

УДК 621.181.7

Ю. В. КУРІС, канд. техн. наук, доцент, чл.-кор. Академії інженерних наук України  
Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя

## ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

*В статтє описан модуль, которий позволил повысить точность определения составляющих теплового баланса теплогенерирующих установок металлургических предприятий, которые работают как на одном виде топлива, так и на их смеси, а также обеспечил расчет теплообмена и горение, анализ работы газовых и воздушных трактов оборудования.*

*У статті описано модуль, який дозволив підвищити точність визначення складових теплового балансу теплогенеруючих установок металургійних підприємств, що працюють як на одному виді палива, так і на їх суміші, а також забезпечив розрахунок теплообміну і горіння, аналіз роботи газових і повітряних трактів обладнання.*

### Вступ

Українська металургійна промисловість в даний час функціонує в умовах глобальної конкуренції на світовому ринку металів. У зв'язку з цим, одним з найважливіших напрямків промислової політики в державі на сучасному етапі є забезпечення конкурентоздатності продукції вітчизняного металургійного комплексу серед основних виробників металів. Тільки одночасне і взаємопов'язане рішення вищезначених проблем дозволить українським металургійним комплексам нарощувати виробництво, посилювати інноваційні тенденції і успішно конкурувати з кращими іноземними виробниками.

### Основна частина

Ефективність будь-якого теплового агрегату визначається, в першу чергу, станом і роботою системи опалення, правильністю вибору палинкових пристроїв та режимів спалювання палива.

Основними особливостями та недоліками вітчизняної металургії є високі капіталомісткість, енерго-і ресурсоспоживання.

При розробці модуля по визначенню складових теплового балансу теплогенераторів були проаналізовані як вітчизняні [1, 2], так і закордонні методики. Зокрема, порівняння проводилося з Німецьким стандартом DIN 1942, впроваджуваним у Україні по лінії "Tacis" у вигляді комп'ютерної програми "Boiler" [1] і Британським стандартом [2, 3, 4]. Загальним для даних методик є те, що вони розрізняють два методи визначення КПД бруто котлоагрегату:

– по прямому балансу

$$\eta_k = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{подв}}} \left( \eta_k = \frac{Q_N}{Q_{Z_{\text{ges}}}} \right), \quad (1)$$

– по зворотному балансу

$$\eta_k = 1 - \sum_1^6 q_i \left( \eta_k = 1 - \sum_1^4 l_i \right), \quad (2)$$

де  $\eta_k$  – ККД котлоагрегату;

$Q_{\text{пол}}$  ( $Q_N$ ) – корисно використана теплота;

$Q_{\text{подв}}$  ( $Q_{Z_{\text{ges}}}$ ) – підведена теплота;

$\sum q_i$  ( $\sum l_i$ ) – сума теплових втрат.

У методиках [1, 3] використовується однаковий підхід до визначення корисної використаної теплоти, у загальному випадку формула для її розрахунку в [1, 2] має вигляд, кВт:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{пол}} = & (D_{\text{п.п}} - D_{\text{обв}})(i_{\text{п.п}} - i_{\text{пв}}) + D_{\text{обв}}(i_{\text{п.п}} - i_{\text{обв}}) + \\
 & + \sum D_{\text{впр}}(i_{\text{пв}} - i_{\text{впр}}) + D_{\text{пр}}(i_{\text{кип}} - i_{\text{пв}}) + \\
 & + D_{\text{н.п}}(i_{\text{н.п}} - i_{\text{пв}}) + \sum D_{\text{вт.п}}(i''_{\text{вт.п}} - i'_{\text{вт.п}}) + \\
 & + \sum D_{\text{впр}}^{\text{пп}}(i''_{\text{вт.п}} - i_{\text{впр}}^{\text{пп}}) + \sum Q_{\text{от}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

де  $D_{\text{пп}}$ ,  $D_{\text{пр}}$ ,  $D_{\text{н.п}}$ ,  $D_{\text{вт.п}}$ ,  $D_{\text{обв}}$  – відповідно витрата перегрітого пара, продувної води, насиченого пара і пара через вторинний пароперегрівач, а також живильної води, що подається в котел повз регенеративних підігрівачів з  $i_{\text{обв}}$ , кг/с;

