КТ; як вже згадувалося, 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 коефіцієнтами теплопередачі чистого та брудного конденсаторів. Теплопередача в КТ реалізується через його ТС, що складається з N паралельно включених однакових трубок, тому прийнявши, що середній логарифмічний перепад температури $\Delta t_{\ln\text{КТ}} = \Delta t_{\ln\text{ТР}}$, можемо записати

$$K_0 = \Sigma k_{\text{ТР}0} \approx N \cdot k_{\text{ТР}0}, \quad K = \Sigma k_{\text{ТР}} \approx N \cdot k_{\text{ТР}}, \quad (5)$$

$k_{\text{ТР}0}$, $k_{\text{ТР}}$ – КТП для окремих чистої та забрудненої трубок.

КТП для забрудненої трубки представимо у вигляді [10],

$$k_{\text{ТР}} = \frac{1}{\alpha_1^{-1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + \alpha_2^{-1} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + \Delta \left(\frac{1}{\alpha_1} \right)} = \frac{k_{\text{ТР}0}}{1 + k_{\text{ТР}0} \cdot \text{depF}}. \quad (6)$$

$$k_{\text{ТР}0} = \frac{1}{\alpha_1^{-1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + \alpha_2^{-1}}, \quad \text{depF} = \frac{\delta_d}{\lambda_d} - \frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1 + \Delta \alpha_1}, \quad (6a)$$

індекси «0» відносяться до величин чистого КТ; α_2 , α_1 – коефіцієнти тепловіддачі від пари до зовнішньої стінки трубки та від внутрішньої стінки до води в чистому КТ; $\delta_{\text{СТ}}$, $\lambda_{\text{СТ}}$ – товщина стінки трубки і теплопровідність матеріалу трубки; δ_d , λ_d – товщина шару відкладень на внутрішній поверхні трубки та теплопровідність відкладень; $\Delta \alpha_1$ – зміна коефіцієнта тепловіддачі від внутрішньої стінки, покритої відкладеннями, до води порівняно з чистою трубкою; depF – **фактор відкладень**.

Зауважимо, що переважно в усіх випадках, коли обговорюється вплив відкладень на роботу ПТУ, не враховують зміни α_1 , хоча зрозуміло, що стінка, вкрита відкладеннями, має інші теплогідродинамічні властивості порівняно з чистою. У випадку, коли нехтуємо зміною α_1 , $\text{depF} = \delta_d / \lambda_d$. На підставі (5) отримуємо [9; 10],

$$K \approx \frac{K_0}{1 + k_{\text{ТР}0} \cdot \text{depF}}. \quad (7)$$

З іншого боку, співвідношення між КТП брудного і чистого КТ дається виразом (4). Тому, наприклад, приймаючи що приріст температури конденсації пари в КТ (з невідомих причин) рівний

$\delta t_k = 10^\circ \text{C}$, знаходимо для $t_{k0} = 33^\circ \text{C}$, $P_k = 5.0 \text{ кПа}$ та $t_{1B} = 15^\circ \text{C}$, зауважимо, що прийняті тут параметри стосуються конденсатора 1000КЦС-1, який використовують з блоком ПТУ К-1000-60/3000 на АЕС, споряджених реакторами ВВЕР-1000. За таких умов знаходимо співвідношення між K та K_0

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\ln\left(\frac{t_{k0} + \delta t_k - t_{1B}}{t_{k0} + \delta t_k - t_{1B} - \Delta t_B}\right)}{\ln\left(\frac{t_{k0} - t_{1B}}{t_{k0} - t_{1B} - \Delta t_B}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{33 + 10 - 15}{33 + 10 - 15 - 10}\right)}{\ln\left(\frac{33 - 15}{33 - 15 - 10}\right)} = \frac{0.44}{0.81} = 0.54. \quad (8)$$

Бачимо, що відповідно до (8), зростанню температури конденсації на 10°C відповідає зменшення КТП конденсатора на 46%. Проте отриманий результат не свідчить однозначно про те, що причиною зменшення КТП і відповідного збільшення температури конденсації є відкладення. Зменшення КТП може відбуватися також і внаслідок підсмоктувань повітря в паровий простір КТ. Щоб переконатися, що причиною зменшення КТП є відкладення, необхідно розрахувати КТП за (7) при аналогічних умовах і порівняти результат з (8).

