

УДК 620.92

В. Л. КОВАЛЕНКО – доцент, к.т.н., Запорізький Національний Університет, Україна, victor.l.kovalenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

К. М. СЕРДЮК – Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, serducheckt@gmail.com

А. В. КУЗНЕЦОВА – Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара, wit_jane2000@i.ua

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В ПРОМИСЛОВИХ ПІЧНИХ УСТАНОВКАХ

Вступ

Біогазові технології – перспективний напрямок відновлюваної енергетики, який, як з'ясувалося у дослідженні [1], пропонує перспективні можливості енергозабезпечення багатьох українських промислових підприємств. Виробничі процеси із використанням технологій прямого використання палива відзначаються, як дуже привабливі до впровадження відносно низького за собівартістю біогазу [2-3]. Останній виявляється головною альтернативою затратному природному газу, що навіть за сучасних умов продовжує використовуватись в обладнанні, яке легше всього пристосувати до спалювання біогазових сумішей.

Технологічні та екологічні вимоги багатьох агрегатів із топковим принципом використання енергії, зокрема термічних та нагрівальних печей, відносно низькі до вмісту типових баластних та шкідливих домішок у складі біогазу, таких як двооксид вуглецю (CO_2), азот (N_2) та сірководень (H_2S). В такому обладнанні можливо використовувати паливо в широкому діапазоні якості та калорійності, яке може виявитись більш економічним за базовий варіант, а відповідно підібрані характеристики системи обробки біогазу, що поступає з мережі, дозволяють визначити до технологічного процесу паливні властивості кінцевого енергоресурсу [1].

Таким чином, створення методик, технічних та алгоритмічних засобів, що дозволяють розробляти ефективні системи спа-

лювання біогазових сумішей та оптимізувати їх параметри за економічним критерієм, з урахуванням існуючих тарифів на енергоресурси, цін на комплектуючі й енергетичне устаткування, є в даний час актуальним.

Мета роботи

Дослідити можливість впровадження біогазових технологій в умовах промислових підприємств, розробити відповідний математичний апарат для розрахунку оптимальних умов переведення термічних та нагрівальних печей на біогаз із врахуванням головних критеріїв та вимог щодо кінцевої якості палива.

Методи досліджень

Для розв'язання поставлених задач використовувались оптимізаційні методи для визначення параметрів систем очищення та збагачення біогазових сумішей, аналіз, порівняння, метод приведених витрат.

Основні результати досліджень

Для підбору відповідної якості біогазу та аналізу при цьому ефективності використання біогазових технологій запропоновано схему багатоступінчастої обробки біогазової суміші за паралельним принципом [1], яка, як встановлено авторами, може виявитись найбільш привабливою до застосування на металургійних підприємствах.

Комплексний техніко-економічний аналіз проекту використання біогазу на підприємстві доцільно проводиться із використанням математичної моделі при повній заміні природного газу біогазом. Для спрощення розрахунків, при цьому достатньому рівні їх адекватності, можна задатись наступними принципами:

- нормальні умови паливовикористання (273,15 К, 101,325 кПа);
- біогаз, що поступає з мережі на підприємство, типового складу та безперервно постачається у визначених розрахунком кількостях, а кінцевий енергоресурс постійно споживається, що виключає розрахунок системи накопичення газу;
- паливо абсолютно сухе, горіння є повним, а ККД обладнання незмінним;
- постійність механічних та аеродинамічних характеристик транспортуючого та споживаючого паливо обладнання;
- незмінні питомі витрати ресурсів на обробку біогазу;
- всі дані та результати розрахунків є усереднені.

Головна умова забезпечення незмінності продуктивності промислової печі визначається основним рівнянням теплового балансу [1], яке у повному вигляді записується:

$$M_n^u = (Q \cdot \omega^u \cdot \eta - \Delta Q_{nom}) / \Delta j, \quad (1)$$

де M_n^u – продуктивність печі, кг/цикл; Q – нижча теплота згоряння палива, що використовується в печі, МДж/м³; ω^u – середня витрата палива, м³/цикл; η – коефіцієнт використання тепла (палива); ΔQ_{nom} – сумарні теплові витрати печі, МДж/цикл; Δj – тепловий дефіцит ресурсу, що піддається термічній обробці, МДж/кг.

