

**Кочмарський В. З., к.ф.-м.н., професор, Костюк О. П., к.т.н., доцент, Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.z.kochmarskii@nuwm.edu.ua)

## **ВІДКЛАДЕННЯ У ВОДОГРІЙНИХ КОТЛАХ ТА ЇХ НАСЛІДКИ**

**Аналізуються проблеми експлуатації котельних установок, зокрема водогрійних котлів, що пов'язані з утворенням карбонатних та комбінованих відкладень з водної сторони їх трубних систем (ТС). Досліджуються умови, за яких утворюються відкладення на ТС в котлах навіть при штатній роботі систем водопідготовки. Оцінюється коефіцієнт теплопровідності відкладень з врахуванням їх реальної структури. Досліджується вплив відкладень на коефіцієнт теплопередачі ТС.**

**Ключові слова:** водогрійні котли; трубні системи; структура відкладень; теплопровідність; коефіцієнт теплопередачі.

**Вступ.** При експлуатації котельних установок, зокрема водогрійних котлів, часто виникають проблеми пов'язані з утворенням карбонатних відкладень з водної сторони їх трубної системи (ТС) (рис. 1). Відкладення такої товщини та структури, які показано на рис. 1, утворилися впродовж багатьох (3–5) сезонів експлуатації системи тепlopостачання.

Переважно вони не характерні при регулярних чистках і грамотній експлуатації. Проте, фотографії показують до якого стану можна довести трубну систему котлів та мережі і є прикладом того, чого робити не можна.

### **Завдання:**

1. Дослідити, за яких умов утворюються відкладення на ТС в котлах навіть при штатній роботі систем водопідготовки.
2. Оцінити коефіцієнт теплопровідності стінки трубки покритої відкладеннями з врахуванням їх реальної структури.
3. Визначити вплив відкладень на коефіцієнт теплопередачі (КПТ) трубної системи (ТС) котлів.

## 1. Умови виділення відкладень при штатній роботі систем очистки

Бачимо з рис. 1, що відкладення мають шарувату структуру. Знизу щільні карбонатні, ззовні – пористі органокарбонатні. Щоб у водному середовищі утворювалися карбонатні ( $\text{CaCO}_3$ ) відкладення, необхідне виконання кількох умов [1, С. 140]:



Рис. 1. Результат утворення відкладень на ТС котлів. Ліве фото, трубка після 4-х опалювальних сезонів, праве – після хімічної очистки при підготовці до нового сезону

- у воді повинна бути певна концентрація іонів кальцію  $\text{Ca}^{2+}$  та карбонатних іонів  $\text{CO}_3^{2-}$ ;
- добуток їх активних концентрацій ( $X$ ) повинен бути більшим від добутку розчинності, тобто  $(\text{Ca}^{2+}) \cdot (\text{CO}_3^{2-}) > L_{\text{CaCO}_3}$ ;
- швидкість руху води в трубках ТС повинна бути меншою «змивної» [2, С. 63], такої при якій сили гідромеханічного тертя змивають з поверхні трубок відкладення, які щойно утворилися.

При нормальній роботі системи пом'якшення води підживлення, яка компенсує втрати води в мережі та котлах, збільшення концентрації іонів кальцію можливе лише внаслідок розмивання відкладень в мережі при нижчій температурі та їх осадження на ТС котла, яка знаходиться при вищій, оскільки циркуляційна мережева вода не очищається від «іонів розмивання».

Як вже згадувалося, для ініціювання виділення твердого карбонату кальцію необхідно, щоб індекс сатурації (насичення) мережевої та котлової вод задовольняв умову,

$$SI(t) = \frac{(\text{Ca}^{2+}(t)) \cdot (\text{CO}_3^{2-}(t))}{L_{\text{CaCO}_3}(t)} > 1 \quad (1)$$

Оцінимо концентрацію іонів кальцію достатню для утворення відкладень, пам'ятаючи, що після фільтрів пом'якшення води концентрація іонів кальцію менша ніж  $0,1 \text{ мг/дм}^3$  ( $5 \text{ мкг-екв/дм}^3$ ). Приймемо, що індекс сатурації  $SI = 5$ , цього достатньо, щоб на водній поверхні ТС котла виділявся осад твердого  $\text{CaCO}_3$ . За технічними характеристиками системи водоочистки концентрація іонів карбонату в очищеній воді не більша за  $0,2 \text{ (мг-екв)/дм}^3$ , або  $6 \text{ мг/дм}^3$ . За таких

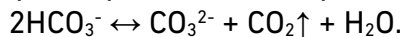
умов за (1) розрахуємо активну концентрацію іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , достатню для утворення  $\text{CaCO}_3$ .

$$(\text{Ca}^{2+}) = \frac{L_{\text{CaCO}_3}(t) \cdot \text{SI}(t)}{(\text{CO}_3^{2-}(t))} \quad (2)$$

Результат розрахунку показаний на рис. 2. З рисунка випливає, що при температурі  $70^\circ\text{C}$ , яку має вода в ТС котла, цілком можливе виділення карбонату кальція вже при концентрації його іонів  $50 \text{ мкг/дм}^3$ , що і спостерігається при роботі котлів.