$i_{\text{п.п}}$ ,  $i_{\text{пв}}$ ,  $i_{\text{кип}}$ ,  $i_{\text{н.п}}$  – відповідно ентальпія перегрітого пара, живильної води, продувної води і насиченого пара, кДж/кг;

$i'_{\text{вт.п}}$ ,  $i''_{\text{вт.п}}$  – ентальпія пара на вході у вторинний пароперегрівач і виході з нього відповідно, кДж/кг;

$D_{\text{впр}}^{\text{пп}}$  – витрати вприскування у вторинні пароперегрівачі, включаючи вприскування живильної води, з ентальпією  $i_{\text{впр}}^{\text{пп}}$ , кг/с;

$Q_{\text{от}}$  – тепло сприйняття води або повітря, що підігріваються в котельному агрегаті та віддаються на сторону, кВт.

У формулі (3) третій член враховується тільки при вприскуванні в первинний тракт "сторонньої" води з ентальпією  $i_{\text{впр}}$ , відмінної від  $i_{\text{пв}}$ .

Докладний порівняльний аналіз вітчизняної і закордонної методичної бази, яка використовується для розрахунків складових теплового балансу теплогенеруючих установок, був виконаний в [2]. Він показав, що ККД брутто, розрахований по [2], буде вище в порівнянні з [1, 3] (рис. 1, 2), тому що в методиці [1] не враховуються: втрати з  $q_3$  і втрати теплоти з охолоджуваними балками і панелями, не включеними в циркуляційну схему котла. ККД нетто буде також завищений, тому що в [1] не враховується ККД вироблення електроенергії на станції. При цьому розбіжність в отриманих результатах буде тем вище, чим більше величина втрат з  $q_3$ , яка може мати значну величину, особливо для установок невеликої потужності [1]. Результати обробки дослідів при проведенні балансових випробувань котла КЕ-10-14 ст. № 2 ЛДК-3 при спалюванні деревесних відходів (рис. 1, 2), виконані по [3] і [1], показали наявність розбіжностей (від 0,2 до 1,5 %) і в значеннях втрат  $q_2$ ,  $q_4$  і  $q_5$ .

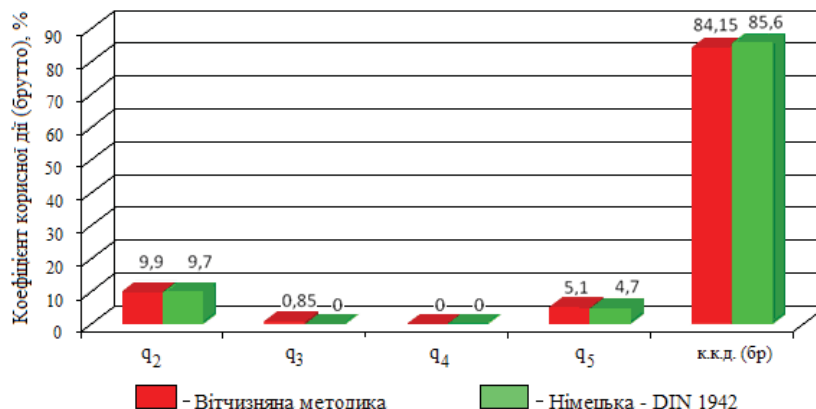


Рис. 1. Порівняльний аналіз методик [3] і [5] (біопаливо)