Аналіз рівняння показує, що в процесі роботи печей на газових сумішах різної калорійності, величини η , ΔQ_{nom} та Δj в дійсності змінюються незначно, особливо якщо застосовується обладнання рекуперації й рециркуляції теплової енергії та автоматичні системи управління термічними процесами.

Враховуючи, що саме в таких агрегатах найбільш доцільно використовувати біогаз як альтернативу природному газу, можна теоретично вважати, що для забезпечення постійності продуктивності печі при різноманітних змінах якості біогазової суміші достатньо виконувати умову:

$$P_n^u = Q_{n_2} \cdot \omega_{n_2}^u = Q_{b_2} \cdot \omega_{b_2}^u = const, \quad (2)$$

де P_n^u – теплова потужність печі, МДж/цикл; Q_{n_2} , Q_{b_2} – нижча теплота згоряння природного газу та біогазу відповідно, МДж/м³; $\omega_{n_2}^u$, $\omega_{b_2}^u$ – середня витрата природного газу та прогнозована витрата біогазу відповідно, м³/цикл.

Калорійність біогазу визначається складом палива, який може змінюватись в широкому діапазоні, в залежності від рівня впровадження системи обробки. Якщо позначити об'ємний вміст основних складових в паливі їх хімічною формулою, то процентний склад біогазової суміші, що поступає з мережі на підприємство можна виразити сумою і-тих компонентів $D_i^{мер}$:

$$A_{мер} = \sum D_i^{мер} = CH_4^{мер} + CO_2^{мер} + H_2S^{мер} + N_2^{мер} + H_2^{мер} + O_2^{мер} = 100\%. \quad (3)$$

Згідно із обраною схемою та методикою обробки біогазу [1], його обсяг, що буде доставлено на підприємство $V_{мер}$ можна розділити на три потоки:

- 1) що піддається максимально-можливому збагаченню $V_{зб}$, м³;
- 2) паралельно з цим потік, що піддається максимальному очищенню, виходячи з можливостей обраних технологій $V_{оч}$, м³;
- 3) решта витрати біогазу, що не оброблюється взагалі $V_{реш}$.

Співвідношення цих величин буде залежати від встановлених параметрів схеми:

$$V_{зб} = x_1 \cdot V_{мер}, \quad (4)$$

$$V_{оч} = (1 - x_1) \cdot x_2 \cdot V_{мер}, \quad (5)$$

$$V_{реш} = (1 - x_1) \cdot (1 - x_2) \cdot V_{мер}, \quad (6)$$

де x_1 та x_2 – частки біогазу, що поступають в окремі блоки збагачення та очищення відповідно, відн. од.

Склад вихідного енергоресурсу з кожного блоку відповідно ($A_{зб}$ та $A_{оч}$) змінюється в залежності від коефіцієнтів якості видалення та втрат конкретних компонентів біогазової суміші ($k_i^{зб} = 0 \dots 1, k_i^{оч} = 0 \dots 1$) та визначається за наступними співвідношеннями:

$$D_i^{зб} = (1 - k_i^{зб}) \cdot D_i^{мер} / \sum (1 - k_i^{зб}) \cdot D_i^{мер} \quad (7)$$

$$D_i^{оч} = (1 - k_i^{оч}) \cdot D_i^{мер} / \sum (1 - k_i^{оч}) \cdot D_i^{мер} \quad (8)$$

$$A_{зб} = \sum D_i^{зб} = CH_4^{зб} + CO_2^{зб} + H_2S^{зб} + N_2^{зб} + H_2^{зб} + O_2^{зб} = 100\% \quad (9)$$

$$A_{оч} = \sum D_i^{оч} = CH_4^{оч} + CO_2^{оч} + H_2S^{оч} + N_2^{оч} + H_2^{оч} + O_2^{оч} = 100\% \quad (10)$$