Залежність індексу сатурації води щодо карбонату кальцію від температури визначається кількома факторами. Зокрема, серед них найважливіші такі:

1. Збільшення константи дисоціації вугільної кислоти другого ступеня при нагріванні води. При  $t < 70^\circ\text{C}$  цей процес іде так:



2. Зниження розчинності  $\text{CO}_2$  при нагріванні води.

Таким чином, в результаті нагрівання води рівноважні реакції відповідно до рівняння (3) зміщуються вправо і концентрація карбонатного іона  $\text{CO}_3^{2-}$  стає достатньою для створення пересичення щодо  $\text{CaCO}_3$ .

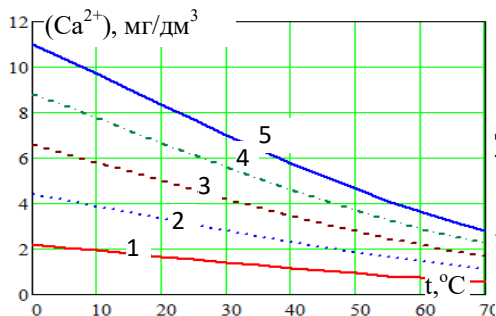


Рис. 2. Залежність активної концентрації іонів кальцію, що необхідна для виділення твердого  $\text{CaCO}_3$ , від температури водного середовища. Кривим 1...5 відповідають  $\text{SI} = 1$ ...5. Активна концентрація  $\text{CO}_3^{2-}$  прийнята  $6 \text{ мкг/дм}^3$

Переважно проблема збільшення концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{CO}_3^{2-}$  понад критичну ( $\text{SI} > 1$ ) виникає в результаті незадовільної роботи водоочисного обладнання, або у таких випадках:

1. При подачі на водоочистку води в кількості, яка перевищує її продуктивність.

2. При неякісній регенерації фільтрів, чи вичерпанні їх іонообмінної ємності.

3. При підсмоктуванні в мережу неочищеної води.

4. Внаслідок забруднення мережевої води продуктами розчинення відкладень і відсутності її пом'якшення.

При подачі в мережу очищеної ненасиченої води вона розчиняє

відкладення і переносить їх в зону високих температур, що є в ТС. Оскільки розчинність карбонатних сполук зі збільшенням температури знижується, то вони виділяються на водній стороні ТС.

## 2. Теплопровідність структурованих відкладень

Теплопровідність відкладень у 30–40 раз нижча від котлової Ст-20, тому навіть їх тонкий шар  $\approx 1$  мм може зменшити коефіцієнт теплопередачі ТС майже у двічі, що призводить до підвищення температури зовні ТС та вихідних газів. Можна показати, що залежність еквівалентного коефіцієнта теплопровідності  $\lambda(x)$  сандвіча, що складається з матеріалу ТС товщиною  $\Delta$  і теплопровідністю  $\lambda_{ст}$  та відкладень – товщиною  $x$  з теплопровідністю  $\lambda_b$  дається формулою,

$$\lambda_e(x) = \lambda_{ст} \cdot \left(1 + \frac{x}{\Delta}\right) \cdot \left(1 + \frac{x}{\Delta} \cdot \frac{\lambda_{ст}}{\lambda_b}\right)^{-1}. \quad (4)$$

З рис. 1 бачимо, що відкладення мають шарувату структуру [3, С. 23], тому визначимо, яким буде коефіцієнт теплопровідності у цьому випадку. При послідовному накладанні кількох шарів відкладень різної структури з різними тепловими опорами їх еквівалентний опір рівний

$$R_t = \sum_i \frac{\Delta_i}{\lambda_i} \quad \text{тоді} \quad \lambda_e = \frac{\sum_i \Delta_i}{\sum_i \frac{\Delta_i}{\lambda_i}}. \quad (5)$$