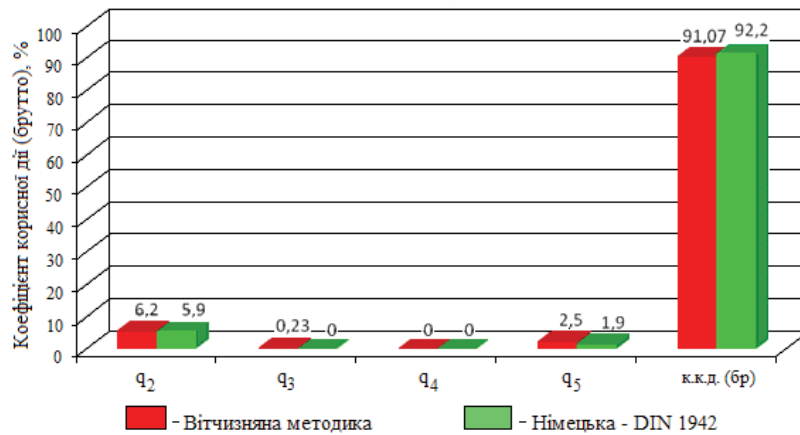


Рис. 2. Порівняльний аналіз методик [3] і [5] (природний газ)

Таким чином, при визначенні ККД котлоагрегатів методика [1] дає завищені значення. Крім того, для обробки результатів випробувань котла, що працює на суміші палив (деревинні відходи і мазут) методику [3] застосувати не вдалося, тому що в ній не розглядаються варіанти спільного спалювання різних видів палива. Британський стандарт [2], на відміну від [5], дозволяє врахувати  $q_3$ , однак загальна методика визначення теплових втрат також значно відрізняється від [1] і отримані значення ККД котлоагрегату мають завищену величину [2].

Виходячи з вищевикладеного, у УЕК для визначення складових теплового балансу котлоагрегату був закладений спеціально розроблений модуль, у якому весь масив інформації обробляється по вітчизняних методиках. Модуль дозволяє обробляти результати випробувань котлів різного типу, що працюють як на одному виді палива (твердому, рідкому, газоподібному), так і на їх суміші. Крім цього, він розраховує теплообмін у топковій камері, використовуючи дані блоків: "Конструктивні характеристики топки", "Теплотехнічний і гранулометричний аналіз палива", "Розрахунок обсягів і ентальпій робочого середовища, повітря, продуктів згорання" і проводить порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Підведена теплота при визначенні ККД нетто визначалася по формулі [3], кВт:

$$Q_{nidv} = (Q_p + Q_{v.vh} + Q_\phi) \cdot (B + \sum N_c \cdot b), \quad (4)$$

де  $B$  – повна витрата палива, кг/с;

$Q_{v.vh}$ ,  $Q_\phi$  – теплота, внесена з повітрям, підігрітим поза агрегатом і теплота, внесена з "форсуночним" паром, кДж/кг;

$\sum N_c$  – споживана потужність встановленого електрообладнання, кВт;  $b$  – питомі витрати палива на вироблення енергії, кг/кДж;

$Q_p$  – розташовувана теплота палива розраховувалася по залежності (10.6) [3], кДж/кг:

$$Q_p = Q_i^r + i_{мл} + (1 - k) \cdot Q_{крб}, \quad (5)$$

де  $i_{мл}$  – фізична теплота палива, кДж/кг;

$Q_{крб}$  – теплота, що поглинається при протіканні ендотермічних реакцій розкладання карбонатів при спалюванні сланців, кДж/кг;

$k$  – коефіцієнт розкладання карбонатів [3].

Для котлоагрегатів із замкнутими системами пилоприготування втрати теплоти з відходящими газами визначалися по рівнянню [2], %:

$$q_2 = \frac{[I_{в.г} - (\alpha_{в.г} - \beta') \cdot I_{х.п.}^0 - \beta' \cdot I_{х.п.}^0] \cdot (100 - q_4)}{Q_p}, \quad (6)$$

де  $I_{в.г}$  – ентальпія відходящих газів, кДж/кг;

$I_{х.п.}^0$ ,  $I_{прс}^0$  – ентальпія теоретично необхідної кількості холодного повітря і повітря, присмоктуемого в газоходи котла, кДж/кг;

$\alpha_{в.г}$  – коефіцієнт надлишку повітря в відходящих газах;

$\beta'$  – відношення кількості повітря на вході в котлоагрегат (в повітряпідігрівач) до теоретично необхідного.