Відповідно до цього можна розрахувати остаточний склад обробленого біогазу після змішання різних за якістю та кількістю отриманих газових сумішей, в залежності від конкретних параметрів систем збагачення та очищення:

$$D_i^{об} = x_1 \cdot \left(1 - \sum (k_i^{зб} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер})\right) \cdot D_i^{зб} + (1 - x_1) \cdot x_2 \cdot \left(1 - \sum (k_i^{оч} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер})\right) \cdot D_i^{оч} + (1 - x_1) \cdot (1 - x_2) \cdot D_i^{мер} / x_1 \cdot \left(1 - \sum (k_i^{зб} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер})\right) + (1 - x_1) \cdot x_2 \cdot \left(1 - \sum (k_i^{оч} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер})\right) + (1 - x_1) \cdot (1 - x_2); \quad (11)$$

$$A_{об} = \sum D_i^{об} = CH_4^{об} + CO_2^{об} + H_2S^{об} + N_2^{об} + H_2^{об} + O_2^{об} = 100\%. \quad (12)$$

Тепер, знаючи якість обробленого біогазу, що планується спалювати, не складно розрахувати його калорійність $Q_{бз} = f(A_{об})$, а за рівнянням (2) визначити його прогнозовану витрату на цикл роботи агрегату $\omega_{не}^y$ за умов незмінності його теплової потужності. Обсяг біогазу, що необхідно при цьому постачати на підприємство із мережі $\omega_{мер}^y$ розраховується за формулою:

$$\omega_{мер}^y = \omega_{бз}^y / \left(1 - x_1 \cdot \sum (k_i^{зб} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер})\right) - (1 - x_1) \cdot x_2 \cdot \sum (k_i^{оч} \cdot 0,01 \cdot D_i^{мер}). \quad (13)$$

Щоб визначити можливість такого варіанту використання біогазових технологій, необхідно виявити технологічні та екологічні вимоги щодо якості біогазу та відповідність ним паливних характеристик кінцевого енергоресурсу.

Якщо певний екологічний критерій умовно позначити Ω_i , а можливість використання біогазових технологій буде залежати від умови його знаходження в деякому допустимому діапазоні значень ($\Omega_i^{\min} \dots \Omega_i^{\max}$), то для здійснення сукупності всіх можливих екологічних вимог $\sum_{i=1}^k \Omega_i$, умови можливості використання біогазових технологій записуються:

$$\Omega_i^{\min} \leq \Omega_i \leq \Omega_i^{\max}, \\ \Omega_{i+1}^{\min} \leq \Omega_{i+1} \leq \Omega_{i+1}^{\max}, \\ \dots, \\ \Omega_n^{\min} \leq \Omega_n \leq \Omega_n^{\max},$$

або:

$$\sum_{i=1}^k (\Omega_i^{\min} \leq \Omega_i \leq \Omega_i^{\max}). \quad (14)$$

Таким же чином можна встановити можливість спалювання біогазової суміші в печі за кожним існуючим технологічним критерієм λ_i :

$$\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max}). \quad (15)$$

За існування можливості використання біогазових технологій на промисловому підприємстві оцінку економічної доцільності їх впровадження пропонується визначати за принципом мінімуму приведених річних затрат:

$$Z_{бз} = C_{зат}^{бз} + \sum K_i \cdot E_n \rightarrow \min \quad (16)$$

де $Z_{\delta z}$ – сумарні приведені річні затрати при використанні біогазових технологій для повного енергозабезпечення промислового обладнання, грн./рік; $C_{zaz}^{\delta z}$ – загальні річні поточні витрати, грн./рік; K_i – необхідні капіталовкладення; E_n – норматив ефективності повернення капіталовкладень, років.