Наприклад, на рис. 1, для шару відкладень, який складається зі щільного карбонату кальцію (шар, що прилягає до стінки трубки)  $\lambda_{в1} \approx 3$  Вт/(м·К) товщиною 1 мм і пористого (зовнішнього шару)  $\lambda_{в2} \approx 0.9$  Вт/(м·К) такої ж товщини, отримуємо при товщині стінки трубки 1 мм та її  $\lambda_{ст} = 54$  Вт/(м·К) величину еквівалентного коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda_{екв} = \frac{\sum_i \Delta_i}{\sum_i \frac{\Delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\sum_i \Delta_i \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 + \lambda_2 \cdot \lambda_3 + \lambda_1 \cdot \lambda_3} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 0.9 \cdot 54}{3 \cdot 0.9 + 0.9 \cdot 54 + 3 \cdot 54} = 2.05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Зауважимо, що еквівалентний коефіцієнт теплопередачі шаруватой структури в нашому випадку рівний  $\lambda_{екв}/3\Delta = 680$  Вт/(м<sup>2</sup>К) і менший від найменшого з КТП  $\lambda_{в2}/\Delta = 900$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Теплопровідність пористого шару відкладень з прийнятною точністю можна розрахувати за формулою Максвелла,

$$\lambda_{екв} = \frac{2\lambda_{ТБ} + \lambda_c - 2\Pi \cdot (\lambda_{ТБ} - \lambda_c)}{2\lambda_{ТБ} + \lambda_c + \Pi \cdot (\lambda_{ТБ} - \lambda_c)} \cdot \lambda_{ТБ}, \quad (6)$$

або за спрощеною формулою

$$\lambda_{\text{екв}} = (1 - \Pi) \cdot \lambda_{\text{ТВ}} + \Pi \cdot \lambda_{\text{с}}, \quad (6a)$$

$\lambda_{\text{ТВ}}$ ,  $\lambda_{\text{с}}$  – теплопровідності твердих частинок  $\text{CaCO}_3$  і середовища (води) в якому вони знаходяться;  $\Pi$  – пористість структури.

Порівняємо оцінки величини еквівалентної теплопровідності пористої частини шару на рис. 1 за формулами (6) та (6a), приймаючи, що  $\lambda_{\text{ТВ}} = 2.8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\lambda_{\text{с}} = 0.7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\Pi = 0.45$ , тоді отримуємо для (6)  $1.7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а за (6a)  $1.85 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Бачимо, що похибка не перевищує 8% і з такою точністю можемо для розрахунків використовувати формулу (6a).

### 3. Коефіцієнт теплопередачі ТС котла з відкладеннями

Прийемо, що трубна система водогрійного котла складається з набору  $N$  однакових трубок з внутрішнім діаметром (12–50) мм і довжиною  $L$ . За таких умов КТП однієї забрудненої трубки можна приблизно представити як

$$k_3 = \frac{\beta_1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + R_3}, \quad (7)$$

де  $\beta_1$  – поправка, яка враховує нерівномірність поля швидкостей в прохідному перерізі; приймається  $\beta_1 = 0,92 \dots 0,95$ , переважно 0,92;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі з вогневої та водної сторін;  $\delta_{\text{ст}}$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  – товщина та теплопровідність стінок трубки котла;  $R_3$  – термічний опір відкладень (забруднень) на стінках трубки.

Вираз (7) перепишемо у вигляді, який дозволяє проаналізувати вплив забруднень на КТП трубок котлів

$$k_3 = \frac{k_0}{1 + \frac{k_0}{\beta_1} \cdot R_3}, \quad k_0 = \frac{\beta_1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}. \quad (8)$$

$k_0$  – КТП чистої трубки котла.

Маючи (8), можна записати приблизну формулу для КТП котла

$$K_3 = \sum k_3 = \frac{K_0}{1 + \frac{k_0}{\beta_1} \cdot R_3}, \quad (9)$$

$K_0$  – КТП чистого котла.

Встановимо зв'язок між  $K_0$  та  $k_0$ . Для цього використаємо рівняння для потоку тепла

$Q_T = K \cdot S \cdot \Delta t_{ln} = N \cdot s \cdot k \cdot \Delta t_{ln}$ , оскільки  $N = S/s$ , то  $K = k$  і формулу (9) можемо представити у вигляді

$$K_3 = \beta_1 \cdot \left( \frac{\beta_1}{K_0} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)^{-1} \quad (10)$$

Бачимо, що КТП забрудненого котла обернено залежить від величини теплового опору шару відкладень  $\delta_3/\lambda_3$  на трубках та від КТП чистого котла  $K_0$ . Причому, щоб забруднення впливали на КТП котла, потрібно, щоби величини доданків у знаменнику (10) були співмірними.

