

УДК 621.182.4:696.42+697.43
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).20](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).20)

ALGORITHM FOR OPERATIVE CONTROL OF THE CLEANLINESS OF WATER HEATING BOILER PIPE SYSTEMS

АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЧИСТОТИ ТРУБНИХ СИСТЕМ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

Volodymyr Z. Kochmarskii
v.z.kochmarskii@nuwm.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2036-8841

Oleksandr P. Kostyuk
o.p.kostiuk@nuwm.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6553-915X

В. З. Кочмарський,
канд. фіз.-мат. наук, професор

О. П. Костюк,
канд. техн. наук, доцент

The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Abstract. The aim of the work is to develop an algorithm for monitoring the state of boiler tube systems (TS) based on measuring the temperature of the exhaust gases, their flow rate, and the amount of fuel overconsumption associated with the formation of deposits on the boiler TS to determine the economically justified moment of the boiler shutdown for TS cleaning.

Methods. We consider hot-water fire-tube boilers used in heat supply networks. In such boilers, even during the normal operation of the water treatment plant, deposits, mainly of calcium carbonate, are formed on the water side of the fuel element. The thermal conductivity of the heating medium material is in the range of 54...130W/m·K, and that of the deposits is 1...3W/m·K, i.e. ten times lower. This means that a layer of deposits with a thickness of ≈ 2 mm reduces the heat transfer coefficient of the system by almost half, which leads to an increase in the temperature of the outgoing gases in the flue pipes, a decrease in the temperature of the outgoing water and an increase in heat losses with the outgoing gases and, accordingly, a decrease in the boiler efficiency. Since the heat supply system operates according to a constant temperature schedule, to compensate for the decrease in the outlet water temperature, it is necessary to burn additional fuel and thus reduce the efficiency of the boiler plant.

Results. Based on the assumption of the constancy of heat supply to the grid regardless of the state of cleanliness of the fuel system, a connection is established between the decrease in the heat transfer coefficient (HTC) of the boiler's fuel system and the temperature of the exhaust gases, their consumption, and the amount of fuel overconsumption. The decrease in the boiler efficiency depending on these values is calculated. It is shown that at an initial thermal conductivity of $\approx 154\text{W/m}^2\text{K}$ and a thermal conductivity of $\approx 1.5\text{W/mK}$, the thermal conductivity of the boiler system decreases by 17 %, and the relative change in efficiency by 25 % at a deposit thickness of less than 2 mm. A clear dependence of the increase in the fuel combustion rate on the relative change in boiler efficiency was obtained. An algorithm for controlling the state of the boiler's TC based on the measurement of these values is proposed.

Scientific novelty. The expressions establishing the relationship between the relative change in boiler efficiency, the boiler's thermal efficiency and the temperature of the exhaust gases, their consumption and the amount of fuel overconsumption are obtained. These expressions make it possible to formulate an algorithm for monitoring the state of the boiler's heating system based on the measurement of these values.

Practical value. The formulated algorithm for monitoring the state of the heating medium in terms of deposits allows us to determine the moment when the boiler is put out for cleaning the heating medium based on a comparison of the costs of fuel overconsumption with the costs of cleaning the heating medium, provided that the cleaning costs become less than the cost of fuel losses.

Key words: hot-water boiler; deposits; efficiency; fuel overrun; cleaning moment.

Анотація. Метою роботи є розробка алгоритму контролю стану трубних систем (ТС) котла, що ґрунтується на вимірюванні температури вихідних газів, їх витрати та величини перевитрати палива, зв'язаної з утворенням відкладень на ТС котла для визначення економічно-обґрунтованого моменту виводу котла на очистку ТС.