Поряд з тенденцією постійного зниження якості палива має місце значне коливання його характеристик навіть протягом доби. Враховуючи дані обставини, а також високий ступінь фізичного зношування енергоустановки, фактичні втрати теплоти з  $q_3$  і  $q_4$  можуть суттєво відрізнитися від нормативних значень, тому їх визначення повинне базуватися на результатах експлуатаційних випробувань [2]. При цьому розрахунок втрати теплоти з хімічним недопалюванням у УЕК проводиться по формулі, %:

$$q_3 = K_B (\alpha - \rho) \cdot (126,4CO + 108H_2 + 358CH_4) \cdot (1 + 0,025 W_{пр}^r) \cdot (100 - q_4) 10^{-3}, \quad (7)$$

де  $K_B$  – теоретично необхідна питома витрата повітря на 1 МДж теплоти, що виділяється при повному згоранні 1 кг сухого палива, для енергетичних палив може бути прийнята рівною 0,263 м<sup>3</sup>/МДж;

$\rho$  – поправочний коефіцієнт, що представляє собою відношення різниці теоретичних обсягів продуктів згорання і повітря до теоретично необхідного обсягу повітря. З достатньою точністю даний коефіцієнт може бути прийнятий для твердого палива рівним 0,02, мазуту – 0,05 і природного газу – 0,1;

$W_{пр}^r$  – наведена вологість палива, кг.% /МДж;

CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> – об'ємні вмісти продуктів неповного згорання палив у відсотках по відношенню до сухих газів, які визначаються за допомогою хроматографів [481].

На практиці, коли режим роботи котла ведеться при надлишках повітря ( $\alpha$ ), що забезпечують мінімальне значення  $q_3$ , цілком досить у формулу (7) підставляти лише значення CO, у цьому випадку можна обійтися газоаналізаторами простіших модифікацій [2]. За результатами газового аналізу  $\alpha$  з достатньою для практичних цілей точністю визначають по рівнянню:

$$\alpha \approx 21 / (21 - O_2). \quad (8)$$

При цьому погрішність розрахунків не перевищує 1 %, якщо  $\alpha < 2,0$  для твердих палив,  $\alpha < 1,25$  для мазуту і  $\alpha < 1,1$  для природного газу. У УЕК для точнішого визначення  $\alpha$  використовується формула, яка дозволяє врахувати наявність продуктів хімічного недопалювання:

$$a_{\text{точн}} = \frac{21}{21 - (O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)} \cdot K_a, \quad (9)$$

де  $K_a$  – поправочний коефіцієнт.

Втрати теплоти з механічним недопалюванням обчислювалися за відомими формулами, %:

$$q_4 = \frac{32780A^r}{Q_p} \left( \frac{\Gamma_{\text{шл+пр}}}{1-\Gamma_{\text{шл+пр}}} a_{\text{шл+пр}} + \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{1-\Gamma_{\text{ун}}} a_{\text{ун}} \right), \quad (10)$$

де  $\alpha_{\text{шл+пр}}$ ,  $\alpha_{\text{ун}}$  – відповідно частки золи в провалі і віднесенні;

$\Gamma_{\text{шл+пр}}$ ,  $\Gamma_{\text{ун}}$  – відповідно зміст горючих у провалі і віднесенні;

32780 – теплота згорання горючих речовин, що втримуються в шлаках, провалі і віднесенні, кДж/кг.

При задовільному стані обмуровування елементів теплогенеруючої установки втрати теплоти в навколишнє середовище ( $q_5$ ) для номінального навантаження визначаються по узагальнюючих графіках [3]. При навантаженні, що відрізняється від номінального, значення даної втрати розраховується по формулах робіт [2], %:

$$q_5 = q_5^H \frac{D_{\text{ном}}}{D_{\text{факт}}}, \quad (11)$$

де  $q_5^H$  – втрати теплоти від зовнішнього охолодження при номінальному навантаженні ( $D_{\text{ном}}$ );

$D_{\text{факт}}$  – фактична продуктивність котла ( $D_{\text{факт}}=D_{\text{прив}}$ ).