За виразом (7) можемо розрахувати характеристику забруднень КТ, яку називаємо **фактором відкладень**, див. (6),

$$\text{dep}F = \left(\frac{K_0}{K} - 1\right) \cdot K_{\text{тр}0}^{-1}. \quad (9)$$

Неперервний моніторинг цієї величини дозволить виявити відхилення роботи КТ від штатного режиму і зосередитися на пошуку причин відхилення.

Перевагою використання **фактора відкладень** для діагностики стану ПТУ є те, що саме ця величина безпосередньо визначається на підставі поточних вимірювань параметрів роботи ПТУ, а не товщина відкладень, визначення якої пов'язано з невідомою теплопровідністю відкладень.

Для отримання інформації про фактор відкладень, зокрема про товщину відкладень (6), потрібно розрахувати КТП для чистої трубки з проточною водою у двофазному середовищі водяної пари. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі в такому середовищі

ускладнюється конденсацією пари на зовнішній поверхні трубок і утворенням шару конденсату. Крім цього, потрібно враховувати рух пари у міжтрубному просторі КТ. Загалом завдання розрахунку коефіцієнта тепловіддачі у двофазному середовищі не є простим, але у певному наближенні воно давно вирішене [11; 12].

2. Визначення температури конденсації в забрудненому конденсаторі

Важливим параметром, який змінюється при утворенні відкладень на ТС КТ, є температура конденсації відпрацьованої пари t_k до величини якої чутлива ефективність ПТУ загалом. Встановивши залежність t_k від фактора відкладень, зможемо судити про причини її росту і таким чином про вплив відкладень на роботу ПТУ. Це дозволить розробити заходи щодо обмеження такого впливу, наприклад, усуненням відкладень, чи зменшенням швидкості їх росту.

Розрахунок t_k можна зробити за стандартними схемами відомими в теплотехніці [3; 12], але при цьому робляться неконтрольовані наближення, і отримані результати потрібно розуміти як оцінки реальних величин. Тому задля спрощення при визначенні t_k використаємо співвідношення (4), з якого після перетворень отримуємо

$$t_k = t_{1B} + \frac{\Delta t_B}{1 - H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B)^{\frac{K}{K_0}}}; \quad H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B) = \frac{t_{k0} - t_{1B}}{t_{k0} - t_{1B} - \Delta t_B}. \quad (10)$$

За даними (8), величина $H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B)$ рівна 2.25 і визначається режимом роботи ПТУ з чистим КТ. Для конкретного КТ і номінального режиму роботи ПТУ ця величина є постійною, тобто є еталоном, який дозволяє порівнювати спостережувані дані щодо t_k з розрахунковими, робити висновки про ріст відкладень та визначати зміни режимних параметрів ПТУ.

Підставивши у вираз (10) представлення (7), отримаємо формулу для розрахунку температури конденсації пари в забрудненому КТ

$$t_k = t_{1B} + \frac{\Delta t_B}{1 - H(t_{k0}, t_{1B}, \Delta t_B)^{\frac{1}{1 + k_{TP0} \cdot derF}}}. \quad (11)$$

Як випливає з (11), температура конденсації відпрацьованої пари явно залежить від k_{TP0} – КТП від пари до ОВ для чистої трубки та фактора відкладень $derF$. Отже, порівнюючи розрахунки за (11) та

тенденцію зміни даних вимірювання t_k в процесі експлуатації ПТУ, можемо судити про те, чи утворення і ріст відкладень є причиною зміни t_k .

Щоб визначити t_k , потрібно розрахувати або виміряти $k_{тр0}$. Тут це зробимо, використовуючи рівняння теплового балансу для трубки в чистому КТ,

$$J_0 = k_{тр0} \cdot \Delta t_b \cdot [\ln H(t_{k0}, t_{1b}, \Delta t_b)]^{-1}, \quad (12)$$

де J_0 – питомий тепловий потік на трубку в чистому КТ.