Методика. Розглядаються водогрійні жаротрубні котли, що використовуються в мережах теплопостачання. В таких котлах, навіть, при штатній роботі водопідготовчої установки з водяної сторони на ТС творяться відкладення, переважно карбонату кальцію. Теплопровідність матеріалу ТС знаходиться в межах 54...130 Вт/м·К, а відкладень 1...3 Вт/м·К, тобто в десятки раз менша. Це означає, що шар відкладень товщиною ≈ 2 мм зменшує коефіцієнт теплопередачі системи майже у два рази, що призводить до підвищення температури вихідних газів в жарових трубах, зниження температури вихідної води та росту втрат тепла з вихідними газами і, відповідно, до зменшення коефіцієнту корисної дії (ККД) котла. Оскільки система теплопостачання працює за сталим температурним графіком, то для компенсації зниження температури вихідної води доводиться додатково спалювати паливо і таким чином знижувати економічність роботи котельної установки.

Результати. На підставі припущення про сталість подачі теплоти в мережу незалежно від стану чистоти ТС, встановлюється зв'язок між зменшенням коефіцієнту теплопередачі (КТП) ТС котла та температурою вихідних газів, їх витратою та величиною перевитрати палива. Розраховано зменшення ККД котла залежно від вказаних величин. Показано, що при початковому КТП рівному ≈ 154 Вт/м²К, теплопровідності відкладень ≈ 1.5 Вт/мК, КТП ТС зменшується на 17%, а відносна зміна ККД на 25% при товщині відкладень меншій за 2 мм. Отримано явну залежність збільшення швидкості згорання палива від відносної зміни ККД котла. Пропонується алгоритм контролю стану ТС котла, який ґрунтується на вимірюванні вказаних величин.

Наукова новизна. Отримано вирази, що встановлюють зв'язок між відносною зміною ККД котла, КТП ТС і температурою вихідних газів, їх витратою та величиною перевитрати палива. Згадані вирази дозволяють сформулювати алгоритм контролю стану ТС котла, який ґрунтується на вимірюванні вказаних величин.

Практична цінність. Сформульований алгоритм контролю стану ТС щодо відкладень дозволяє визначити момент виводу котла на очистку ТС на підставі порівняння затрат на перевитрату палива з затратами на очистку ТС, за умови, що затрати на очистку стають меншими від вартості втрат палива.

Ключові слова: водогрійний котел; відкладення; ККД; перевитрата палива; момент очистки.

СУТЬ ПРОБЛЕМИ

Відкладення на поверхнях теплопередачі в теплообмінних апаратах, що використовують сиру (не знесолону воду) має давню історію, зокрема це стосується відкладень на ТС конденсаторів турбін ТЕС та АЕС [1, с. 61]. Проте, використання знесоленої води, наприклад, в системах теплопостачання, не гарантує від утворення відкладень [2, 1497; 3, с. 75]. Зокрема, при експлуатації водогрійних жаротрубних котлів, навіть, при штатній роботі водопідготовчої установки з водяної сторони на ТС котла утворюються відкладення, переважно карбонату кальцію [4, с. 87; 5, с. 213]. Теплопровідність матеріалу ТС знаходиться в межах 54...130 Вт/м·К, а відкладень 1...3 Вт/м·К, тобто в десятки раз менша [6, с. 140; 7, с. 755]. Це означає, що шар відкладень товщиною ≈ 2 мм може зменшити коефіцієнт теплопередачі від газів до водного теплоносія майже удвічі, що призводить до підвищення температури вихідних газів в жарових трубах, див. рис. 1 та до одночасного зменшення при цьому потоку тепла від продуктів згорання до теплоносія, тобто мережевої води.

Щоб забезпечити потрібну теплопродуктивність котла щодо мережевої води при заданій температурі вихідної необхідно збільшувати витрату палива, а надлишок тепла з жарових труб викидається в атмосферу внаслідок підвищення температури вихідних газів та їх кількості. Таким чином знижується ККД котла і виникає перевитрата палива. Часто на практиці теплопостачання на це не зважають, експлуатуючи забруднені котли до закінчення опалювального сезону. Під час ремонту оглядають ТС і якщо