Досвід проведення енергетичних обстежень і випробувань різної категорії складності показав [2], що стан обмуровування і ізоляції елементів котлоагрегатів часто не відповідає діючим вимогам [1]. Це приводить до росту  $q_5$ , яка у цьому випадку розраховується по формулі [2], %:

$$q_5 = \frac{Q_F F + Q_{\text{ТР}}}{B(Q_p + Q_{\text{в.вн}} + Q_{\text{ф}})} 100\%, \quad (12)$$

де  $Q_F$  – втрати теплоти з 1 м<sup>2</sup> поверхні топки і газоходів котла, Вт/м<sup>2</sup>;

F – площа поверхні охолодження по загальному габариту котлоагрегату, м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{ТР}}$  – втрати теплоти трубопроводами, арматурами, барабаном і т.д., Вт.

При проведенні приймальних випробувань і експериментальному визначенні  $q_5$  її записують у вигляді суми [2], %:

$$q_5 = q_5^T + q_5^{\text{кп}} + q_5^{\text{пп}} + q_5^{\text{ве}} + q_5^{\text{вп}} + q_5^{\text{тп}}, \quad (13)$$

де  $q_5^T$  – втрати теплоти зовнішньою поверхнею топки, звичайно становлять (0,4...0,5);

$q_5$ ;  $q_5^{\text{кп}}$ ,  $q_5^{\text{пп}}$ ,  $q_5^{\text{ве}}$ ,  $q_5^{\text{вп}}$ ,  $q_5^{\text{тп}}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище відповідно в зоні конвективного пучка (фестона і т.п.), ПП, ВЕ, ВП і поверхнею трубопроводів, арматури, барабана і т.д.

Втрати з фізичною теплою шлаку, який виводиться, розраховувалися по рівнянню, %:

$$q_6^{\text{шл}} = \frac{A^r \cdot a_{\text{шл}} \cdot c_{\text{шл}} \cdot t_{\text{шл}}}{Q_p}, \quad (14)$$

де  $c_{\text{шл}}$  – теплоємність шлаку, кДж/(кг·К);

$t_{\text{шл}}$  – температура шлаку, °С.

Втрати теплоти з охолоджуваними балками і панелями не включеними в циркуляційний контур котла визначалися по формулі, %:

$$q_6^{\text{охл}} = \frac{\sum_{i=1}^n [G_i^{\text{охл}} \cdot (c_i'' \cdot t_i'' - c_i' \cdot t_i')] }{Q_p} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де  $G_i^{охл}$  – витрата води або повітря на охолодження і-го елемента, кг/с;

$c_i', c_i''$  – відповідно теплоємність охолоджуючого середовища на вході і виході з елемента, кДж/(кг·К);

$t_i', t_i''$  – відповідно температура охолоджуючого середовища на вході і виході з елемента, °С.

Обробка даних теплотехнічного аналізу палива проводиться за допомогою модуля "ТАТ" [2] у відповідність із діючими ДСТУ [1].

Для опису фракційного складу пилоподібного матеріалу функціональною залежністю звичайно використовують формулу Розина- Рамлера, %:

$$R=100\exp(-bx^n), \tag{16}$$

де  $R$  – повний залишок на ситі з розмір комірки  $x$ .

Для визначення значень постійних коефіцієнтів, характеризуючих тонкість здрібнювання ( $b$ ) і рівномірність зернового складу ( $n$ ) матеріалу, проводять його просівання через сита, за результатами якого визначають  $b$  і  $n$ . Однак при використанні в ході обробки даних по  $R$  для різних пар сит, знайдені значення  $b$  і  $n$  будуть відрізнятися один від одного. Для підвищення об'єктивності отриманих результатів перетворимо рівняння (16) і виконаємо подвійне логарифмування, тоді одержимо:

$$\bar{y} = n \ln x + B,$$

де  $\bar{y} = \ln \ln 100/R$ ,  $B = \ln b$ .