Для оцінки $Z_{\delta z}$, вважається, що для базового варіанту роботи пічного агрегату на природному газі Z_{nz} , ця величина складається тільки з річних затрат на покупку палива B_{nz} , враховуючи, що при цьому капіталовкладення в систему відсутні:

$$Z_{nz} = C_{zaz}^{nz} = B_{nz} = \omega_{nz}^u \cdot N_{\eta} \cdot S_{nz}, \quad (17)$$

де N_{η} – сумарна кількість циклів роботи обладнання, од./рік; S_{nz} – вартість природного газу, грн./м³.

Використання біогазових технологій буде вигідним тільки за виконання умови: $Z_{\delta z} \leq Z_{nz}$.

Необхідні інвестиції на впровадження біогазових технологій найчастіше будуть складатись з капіталовкладень в обладнання для обробки біогазу, модернізацію печі та інших необхідних витрат, наприклад витрат на прокладення системи транспортування біогазу на підприємство.

Величина капіталовкладень в систему збагачення біогазу $K_{z\bar{o}}$ залежить від питомих витрат біогазу, що буде поступати до установки:

$$K_{z\bar{o}} = f(x_1, \omega_{mer}^u, in.).$$

Так само і капіталовкладення в установку з очищення біогазу K_{oc} будуть визначатись обсягом біогазу, що планується пропускати через цю установку:

$$K_{oc} = f(x_1, x_1, \omega_{mer}^u, in.).$$

Капіталовкладення при модернізації пічного обладнання K_{mod} для можливості ефективного спалювання біогазу визначеної

якості в більшості випадках виявляються в заміні чи доданні певної кількості нових паливників N_n . Рівень цих затрат буде залежати від складу A_{ob} та визначених витрат $\omega_{\delta z}^u$ обробленого енергоресурсу, а також технологічних особливостей спалювання палива $\sum_{i=1}^n \lambda_i$:

$$K_{mod} = f\left(A_{ob}, \omega_{\delta z}^u, \sum_{i=1}^n \lambda_i, N_n, in.\right). \quad (18)$$

Якщо врахувати всі інші можливі затрати K_{in} , сумарні необхідні капіталовкладення для можливості використання біогазових технологій на підприємстві визначаються [4, 5]:

$$\sum K_i = K_{z\bar{o}} + K_{oc} + K_{mod} + K_{in}. \quad (19)$$

Поточні річні витрати при забезпеченні тієї ж печі біогазом розраховуються:

$$C_{zaz}^{\delta z} = B_{\delta z} + B_{rec}^{ob} + B_{ekc}^{ob} + B_{ekc}^{mod} + \Delta B_{ekc}^{en} + \Delta B_{ekc}^{eko} + B_{ekc}^{in}. \quad (20)$$

$$B_{\delta z} = V_{mer} \cdot S_{mer}^{ep} = \omega_{nz}^u \cdot N_{\eta} \cdot S_{\delta z}^{mer}, \quad (21)$$

$$B_{rec}^{ob} = B_{rec}^{oc} + B_{rec}^{z\bar{o}} = x_1 \cdot V_{mer} \cdot \sum (L_i^{z\bar{o}} \cdot S_i^{z\bar{o}}) + (1 - x_1) \cdot x_2 \cdot V_{mer} \cdot \sum (L_i^{oc} \cdot S_i^{oc}); \quad (22)$$

$$B_{ekc}^{ob} = B_{am}^{oc} + B_{am}^{z\bar{o}} + B_{in}^{z\bar{o}} + B_{in}^{oc} = K_{z\bar{o}}/T_{ekc}^{z\bar{o}} + K_{oc}/T_{ekc}^{oc} + f(K_{z\bar{o}}, T_{ekc}^{z\bar{o}}, in.) + f(K_{oc}, T_{ekc}^{oc}, in.) \quad (23)$$