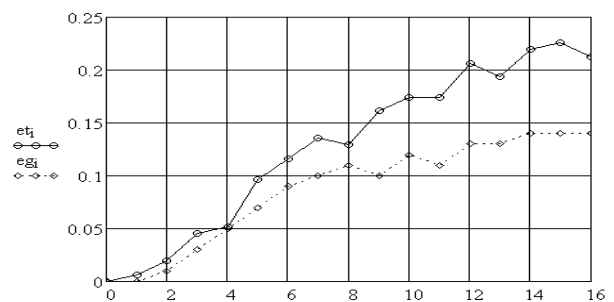


Рис. 1. Залежності відносного приросту температури e_t та відносного збільшення маси e_g вихідних газів котла від часу його експлуатації внаслідок росту відкладень на ТС. На горизонтальній осі відкладено десятиденки, тобто тут обмежились терміном експлуатації котла рівним 160 добам. Бачимо, що вклади від росту температури газів e_t та від приросту маси вихідних газів e_g співмірні

товщина відкладень невелика (≈ 1.1 – 1.5 мм), то котли не чистять і продовжують їх експлуатацію наступного сезону. Проте, як побачимо в подальшому, навіть, товщина відкладень ≈ 1 мм може суттєво знизити ККД котла і призводити до значних втрат палива.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розробити алгоритм неперервного контролю за роботою котла і за об'єктивними показниками визначати граничний, економічно обґрунтований термін експлуатації котла та момент виведення його на очистку. Природно прийняти, що цей термін визначається з умови перевищення втрат внаслідок перевитрати палива над затратами на очистку ТС котла.

Такий режим роботи котлів прийнятий у всьому цивілізованому світі, проте у нас, внаслідок монополії

теплопостачальників і відсутністю незалежного контролю над обґрунтуванням цін на тепло, теплопостачальник працює в режимі перевитрати палива, а втрачає перекладає на плечі покупців тепла, тобто на нас з вами.

РОЗРАХУНОК ЗМЕНШЕННЯ ККД ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА ВНАСЛІДОК ЗАБРУДНЕННЯ ТС ВІДКЛАДЕННЯМИ

Приймаємо, що водогрійний котел подає в мережу воду заданої температури та постійної витрати, тобто працює з заданою теплопродуктивністю і сталим температурним графіком. Температуру зворотної води, що приходить з мережі в котел позначимо $t_{зв}$ °C, а температуру води вихідної з котла t_m °C. Тоді рівняння теплового балансу котла

$$Q_k = Q_m + Q_{вт}. \quad (1)$$

Приймаємо, що потужність втрат тепла визначається лише димовими газами, тобто нехтуємо іншими втратами, зокрема через поверхню котла та з твердими відходами (для твердопаливних котлів). Тоді теплову потужність втрат можемо записати у вигляді

$$Q_{вт} = G_r \cdot C_r \cdot (t_{вр} - t_{ог}), \quad (2)$$

G_r , C_r – масова витрата газів, кг/с, C_r – їх теплоємність, кДж/кг·K; $t_{вр}$ – температура газів на виході з котла; $t_{ог}$ – початкова температура, газоповітряної суміші на вході у котел.

Тепло Q_m , що подається від котла в мережу запишемо аналогічно,

$$Q_m = G_m \cdot C_b \cdot (t_m - t_{зв}), \quad (3)$$

G_m – масова витрата мережевої води через котел; C_b – питома теплоємність води, $t_{зв}$ – температура зворотної води.

Рівняння (1) перепишемо у вигляді

$$I = \frac{Q_m}{Q_k} + \frac{Q_{вт}}{Q_k}. \quad (4)$$

За означенням ККД котла $\eta = \frac{Q_m}{Q_k}$, тому з (4) отримуємо,

$$\eta = 1 - \frac{Q_{вт}}{Q_k} = \frac{G_m \cdot C_b \cdot (t_m - t_{зв})}{Q_k}. \quad (5)$$

Зауважимо, що за умовами роботи котла, $Q_m = \text{const}$, і отримуємо корисні співвідношення $\eta \cdot Q_k = \text{const}$, отже

$$\eta \cdot Q_k = \eta \cdot B \cdot Q_{нг} = Q_m, \text{ звідси } B = \frac{\text{Const}}{\eta}, \quad (6)$$

B , $Q_{нг}$ – швидкість спалювання палива, кг/с та нижча теплота згоряння палива, МДж/кг.