Розрахунок КТП забрудненого котла залежно від коефіцієнта теплопровідності та товщини відкладень показано на рис. 3.

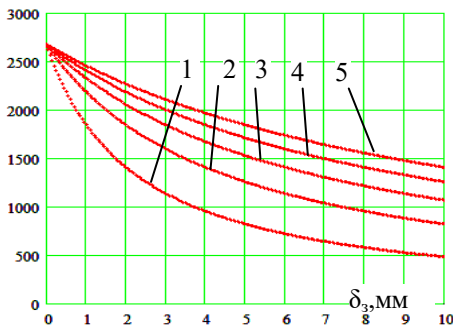


Рис. 3. Залежність КТП трубно-котельної системи водогрійного котла від товщини відкладень, з мм. Криві 1...5 відповідають КТП котла з відкладеннями з коефіцієнтами теплопровідності  $\lambda_3 = 1, 2, \dots, 5$  Вт/(м·К).  $K_0 = 2640$  Вт/(м²К)

З рис. 3 випливає, що відкладення товщиною 1 мм при  $\lambda_3 = 1$  Вт/(м·К) знижують КТП котла на 36%.

Для практики зручно ввести величину, що **характеризує стан забруднення котла**, позначимо її як  $\varphi$  – **коефіцієнт забруднення**.

$$\varphi = \frac{K_0 - K}{K_0} = 1 - \frac{K}{K_0} \approx R_3 \cdot \frac{K_0}{\beta_1} \cdot \left( 1 + \frac{K_0}{\beta_1} \cdot R_3 \right)^{-1}; \quad K = K_0 \cdot (1 - \varphi). \quad (11)$$

Величина коефіцієнта забруднення  $\varphi$  визначає ККД водогрійного котла, тобто його теплові втрати та логарифмічний перепад температур в ТС котла. Можна показати, що

$$\Delta t_{ln3} = \frac{\Delta t_{ln0}}{1 - \varphi}. \quad (12)$$

З (11) бачимо, що при  $\varphi \rightarrow 1$  КТП котла прямує до нуля, а перепад температур на ТС, див. (12), до безмежності. З (11) також випливає, що **коефіцієнт забруднення** пропорційний до термічного опору відкладень та до КТП чистого котла. Тобто, чим ефективніший котел

(більший КТП), тим він чутливіший до забруднень. Інакше кажучи, нові котли з високими КТП більш чутливі до забруднень ніж старі. Більше того, маючи незалежні вимірювання  $\varphi$  та початкове значення КТП для чистого котла, можна визначити термічний опір відкладень і опосередковано судити про їх товщину.

### **Висновки**

1. При тривалій роботі котлів на їх поверхні теплопередачі навіть при штатній роботі водопідготовки, формуються відкладення. Це пов'язано з залежністю розчинності  $\text{CaCO}_3$  від температури. При підвищенні температури розчинність  $\text{CaCO}_3$  зменшується. Формуються відкладення у дві стадії. На першій на поверхні трубок виникають окремі «острівців», які з часом з'єднуються і цементуються відкладеннями різної природи, в тому числі і залізоокисними, формуючи суцільний структурований шар.

2. Для мінімізації відкладень водопідготовку слід розраховувати на середню температуру води в трубках котла. Проте необхідно мати на увазі, що в мережі закислення води призводить до корозії обладнання. Для попередження наслідків розчинення відкладень в мережі воду потрібно періодично пом'якшувати.

3. Теплопровідність відкладень на один-два порядки нижча від теплопровідності матеріалів ТС, тому навіть тонкий шар відкладень знижує КТП котла (на 30–50%) і суттєво впливає на його ККД.

4. Зниження КТП призводить до двох можливих напрямків розвитку ситуації:

- перший – знижується температура нагріву води і відповідно зростає температура вихідних газів;

- водогрійні котли, які споряджені автоматами стабілізації температури нагріву, щоб підтримати її сталою, збільшують подачу палива, зростають втрати тепла з вихідними газами і збільшується тепловий напір на ТС котла, щоб побороти збільшений тепловий опір ТС, покритої відкладеннями.

5. З виразу для коефіцієнта забруднення випливає, що котли з високим КТП особливо чутливі щодо забруднення їх ТС. Зауважимо, що саме такими є сучасні водогрійні котли.

6. За умови стабільної подачі тепла споживачам ситуація переважно розвивається за другим напрямком. Наслідком цього є перепал палива і зниження економічності роботи котельні внаслідок збільшення питомих затрат палива на генерацію корисного тепла. Крім цього, підвищена витрата палива призводить до збільшення викидів

продуктів згоряння, в тому числі парникових газів.