$$B_{ekc}^{mod} = B_{am}^{mod} + B_{in}^{mod} = K_{mod}/T_{ekc}^{mod} + f(K_{mod}, T_{ekc}^{mod}, in.) \quad (24)$$

$$\Delta B_{ekc}^{en} = B_{ekc}^{en(\delta z)} - B_{ekc}^{en(nz)} = f\left(\omega_{nz}^u, \omega_{\delta z}^u, A_{ob}, N_{\eta}, \sum_{i=1}^n \lambda_i, in.\right) \quad (25)$$

$$\Delta B_{ekc}^{eko} = B_{ekc}^{eko(\delta z)} - B_{ekc}^{eko(nz)} = f\left(\omega_{nz}^u, \omega_{\delta z}^u, A_{ob}, N_{\eta}, \sum_{i=1}^n \Omega_i, in.\right) \quad (26)$$

де $B_{\delta z}$ – річні витрати на паливо, грн/рік; B_{rec}^{ob} – річні витрати на ресурси для обробки біогазу до визначеної якості; B_{ekc}^{ob} – річні витрати, що виникнуть при експлуатації

системи обробки, грн./рік; $B_{екс}^{mod}$ – річні витрати, що виникнуть при експлуатації модернізованого обладнання, грн./рік; $\Delta B_{екс}^{6n}$ – різниця витрат підприємства на власні потреби печі при спалюванні біогазу $B_{екс}^{6n(\delta_2)}$, порівняно із базовим варіантом $B_{екс}^{6n(n_2)}$, грн./рік; $\Delta B_{екс}^{eko}$ – різниця витрат підприємства на ліквідацію негативної дії на атмосферу викидів забруднюючих речовин при згорянні біогазу $B_{екс}^{eko(\delta_2)}$, порівняно із базовим варіантом $B_{екс}^{eko(n_2)}$, грн./рік; $B_{екс}^{in}$ – інші можливі експлуатаційні витрати, пов'язані із використанням палива, гіршого за якістю ніж природний газ, грн./рік; L_i^{3b} , L_i^{oc} – питомі затрати кожного i -го ресурсу відповідно для збагачення та очищення 1 м^3 біогазу, од./ м^3 ; S_i^{3b} , S_i^{oc} – вартість кожного i -го ресурсу відповідно для збагачення та очищення 1 м^3 біогазу, грн./од.; $V_{ам}^{oc}$, $V_{ам}^{3b}$ – амортизація коштів на систему очистки та збагачення біогазу відповідно, грн./рік; $B_{ін}^{3b}$, $B_{ін}^{oc}$, $B_{ін}^{mod}$ – інші операційні затрати при експлуатації кожного виду обладнання відповідно (затрати на ремонт та обслуговування, а також витрати у фонд заробітної плати обслуговуючого персоналу; ін.), грн./рік; $T_{екс}^{3b}$, $T_{екс}^{oc}$, $T_{екс}^{mod}$ – строки експлуатації кожного виду обладнання відповідно, грн./рік.

Економічний ефект від заміни палива при цьому:

$$E = B_{n_2} - B_{\delta_2} - B_{рес}^{ob} - B_{ін}^{3b} - B_{ін}^{oc} - B_{ін}^{mod} - \Delta B_{екс}^{6n} - \Delta B_{екс}^{eko}. \quad (27)$$

Якщо враховувати, що через змінність та залежність Z_{n_2} від зазначених факторів, оцінка яких визначається параметрами системи обробки біогазу x_1 та x_2 , визначення можливості та оптимального варіанту використання біогазових технологій раціонально виконувати із застосуванням спеціальних інженерних програмних заходів.

Для вирішення цієї задачі розроблено алгоритм визначення можливості ефектив-

ного застосування біогазових технологій для підвищення енергоефективності термічних та нагрівальних печей в умовах конкретного промислового підприємства, що представлено на рис 1.