Використовуючи МНК, запишемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^N}{\partial n} = \sum_{i=1}^N 2(n \ln x_i + B - \bar{y}_i) \ln x_i = 0, \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^N}{\partial B} = \sum_{i=1}^N 2(n \ln x_i + B - \bar{y}_i) = 0. \end{cases} \tag{17}$$

Після виконання перетворень рівнянь даної системи і її розв'язку були отримані залежності для розрахунку коефіцієнтів  $n$  і  $b$ , що характеризують гранулометричний склад матеріалу [2]:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N \bar{y}_i \ln x_i - \sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot \sum_{i=1}^N \ln x_i}{N \sum_{i=1}^N \ln^2 x_i - \left( \sum_{i=1}^N \ln x_i \right)^2}; \quad b = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i - n \sum_{i=1}^N \ln x_i}{N} \right), \tag{18}$$

де  $N$  – кількість сит (не менше трьох).

Отримані аналітичні залежності дозволили розробити програму машинної обробки результатів дослідження фракційного складу матеріалу, реалізовану на ПК, що ввійшла у вигляді окремого блоку "Гранулометричний аналіз палива" до складу УЕК.

Розроблений метод обробки і аналізу результатів дослідження гранулометричного складу здрібнених матеріалів дозволяє оптимізувати і автоматизувати визначення коефіцієнтів, що характеризують фракційний склад матеріалу, і забезпечує побудову гістограми, інтегральної і диференціальної зернових характеристик [3] та пройшов перевірку для широкої гами твердих палив і їх осередкових залишків. Отримані результати використовуються при розрахунках, налагодженні і контролі роботи пилопідготовчого устаткування, розрахунках вигорання палива і оцінці ефективності роботи золоуловлюючих обладнань.

### Висновки

Модуль дозволив підвищити точність визначення складових теплового балансу теплогенеруючих установок металургійних підприємств, що працюють як на одному виді палива, так і на їх суміші, а також забезпечив розрахунок теплообміну і горіння, аналіз роботи газових і повітряних трактів обладнання. Розроблений метод обробки та аналізу результатів дослідження гранулометричного складу подрібнених матеріалів, дозволив оптимізувати і автоматизувати визначення коефіцієнтів, які характеризують їх фракційний склад, пройшов перевірку для широкої гами твердих палив та їх осередкових залишків і використовується при розрахунках, налагодження та контролі роботи топлівоприготівельного обладнання, розрахунках вигорання палива і оцінці ефективності роботи золоуловлювальної пристроїв.

### Список літератури

1. Ткаченко, С. І. Звіт по науково дослідній роботі “Зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище в підсистемах енергозабезпечення систем біоконверсії” / С. І. Ткаченко, Д. В. Степанов, Ю. В. Куріс ; ВНТУ. – В., 2005.
2. Ткаченко, С. І. Звіт по науково дослідній роботі “Зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище в підсистемах енергозабезпечення систем біоконверсії” / С. І. Ткаченко, Д. В. Степанов, Ю. В. Куріс ; ВНТУ. – В., 2006.
3. Куріс Ю. В. Універсальний електронний комплекс для оброблення результатів випробувань енергетичного обладнання та розрахунку шкідливих викидів / Ю. В. Куріс, // Фаховий журнал “Новини Енергетики”. м. Київ, – № 5. – 2010. – С. 18–28.
4. Куріс Ю. В. Теплотехнічний універсальний електронний комплекс для розрахунку шкідливих викидів / Ю. В. Куріс, І. Ф, Червоний // Фаховий журнал «Теорія и практика металургії». м. Дніпропетровськ, – № 5–6. – 2010. – С. 130–136.
5. Куріс Ю. В. Дослідження вихрових газопальникових пристроїв при спалюванні природного газу та біогазу / Ю. В. Куріс, І. Ф, Червоний, Е. В. Семененко // Вісті Академії інженерних наук України. м. Київ, – № 1. – 2010. – С. 2–13.

## DETERMINATION OF CONSTITUENTS OF THERMAL BALANCE OF METALLURGICAL EQUIPMENT

Ju.V. KURIS, Cand. Tech. Scie., associate professor

*The module, which allowed to promote exactness of determination of constituents of thermal balance of the teplogeneruyuchikh settings of metallurgical enterprises, which work both on one type of fuel and on their mixture, is described in the article, and also provided the calculation of heat exchange and burning, analysis of work of gas and air highways of equipment.*

*Поступила в редакцію 14.04 2011 г.*