З (6) випливає, що при постійній подачі тепла в мережу ККД котла та швидкість спалювання палива обернено пропорційні. Отже, при експлуатації котла зі сталою подачею теплоти в мережу ріст швидкості спалювання палива свідчить про утворення відкладень на ТС яке пов'язане зі зменшенням ККД.

З другої сторони, при відкладеннях на ТС котла зменшується його коефіцієнт теплопередачі і для підтримання сталості Q_m , необхідно підвищувати температуру всередині жарових труб котла за умови сталості подачі тепла в мережу. Ця вимога записується у вигляді рівняння,

$$Q_m = S \cdot K_o \cdot \Delta t_{ln}^o = S \cdot K \cdot \Delta t_{ln}, \quad (7)$$

S – площа теплопередачі ТС котла; K_o , K – коефіцієнти теплопередачі чистої та забрудненої ТС, відповідно; Δt_{ln} – логарифмічна температура теплопередачі. При $S = \text{const}$ з рівняння (7) отримуємо,

$$\frac{K_o}{K} = \frac{\Delta t_{ln}^o}{\Delta t_{ln}};$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\ln \frac{t_{\max}}{t_{\min}}}, \quad t_{\max} = t_r - t_{зв}; \quad t_{\min} = t_c - t_m. \quad (8)$$

Для подальшого розрахунку спростуємо вираз для Δt_{ln} , який при

$$t_m - t_{зв} = \Delta t_b, \quad t_c - t_m = t_c - t_{зв} - \Delta t_b$$

приймає вигляд

$$\Delta t_{ln} = - \frac{\Delta t_b}{\ln \left(1 - \frac{\Delta t_b}{t_c - t_{зв}} \right)}. \quad (9)$$

Скористаємось тим, що $\Delta t_b \ll t_r - t_{зв}$. Справді, в реальних системах

$$\Delta t_b \approx 30^\circ \text{C}, \quad t_r - t_{зв} \approx 560^\circ \text{C}, \quad \text{то } \frac{\Delta t_b}{t_c - t_{зв}} \approx 0,1,$$

тому з похибкою меншою від 0,1 можемо записати:

$$-\ln \left(1 - \frac{\Delta t_b}{t_c - t_{зв}} \right) \approx \frac{\Delta t_b}{t_c - t_{зв}}. \quad (10)$$

Після перетворень отримуємо приблизний (з похибкою $\approx 0,1$) вираз для логарифмічної різниці температур теплопередачі,

$$\Delta t_{ln} = \frac{t_m - t_{зв}}{\Delta t_b} \cdot (t_r - t_{зв}) = t_r - t_{зв}. \quad (11)$$

Відповідно, з врахуванням (11), рівняння (8) трансформується до,

$$\frac{K_o}{K} = \frac{t_r - t_{зв}}{t_r^o - t_{зв}}. \quad (8a)$$

Формулою (8a) встановлюється зв'язок між зміною КТП та температури вихідних газів. Можемо записати,

$$K = K_o \cdot \frac{t_r^o - t_{зв}}{t_r - t_{зв}} = K_o \cdot \left(1 + \frac{\Delta t_r}{t_r^o - t_{зв}} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Бачимо, що КТП забрудненого котла зменшується, оскільки температура вихідних газів з чистого котла $t_r^o < t_r$ менша від такої ж забрудненого.

Нижче, на рис. 2 показано розрахунок КТП з часом експлуатації котла за (12) на підставі експериментальних даних, отриманих на одній з котелень.

З другої сторони, збільшення температури вихідних газів є наслідком збільшення витрати палива в котлі та відповідного збільшення витрати вихідних газів.