Критерієм оптимальності є приведені річні затрати. Цільова функція та граничні умови розрахунку мають вигляд:

$$Z_{n_2} = f \left(x_1, x_2, P_n^y, N_{ц}, A_{мер}, S_{\delta_2}^{мер}, \omega_{\delta_2}^y, \sum_{i=1}^n L_i^{3b}, \sum_{i=1}^n L_i^{oc}, \sum_{i=1}^n S_i^{3b}, \sum_{i=1}^n S_i^{oc}, \sum_{i=1}^n k_i^{3b}, \sum_{i=1}^n k_i^{oc}, K_{3b} + K_{oc} + K_{mod} + K_{ін}, T_{екс}^{3b}, T_{екс}^{oc}, T_{екс}^{mod}, ін. \right) = \sum C_i^{\delta_2} + \sum (K_i \cdot E_n) \rightarrow \min \quad (28)$$

$$Z_{\delta_2} \leq Z_{n_2},$$

$$\sum_{i=1}^n (\Omega_i^{\min} \leq \Omega_i \leq \Omega_i^{\max}), \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max}). \quad (30)$$

Алгоритм заснований на циклічному розрахунку основних показників проекту використання біогазових технологій в умовах промислового підприємства для кожного співвідношення параметрів x_1 та x_2 , що ступінчасто задаються блоками «8» та «9» від 0 до 1 із визначеними кроками Δx_1 та Δx_2 . По завершенню роботи циклів визначаються оптимальні техніко-економічні показники проекту, при яких можливе забезпечення всіх умов ефективного енергозабезпечення промислової печі. Необхідні дані розрахунку виводяться на екран (блок «23»). Після цього на основі визначених алгоритмом умов ефективного застосування біогазових технологій можна приступати до розробки бізнес-плану, ТЕО та календарного графіку виконання проекту.

Висновки

Для визначення можливості ефективного використання біогазових технологій в промисловості в ході дослідження було розроблено спеціальний алгоритм, заснований

на принципі повної заміни природного газу при застосуванні методів промислової обробки та збагачення біогазової суміші за паралельним принципом.

Алгоритм враховує такі вихідні дані: хімічний склад необробленого сирого біогазу, його теплотворну здатність, параметри системи обробки та збагачення до необхідного в конкретному випадку рівня, вартість традиційного і біогазового палива, екологічні обмеження та враховує можливі штрафні санкції при визначенні техніко-економічних

показників та інші. На базі запропонованого математичного апарату можливо визначити доцільність використання біогазових технологій в умовах будь-якого промислового підприємства. Отже, в роботі розвинуто теоретичні та технологічні основи підвищення енергетичної ефективності та удосконалення процесу спалювання біогазових сумішей в умовах промислових підприємств, що дозволило застосовувати біогаз в якості первинного палива для певного кола найпоширеніших споживачів.