Для прикладу, в конденсаторах 1000КЦС-1 в номінальному режимі роботи ПТУ $J_0 \approx 26$ кВт/м². З рівняння (12) отримуємо,

$$k_{тр0} = \frac{J_0}{\Delta t_b} \cdot \ln H(t_{k0}, t_{1b}, \Delta t_b), \text{ для КТ 1000КЦС-1 } k_{тр0} = 2.11 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (13)$$

Оцінимо фактор відкладень для КТ 1000КЦС-1, де, як вже згадувалось раніше, за невідомих причин температура конденсації пари зросла на 10°С тобто $t_k = 43^\circ\text{C}$, а тиск відповідно збільшився від 5.0 до $P_k = 8.6$ кПа.

$$\text{dep}F = \left(\frac{K_0}{K} - 1 \right) \cdot k_{тр0}^{-1} = \frac{1.85 - 1}{2110} = 4.03 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

За означенням $\text{dep}F$, див. (6), знехтувавши $\Delta\alpha_1$, отримуємо для $\lambda_d = 2.5$ Вт/(м·К) нижню оцінку величини гіпотетичної товщини відкладень

$$\delta_d = \text{dep}F \cdot \lambda_d = 4.03 \cdot 10^{-4} \cdot 2.5 \approx 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1.0 \text{ (мм)}.$$

Розрахована товщина відкладень близька до спостережуваної при чистках КТ, що дає підставу вважати, що саме відкладення є причиною росту температури конденсації пари, яку ми постулювали як невідому.

Загалом може виникнути питання, навіщо розраховувати t_k , якщо ця величина вимірюється за нормативами контролю режиму роботи ПТУ. Відповідь ми вже дали, адже, порівнюючи розраховану за (11) температуру конденсації та виміряну, робимо висновок про причину її зміни, тобто діагностуємо роботу ПТУ.

Визначимо похибку, до якої призводить нехтування зміною коефіцієнта тепловіддачі α_1 у формулі (6). Приймемо, що відкладення змінюють величину $\alpha_1 \approx 3.7 \cdot 10^3$ Вт/(м·К) на 50%. Тоді зміна величини δ_d буде рівною

$$\Delta(\delta_d) = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1 + \Delta\alpha_1} \cdot \lambda_d = \frac{0.5}{5.6 \cdot 10^3} \cdot 2.5 = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0.22 \text{ мм}, \quad (14)$$

що становить 22% від величини δ_d . Тобто врахування зміни α_1 (на 50%) збільшує на 22% розраховану товщину відкладень, проте не змінює її в рази. Інакше кажучи, для оцінки товщини відкладень (при відомому λ_d) в першому наближенні можна нехтувати $\Delta\alpha_1$.

Зауважимо, що оцінка вкладу $\Delta\alpha_1$ ґрунтувалася на мовчазному припущенні, що $\Delta\alpha_1 > 0$, проте це не завжди так, зокрема це стосується органічних відкладень. В такому випадку фактична товщина відкладень буде меншою від розрахованої за припущення, що $\Delta\alpha_1 = 0$.

3. Оцінка втрат генерації електроенергії внаслідок забруднення КТ

Визначимо втрату потужності блоком з ВВР-1000, наприклад, при товщині відкладень в 1 мм. Для цього використаємо дані [11] щодо поправок до потужності турбіни внаслідок відхилення тиску пари в КТ. На підставі [11] та теплового розрахунку ПТУ знаходимо, що $\Delta N_e / \Delta P_k$ для КТ 1000КЦС-1 в діапазоні $P_k = 4.5\text{--}10$ кПа, рівне 3.74 МВт/кПа. Тоді втрата електричної потужності блоком внаслідок забруднення трубок КТ відкладеннями товщиною один мм становить

$$\Delta N_e = 3.74 \cdot (8.6 - 5.0) = 13.5 \text{ МВт}, \quad (15)$$

а відносна зміна ККД блока з ВВЕР-1000 досягає

$$\Delta \eta / \eta = \Delta N_e / N_e = 0.0135 \rightarrow 1.4\%. \quad (16)$$

Зауважимо, що втрата електричної потужності 13.5 МВт енергоблоком для АЕС відповідає додатковому тепловому навантаженню на довікля, а для ТЕС дозволяє поряд з цим оцінити забруднення, пов'язані з перепалом палива.