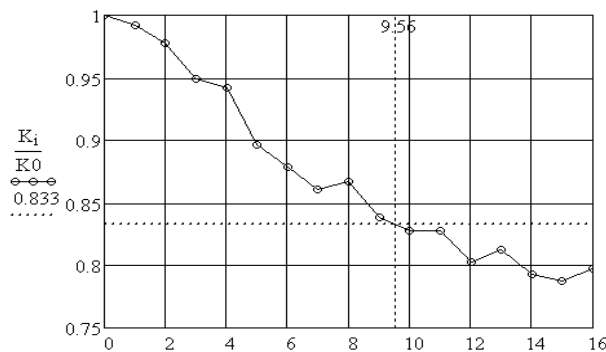


Рис. 2. Залежність відносної величини КТП котла від товщини відкладень на його ТС від часу експлуатації. Прийнято, що теплопровідність відкладень $\lambda_v = 1.5 \text{ Вт/мК}$. Вертикальна мітка означає 96 добу експлуатації, а горизонтальна – рівна відносній зміні КТП котла відповідній відносній зміні ККД 25 %, що відповідає зменшенню КТП котла на 17 %. При розрахунках за формулою (12) прийнято: $t_{\text{го}} = 560^\circ\text{C}$, $t_{\text{зв}} = 40^\circ\text{C}$

Позначимо витрату вихідних газів забрудненого котла

$G_z = G_z^o + \Delta G_z$ та приймемо, що $t_{oz} = t_{oz}^o$, (13)
 $G_z^o, \Delta G_z$ – витрата вихідних газів з чистого котла та їх приріст для забрудненого.

У виразі (13) вважається, що початкова температура газоповітряної суміші при подачі в котел однакова як для чистого, так і забрудненого котла.

Зауважимо, що витрата газів фіксується лічильником, встановленим на вході в димохід котла. Розрахуємо відносну зміну ККД котла, яка за означенням рівна

$$\varepsilon_\eta = \frac{\eta^o - \eta}{\eta^o} = \frac{\Delta \eta}{\eta^o} = \left(\frac{Q_m}{Q_k} - \frac{Q_m}{Q_k} \right) \cdot \frac{Q_k^o}{Q_m} = \left(\frac{Q_k - Q_k^o}{Q_k} \right) = \frac{\Delta Q_k}{Q_k}. \quad (14)$$

Можна показати, що, приріст теплоти (по суті втрата теплоти), яку в силу необхідності підтримувати сталу подачу теплоти мережевій воді генерує забруднений котел дається виразом

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_k^o = G_z^o \cdot C_z \cdot (t_z - t_z^o) + \Delta G_z \cdot C_z \cdot (t_z - t_{oz}^o). \quad (15)$$

Член $G_z^o \cdot C_z \cdot (t_z - t_z^o)$ – характеризує втрату тепла при незмінній витраті вихідних газів, але при збільшенні їх температури в трубах, $\Delta t_r = t_r - t_{r0}$; другий член у правій частині (15) $\Delta G_z \cdot C_z \cdot (t_r - t_{or})$ – представляє втрати тепла внаслідок збільшення масової витрати вихідних газів.

Підставивши (14) в (15), отримуємо вираз для розрахунку ε_η , який виражається через вимірювані величини

$$\frac{\Delta Q_k}{Q_k} = \frac{\varepsilon_\eta}{1 - \eta} = \frac{G_z^o \cdot (t_z - t_z^o)}{G_z \cdot (t_z - t_{oz}^o)} + \frac{\Delta G_z}{G_z} = \frac{G_z^o}{G_z} \cdot \left(\frac{\Delta t_z}{t_z - t_{oz}^o} + \frac{\Delta G_z}{G_z^o} \right). \quad (15a)$$

Таким чином, з (15a) випливає, що вимірюючи витрату вихідних з котла газів G_z , їх температуру t_r та температуру газоповітряної суміші на вході в котел t_r^o можемо розраховувати відносне зменшення ККД котла. Залежність відносної зміни ККД ε_η від часу роботи котла, виміряна у такий спосіб, показана на рис. 3.