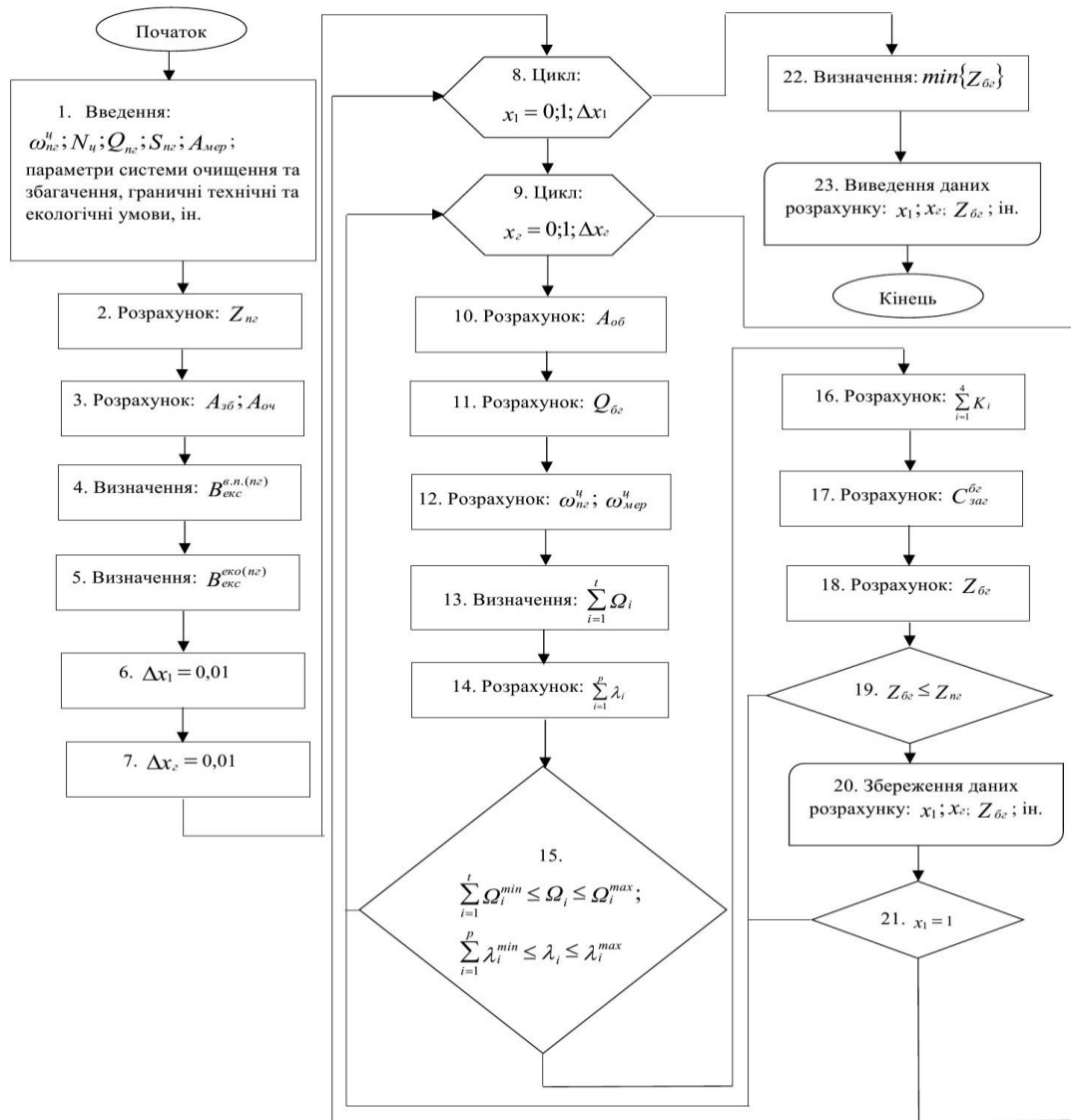


Рис. 1. Алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установках

Бібліографічний список

1. Коваленко, В.Л. Щодо доцільності та ефективності застосування біогазових технологій в умовах металургійних підприємств [Текст] / В. Л. Коваленко, Ю. Г. Качан, Д. О. Аносов // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії, – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. – Вип. 2 (34). – С. 106-110.
2. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография [Текст] / Донецк : Ноулдж (Донецкое отделение), 2012. – 247 с.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения: учебное пособие / СПбГТУРП – СПб., 2011. – 84 с.
4. Метод розрахунку приведених річних витрат [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://topknowledge.ru/investmen/1235-metod-rascheta-privedennykh-zatrat.html>
5. Гелетуха Г. Г. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. – К.: Біое-

нергетична асоціація України, 2014. – Аналітична записка. – № 11. – 42 с.

Ключові слова: енергоефективність, біогазові технології, біогаз, природний газ, очищення, збагачення, промислові печі.

Ключевые слова: энергоэффективность, биогазовые технологии, биогаз, газ, очистка, обогащение, промышленные печи.

Keywords: energy efficiency, biogas technologies, biogas, natural gas, purification, enrichment, industrial furnaces.

Рецензенти:
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.05.2019.

Прийнята до друку 27.05.2019.