Отже, вирази (9)–(12) представляють простий алгоритм визначення зміни температури конденсації пари в забрудненому відкладеннями КТ за умови, що відомі параметри номінального режиму роботи ПТУ, зокрема:

- температура конденсації пари в чистому КТ при номінальному навантаженні ПТУ t_{k0} ;
- температура на вході води, в КТ $t_{1в}$;
- температура нагріву води в КТ $\Delta t_{в}$;
- питомий тепловий потік на трубку в чистому КТ J_0 ;
- витрата пари на чистий КТ при номінальному навантаженні

ПТУ D0;

- виконуються поточні вимірювання параметрів $t_{1в}$, $\Delta t_{в,tк}$.

За даними цих вимірювань розраховують ΔNe , K , K_0 , $k_{тр0}$ та $depF$, оцінюють товщину відкладень δ_d та роблять висновок чи саме відкладення є причиною росту температури конденсації та втрат електроенергії, чи необхідно вишукувати інші причини порушень режиму роботи ПТУ.

Висновки

1. Запропонована спрощена схема розрахунку зміни температури конденсації пари в КТ та пов'язаних з цим змін тиску та втрат генерації електроенергії, що виникають внаслідок забруднення відкладеннями поверхні теплопередачі в КТ.

2. Показано, що коефіцієнт теплопередачі брудного КТ виражається через КТП чистого та добуток КТП чистої трубки КТ на фактор відкладень.

3. Фактор відкладень – величина, що дорівнює різниці теплового опору шару забруднень та зміни коефіцієнта тепловіддачі від забрудненої стінки трубки до охолодної води. Саме ця величина безпосередньо відповідальна за зміни параметрів роботи ПТУ і може бути визначена поточними вимірюваннями. Її величина служить ідентифікатором впливу забруднень на відхилення режиму ПТУ від нормативного.

4. Розрахунок КТП конденсатора та окремої трубки пропонується робити за рівняннями теплового балансу для охолодної води та КТ (4) і питомого теплового потоку до окремої трубки (12).

5. Виконуючи моніторинг КТП в КТ впродовж кампанії блока, можна за динамікою зміни КТП та фактора забруднень встановити чи причиною погіршення вакууму є відкладення на ТС, оцінити їх товщину і розробляти відповідні заходи протидії відкладенням.

1. Кучеренко Д. И. Обратное водоснабжение (Системы водяного охлаждения). Москва : Стройиздат, 1980. 169 с. 2. Кочмарський В. З., Поспелов Д. Н. Состояние проблемы противонакипной обработки воды. Київ : РДЕНТП. 1986. 24 с. 3. Шелепов І. Г., Заруба В. К., Яцкевич С. В. Теплотехнические установки электростанций (исследование и расчет низкопотенциальных комплексов ТЭС и АЭС). Київ : УМКВО, 1993. 200 с. 4. Топольницький М. В. Атомні електричні станції. Львів : Бескид Біт, 2005. 523 с. 5. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1970. 444 с. 6. Шелепов И. Г., Сафронюк М. А. Оптимизация режимов

эксплуатации конденсаторов паровых турбин с учетом характеристик отложений в трубных пучках. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2005. Вип. 6. С. 88–95. **7.** Гришин 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. **8.** Кочмарський В. З., Трофимчук І. П., Куба В. В. Особливості поведінки трасерів та виділення твердого CaCO_3 в оборотних системах охолодження. *ВіВТ. НТ-Вісті*. 2018. № 1 (22). С. 39–49. URL: https://doi.org/10.20535/22189300221_201814442. (дата звернення: 15.11.2022). **9.** Kochmarskii V. Z. Magnetic Treatment of Water. Possible mechanisms and conditions for applications. *Magnetic and Electrical Separation*. 1996. Vol. 7. P. 77–107. **10.** Кочмарський В. З. Моделювання процесу виділення карбонату кальцію і алгоритм оперативного контролю стану водогрійних котлів. *Енергетика і електрифікація*. 2015. № 10. С. 4–8. **11.** Федоров В. А., Мильман О. О. Конденсаторы паротурбинных установок. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 560 с. **12.** Кирсанов И. Н. Конденсационные установки. М.-Л. : Энергия, 1965. 376 с.