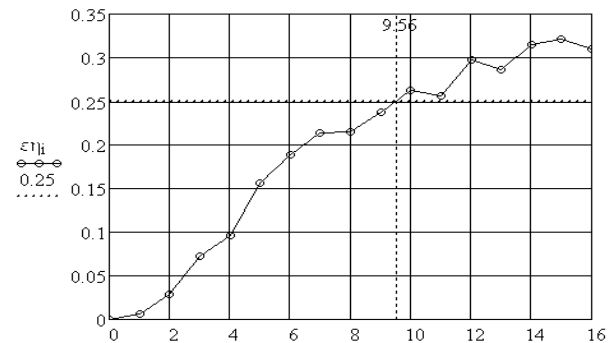


Рис. 3. Залежність відносного зменшення ККД котла від часу його експлуатації. Вертикальна мітка відповідає 96 добі, а горизонтальна – відносній зміні ККД 25 %

З рис. 3 бачимо, що на 96 добу роботи котла відносне зменшення ККД котла досягло 25 % і це може служити сигналом про доцільність очистки ТС котла від забруднень. Оцінимо збільшення швидкості згорання палива у водогрійному котлі потужністю 3 МВт на момент відносної зміни ККД 25 %. Для цього приймемо нижчу теплотворну здатність палива (газу) $Q_{\text{нт}} = 33.5 \text{ МДж/кг}$. Відповідно за (16) отримуємо $\Delta B \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$, або 2579 кг/добу. Це, звичайно, неприпустимі втрати і котел потрібно було виводити на очистку.

Перевитрата тепла, згенерована забрудненим котлом, ΔB (кг/с) виражається через відносну зміну ККД котла ε_η

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_k}{Q_{\text{нт}}} = \frac{\varepsilon_\eta}{1 - \varepsilon_\eta} \cdot \frac{Q_k^o}{Q_{\text{нт}}}. \quad (16)$$

Порівнюючи (16) та (15a), знаходимо, що моніторинг перевитрати палива в котлі внаслідок забруднення його ТС забезпечується вимірюванням в неперервному режимі двох параметрів G_z та t_r , що забезпечується лічильником вихідних газів та двома термометрами для вимірювання температури газів у першому та останньому ході жарових труб.

Причиною перевитрати палива є забруднення ТС котла відкладеннями, які формують на водній поверхні жарових труб шар певної товщини, збільшуючи тепловий опір переходу «продукти згорання – мережева вода». Зрозуміло, що ріст температури вихідних газів збільшується зі збільшенням товщини відкладень на ТС. Встановимо цей зв'язок порівнюючи КТП визначені у два незалежні способи див. (12) та вираз [3, с. 75],

$$K = K_o \cdot \left(1 + K_o \cdot \frac{\delta_e}{\lambda_e} \right)^{-1}, \quad (17)$$

δ_v , λ_v – товщина і теплопровідність відкладень. З порівняння (12) та (17) знаходимо величину $\frac{\delta_v}{\lambda_v}$, яку назовемо *фактором відкладень*, позначимо F ,

$$F = \frac{\delta_v}{\lambda_v} = \frac{1}{K_0} \cdot \frac{\Delta t_r}{t_r^0 - t_{zv}} = \text{Const} \cdot \Delta t_r, \text{Const}$$

$$\text{Const} = \frac{1}{K_0} \cdot \frac{1}{t_r^0 - t_{zv}}. \quad (18)$$

F виражається вимірюванням t_r та температури зворотної води t_{zv} .

Розрахувавши величину F за (17) знаходимо КТП забрудненого котла

$$K = K_0 \cdot (1 + K_0 \cdot F)^{-1}. \quad (19)$$

Для визначення товщини відкладень прийемо $\lambda_v = 1.5 \text{ Вт/мК}$ [6, с. 140]. Тоді за (18) отримуємо, що $\delta_v = \lambda_v \cdot F$. Розрахунок товщини відкладень за даними вимірювань поданий на рис. 4.