1. Kochmarski V. Z., Melnyk V. O. Formation of calcium carbonate from model solutions. *Theoretical and experimental investigations. Scientific development and achievements*. Wenlock Road, London, UKN1 7GU, 2018. V. 4. P. 138–155. ISBN 978-1-9993071-0-3.
2. Кочмарський В. З. Стабільність охолодної води щодо відкладень  $\text{CaCO}_3$  та вплив режиму потоку на швидкість їх формування. *Енергетика і електрифікація*. 2020. № 7–8. С. 61–66.
3. Ермаков В. С., Ходырев В. Л. Исследование динамики загрязнения труб-бок конденсаторов паровых турбин. *Электрические станции*. 1983. № 1. С. 21–25.

## REFERENCES:

1. Kochmarski V. Z., Melnyk V. O. Formation of calcium carbonate from model solutions. *Theoretical and experimental investigations. Scientific development and achievements*. Wenlock Road, London, UKN1 7GU, 2018. V. 4. P. 138–155. ISBN 978-1-9993071-0-3.
2. Kochmarskyi V. Z. Stabilnist okholodnoi vody shchodo vidkladen  $\text{CaSO}_3$  ta vplyv rezhymu potoku na shvydkist yikh formuvannia. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2020. № 7–8. S. 61–66.
3. Ermakov V. S., Hodyirev V. L. Issledovanie dinamiki zagryazneniya tru-bok kondensatorov parovih turbin. *Elektricheskie stantsii*. 1983. № 1. S. 21–25.

---

**Kochmarskii V. Z., Candidate) of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D), Professor, Kostyuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D), Associate Professor, Tymeichuk O. Yu., Candidate of Engineering (Ph.D), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## DEPOSITS IN HEATING BOILERS AND THEIR CONSEQUENCES

**The problems of operation of boiler installations, in particular hot water boilers, which are connected with the formation of carbonate and combined deposits on the water side of their pipe systems (PS) are analyzed. The conditions, under which deposits are formed on the vehicle in boilers, even during the regular operation of water treatment systems, are studied. The coefficient of thermal conductivity of deposits is estimated taking into account their real structure. The influence of deposits on the heat transfer coefficient (HTC) of the pipe**



system of boilers is investigated. It is shown that during the regular operation of water treatment, deposits on the vehicle can be formed due to their erosion in the network and re-allocation on the pipe system of the boiler in the area of elevated temperature.

Preferably the deposits have a layered structure. Closer to the walls of the tubes, they are in the form of dense deposits of  $\text{CaCO}_3$ , and externally in the form of a porous structure. The thermal conductivity of such a layered system is calculated. For porous deposits, it is proposed to calculate according to Maxwell's formula and it is calculated the equivalent thermal conductivity of successive layers. An expression for the HTC of a contaminated pipe system is obtained. It is shown that a layer of carbonate deposits with a thickness of 1 mm reduces HTC by 36%. The expression for the pollution coefficient (PC) is calculated. It is shown that the value of the PC is proportional to the product of the thermal resistance of the contaminants on the HTC of a clean boiler. Therefore, boilers with high HTC are more sensitive to contamination. As the PC grows, the logarithmic temperature difference on the vehicle increases sharply. Deposits are especially dangerous for boilers operating in the mode of constant heat supply to consumers with the set temperature of water heating. In this case, pollution is accompanied by fuel overheating with all the negative consequences. The expressions obtained in the work can be useful in determining the timing of the withdrawal of boilers for cleaning. To minimize deposits, it is proposed to do periodic purification of mains water from  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{CO}_3^{2-}$  ions and stabilization treatment of mains water.

**Keywords:** hot water boilers; pipe systems; structure of deposits; thermal conductivity; heat transfer coefficient.

---

Кочмарский В. З., к.ф.-м.н., профессор, Костюк О. П., к.т.н., доцент, Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## ОТЛОЖЕНИЯ В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ И ИХ СЛЕДСТВИЯ

Анализируются проблемы эксплуатации котельных установок, в частности водогрейных котлов, связанные с образованием карбонатных и комбинированных отложений с водной стороны их

**трубных систем (ТС). Исследуются условия образования отложений на ТС в котлах, даже при штатной работе систем водоподготовки. Рассчитывается коэффициент теплопроводности отложений с учетом их реальной структуры. Изучается влияние отложений на коэффициент теплопередачи ТС.**

***Ключевые слова:* водогрейные котлы; трубные системы; структура отложений; теплопроводность; коэффициент теплопередачи.**

---