REFERENCES:

1. Kucherenko D. I. *Oborotnoe vodosnabzhenie (Sistemyi vodyanogo ohla-jdeniya)*. Moskva : Stroyizdat, 1980. 169 s. **2.** Kochmarskiy V. Z., Pospelov D. N. *Sostoyanie problemyi protivonakipnoy obrabotki vodyi*. Kiiiv : RDENTP. 1986. 24 s. **3.** Shelieпов I. H., Zaruba V. K., Yatskevych S. V. *Teplotehnicheskie ustanovki elektrostantsiy (issledovanie i raschet nizkopotentsialnyih kompleksov TES i AES)*. Kyiv : UMKVO, 1993. 200 s. **4.** Topolnytskyi M. V. *Atomni elektrychni stantsii*. Lviv : "Beskyd Bit", 2005. 523 s. **5.** Alekin O. A. *Osnovy gidrohimii*. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1970. 444 s. **6.** Shelepov I. G., Safronyuk M. A. *Optimizatsiya rejimov ekspluatatsii kondensatorov parovyih turbin s uchetom karakteristik otlojeniy v trubnyih puchkah*. *Visnik NTU «HPI»*. 2005. Vyip. 6. S. 88–95. **7.** Grishin A. A., Kochmarskiy V. Z., Pospelov D. N. *Sostoyanie i perspektivy primeneniya bezreagentnyih metodov protivonakipnoy vodopodgotovki na predpriyatiyah Minenergo*. *Mat. Respubl. n.t. konf.* Rivne, 1988. S. 6–8. **8.** Kochmarskiy V. Z., Trofymchuk I. P., Kuba V. V. *Osoblyvosti povedinky traseriv ta vydilennia tverdoho CaCO_3 v oborotnykh systemakh okholodzhennia*. *ViVT. NT-Visti*. 2018. № 1 (22). S. 39–49. URL: https://doi.org/10.20535/22189300221_201814442. (data zvernennia: 15.11.2022). **9.** Kochmarskii V. Z. *Magnetic Treatment of Water. Possible mechanisms and conditions for applications*. *Magnetic and Electrical Separation*. 1996. Vol. 7. P. 77–107. **10.** Kochmarskiy V. Z. *Modeliuvannia protsesu vydilennia karbonatu kaltsiiu i alhorytm operatyvnoho kontroliu stanu vodohriinykh kotliv*. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2015. № 10. S. 4–8. **11.** Fedorov V. A., Milman O. O. *Kondensatoryi paroturbinnnyih ustanovok*. Izd. MGTU im. N. E. Baumana, 2013. 560 s. **12.** Kirsanov I. N. *Kondensatsionnyie ustanovki*. M.-L. : Energiya, 1965. 376 s.

Kochmarskyi V. Z., Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

DISRUPTION OF THE OPERATION OF POWER UNITS AS A RESULT OF DEPOSITS IN THE TURBINE CONDENSERS

A simplified scheme for calculating changes in steam condensation temperature in turbine condensers (TC), pressure changes, and power generation losses resulting from contamination of heat transfer surfaces in TCs with deposits is proposed. The condensing temperature and heat transfer coefficient of a dirty TC are expressed in terms of the heat transfer coefficient (HTC) of the individual clean tube and the "deposits factor". The deposits factor is a value that is equal to the difference in the thermal resistance of the contamination layer and the change in the heat transfer coefficient from the contaminated tube wall to the cooling water. This value is directly related to changes in the parameters of the steam turbine plant (STP) and is determined based on current measurement data. The deposits factor is an identifier of the impact of contamination on the deviation of the STP regime from the normative one. The advantage of using the deposits factor is that its calculation does not require additional information, for example, about the coefficient of thermal conductivity of deposits. Having determined the deposits factor in the presence of data on the thermal conductivity of the deposits, it is possible to estimate the thickness of their layer. It is suggested to calculate the HTC of the condenser and a separate tube according to the equations of the heat balance of steam and cooling water and the specific heat flow to the individual tube.

By monitoring the HTC in the TC during the unit campaign, it is possible to establish whether the cause of vacuum deterioration is caused by deposits on the pipe system, assess their thickness, and develop appropriate anti-deposits measures based on the dynamics of changes in the KTP and the deposits factor.

Keywords: deposits; condensation temperature; condenser; heat transfer coefficient.