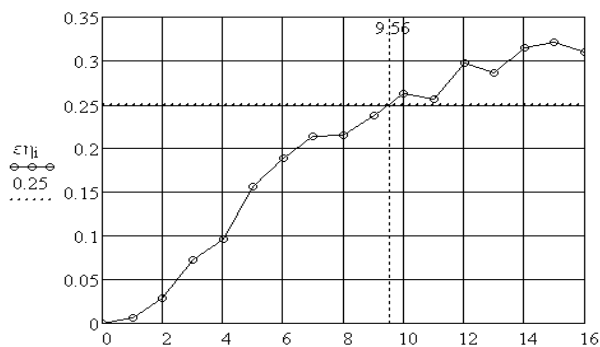


Рис. 4. Залежність товщини відкладень на ТС котла від часу його експлуатації. Прийнято, що теплопровідність відкладень $\lambda_v = 1.5 \text{ Вт/мК}$. Вертикальна мітка відповідає 96 добі експлуатації, а горизонтальна – товщині відкладень $\approx 2 \text{ мм}$ і відповідає відносній зміні ККД 25 %

Бачимо, що на 96-й добі експлуатації котла, коли відносна зміна ККД знизилася на 25 %, товщина відкладень була близькою до 2 мм, відповідно фактор відкладень становив $1.27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Вимірювання середньої товщини відкладень при чистці ТС котла

дало близьке значення, що вказує на правомірність припущень, які були зроблені в процесі аналізу роботи котла і задовільне відображення реального процесу забруднення наведеними тут модельними розрахунками.

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ВИВЕДЕННЯ КОТЛА НА ОЧИСТКУ

Нижче формулюємо алгоритм визначення моменту очистки котла, тобто перерахуємо послідовність дій, які при вимірюванні режимних параметрів котла (t_r , G_r) дозволять визначити поточне значення його ККД і розрахувати перевитрату тепла в котлі. Ці дані приймаються за обґрунтування прийняття рішення про вивід котла на очистку.

1. Неперервно вимірюючи t_{zv} та t_r за формулою (18) визначаємо *фактор відкладень* і розраховуємо КТП котла. Якщо КТП суттєво зменшився порівняно з чистим котлом, то маємо підстави вважати, що причиною зменшення КТП є забруднення ТС котла.

2. За даними вимірювань параметрів: G_r та t_r неперервно розраховуємо ε_{η} , а за формулою (16) величину швидкості перевитрати палива ΔB .

3. Порівнюємо затрати на очистку котла $З_k$ та втрати від перевитрати палива B_r і з умови $B_r > З_k$ визначаємо економічно обґрунтований момент очистки:

$$\Delta B \cdot (\tau_e - \tau_1) \geq \Delta \tau_0 \cdot Q_k \cdot C_T, \quad (20)$$

τ_e , τ_1 , $\Delta \tau_0$, C_T – відповідно, опалувальний період котла, момент виводу котла на очистку щодо початку експлуатації, час очистки, теплопродуктивність котла та ціна теплової енергії, МДж/кг.

ВИСНОВОК

1. Вимірювання чотирьох режимних параметрів котла, а саме: τ , G_r , t_r та t_{zv} дозволяє повністю контролювати режим роботи котла та визначати економічно обґрунтований момент зупинки на очистку його трубних систем.

2. Процедура визначення часу виведення котла на очистку можна повністю автоматизувати і дані вивести на монітор контролю режиму роботи котла.

REFERENCES

- [1] Kochmarskii, V.Z. (2020). Stabilnist vody systemy oholodjennia schodo vidkladen CaCO_3 i vplyv na schvydkist ich formuvannia rejymu vodnoho potoku. [Stability of cooling water with respect to CaCO_3 deposits and the influence of the flow regime on the rate of their formation]. *Energetyka i Electryficacia*. № 7/8, pp. 61–66.
- [2] Jean-Yves Gal & Jean-Claude Bollingerb, Henri Tolosa, Nathalie Gache. Calcium carbonate solubility: a reappraisal of scale formation and inhibition. *Talanta* 43 (1996), pp. 1497–1509.
- [3] Kochmarskii, V.Z. & Kostiuk, O.P. & Tymeichuk O.Yu. (2021). Vidkladennia u vodohrijnykh kotlach i jych naslidky. [Deposits in water heating boilers and their consequences]. *Visnyk NUWEM- Bulletin of the National University of Water and Environmental Management*, issue 3(95). Rivne 2021. Pp. 75–84.
- [4] Dionisis Katsikopoulos & Ángeles Fernández-González & Angel Carmelo Prieto & Manuel Prieto. (2008). Co-crystallization of Co(II) with calcite: Implications for the mobility of cobalt in aqueous environments. *Chemical Geology* 254, pp. 87–100.
- [5] Hamidreza Ghaedamini & M.C. Amiri. (15 May 2019). Effects of temperature and surfactant concentration on the structure and morphology of calcium carbonate nanoparticles synthesized in a colloidal gas aphrons system. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 282, pp. 213–220.
- [6] Kryuchkov, E. N. & Nazarenko, A. N. (2001). Do pytannja pro teploprovodnist vidkladen na poverchnjach teploobminnykiv ta truboprovodach metalurhichnykh zavodiv. [On the question of the value of thermal conductivity of deposits on heat

exchange surfaces and in pipelines of metallurgical units]. *Trudy Zaporizkoiy Derjavnoiy inženernoiy akademiiy metalurgiiy – Proceedings of the Zaporizhzhia State Engineering Academy of Metallurgy*. Issue 4. Pp. 140–142.

- [7] JY Gal. & Fovet Yannick & Nathalie Gache. (2002). Mechanisms of scale formation and carbon dioxide partial pressure influence. Part I. Elaboration of experimental method and a scaling model. *Water Res.*, v. 36, pp. 755–763.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кочмарський, В.З. (2020). Стабільність охолодної води щодо відкладень CaCO_3 та вплив режиму потоку на швидкість їх формування. *Енергетика і електрифікація*. № 7/8. С. 61–66.
- [2] Jean-Yves Gal & Jean-Claude Bollingerb & Henri Tolosa & Nathalie Gache. (1996). Calcium carbonate solubility: a reappraisal of scale formation and inhibition. *Talanta* 43, pp. 1497–1509.
- [3] Кочмарський, В.З. & Костюк, О.П. & Тимейчук, О.Ю. (2021). Відкладення у водогрійних котлах та їх наслідки. *Рівне. Вісн. НУВГП*, вип. 3(95). С. 75–84.
- [4] Dionisis Katsikopoulos & Ángeles Fernández-González & Angel Carmelo Prieto & Manuel Prieto. (2008). Co-crystallization of Co(II) with calcite: Implications for the mobility of cobalt in aqueous environments. *Chemical Geology* 254, pp. 87–100.
- [5] Hamidreza Ghaedamini & M.C. Amiri. (15 May 2019). Effects of temperature and surfactant concentration on the structure and morphology of calcium carbonate nanoparticles synthesized in a colloidal gas aphrons system. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 282, pp. 213–220.
- [6] Крючков, Е. Н. & Назаренко, А. Н. (2001). До питання про величину теплопровідності відкладень на поверхнях теплообміну і в трубопроводах металургічних агрегатів. *Труди Запорізької державної інженерної академії металургії*. Вип. 4. С. 140–142
- [7] JY Gal. & Fovet Yannick & Gache Nathalie. (2002). Mechanisms of scale formation and carbon dioxide partial pressure influence. Part I. Elaboration of experimental method and a scaling model. *Water Res.*, v. 36, pp. 755–763.

© Кочмарський В. З., Костюк О. П.

Дата надходження статті до редакції: 26.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 07.06.2025