

УДК 620.92

Ю.Г. Качан, зав. кафедри, професор, д.т.н.

В.Л. Коваленко, доцент, к.т.н.

А.А. Візер, асистент

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ, ЩО ПРАЦЮЄ НА БІОГАЗОВІЙ СУМІШІ, ЗА УМОВИ НАЯВНОСТІ В ЇЇ КАМЕРІ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

*Запорізька державна інженерна академія*

Представлены результаты исследований возможности использования биогазовых технологий в промышленности. Предложена методика определения и схема управления оптимальными энергетическими параметрами печной установки, работающей на биогазовой смеси, при наличии электрического поля в ее камере.

Ключевые слова: биогазовая смесь, нагревательная печь, тепловой поток, пространственное электрическое поле, интенсификация теплообмена, энергетическая эффективность

Подано результати досліджень з можливості використання біогазових технологій у промисловості. Запропоновано методику визначення та схему управління оптимальними енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері.

Ключові слова: нагрівальна піч, біогазова суміш, тепловий потік, просторове електричне поле, інтенсифікація теплообміну, енергетична ефективність

The analysis of scientific researches showed possibilities usage of biogas technologies in the industry. Proposed the method of determination and a apparatus of control by optimal power parameters furnace apparatus, working on biogas composition, in the presence of an electric field in its chamber.

Keywords: biogas composition, heating furnace, heat flow, the spatial electric field, intensification of heat exchange, energy efficiency

*Вступ.* Оскільки, вартість природного газу, як одного з головних видів палива в Україні, зростає стрімко, питання використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії, особливо у промисловості, за часом набуває все більшої актуальності. Вирішенням цієї проблеми може стати впровадження біогазових технологій, у першу чергу, за умов металургійної галузі [1-3] для енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей. Енергоефективність роботи останніх є досить низькою, проте їх технологічні та екологічні вимоги до вмісту типових баластних та шкідливих домішок у складі біогазових сумішей, таких як двооксид вуглецю ( $CO_2$ ) та сірководень ( $H_2S$ ), є відносно низькими [4,5], тому за наявності необхідної наукової бази, розробки відповідних технічних заходів у цьому напрямку та обґрунтування доцільності переведення зазначених агрегатів на опалювання біогазовою сумішшю, тенденція може набути широкого розповсюдження.

Разом із цим проблема ефективності нагрівальних установок і застосування низькокалорійних сумішей як палива у зазначених галузях промисловості залишається не менш актуальною. Відомо, що паливні властивості біогазової суміші є порівняними із природним газом [6],

тому пічним агрегатам, що працюють на ньому, також притаманні подібні недоліки, а саме нерівномірний розподіл температурного поля, тобто наявність зон з різною щільністю теплової енергії та низька керованість теплового потоку в їх камері. Окрім того, інтенсифікації процесу теплообміну у певній області промислового нагрівального обладнання, зазвичай, не приділяється належної уваги. Частково питання вирішують змінюванням конструкції й аеродинамічних характеристик агрегату, що є недостатнім [7].

Встановлено [8,9], що вплив електричного поля на процес розподілу температури у нагрівальних камерах, де як енергоносії використовують природний газ, є незаперечним і проявляється вже за відносно низької його напруженості. Отже, у печах, що будуть використовувати біогазову суміш, слід спостерігати подібні явища через схожість їх головного компонентного складу, а запропонована у роботі [1] схема паралельної багатоступінчастої обробки зазначеного альтернативного енергетичного ресурсу відкриває можливість одержання палива з якістю, близькою до природного газу, шляхом управління витратою біогазової суміші на кожному етапі очищення та збагачення за мінімально-необхідної потужності відповідного обладнання. Проте, в існуючих дослідженнях питання оптимізації енергетичних параметрів у камері печі,

таких як витрата газу та напруженість електричного поля, за допомогою яких управляють процесом нагрівання у печі, не розглядалися і потребують додаткового аналізу та створення відповідної методики їх визначення та схеми управління. Отже, впровадження методу підвищення енергоефективності нагрівальних печей, які працюють на біогазовій суміші, на основі застосування електричного поля у якості управляючого впливу на теплові потоки разом із запропонованим схематичним вирішенням може дати значну економію витрат підприємств на біогазову суміш та знизити її долю у структурі собівартості продукції.

*Постановка завдання.* Завданням роботи є розробка методики визначення та схеми управління оптимальними енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері.

*Головна частина досліджень.* Для вирішення завдання підвищення енергоефективності нагрівальних газових печей необхідно володіти інформацією щодо розподілу температурного поля в їх камері та мати можливість визначати зони з різною щільністю теплової енергії. За допомогою роботи [7] можна встановити зазначені дані з урахуванням конструктивних параметрів об'єкта, а у роботі [10] одержано математичну модель залежності температури заготовки, яку розміщено в камері газової печі, від місця її розташування, напруги між електродами та горілочним пристроєм, кутом нахилу заготовки до по-вздожньої осі пічного агрегату та підтверджено її адекватність. Проте, у поданій математичній послідовності витрата газу є сталою величиною, що унеможливило використання її для оптимізаційних задач за економічним критерієм, тобто мінімізацією витрат газу та компенсації нагрівання за рахунок впливу електричної складової. Окрім того, у наявних дослідженнях біогазову суміш як паливо не розглядали взагалі.

Отже, для підвищення енергоефективності нагрівальної печі слід розробити універсальну

$$\begin{aligned}
 T = f(U, Q, x, y, z) = & b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot Q + b_3 \cdot x + b_4 \cdot y + b_5 \cdot z + b_6 \cdot U \cdot Q + b_7 \cdot (U \cdot x) + b_8 \cdot (U \cdot y) + \\
 & + b_9 \cdot (U \cdot z) + b_{10} \cdot (Q \cdot x) + b_{11} \cdot (Q \cdot y) + b_{12} \cdot (Q \cdot z) + b_{13} \cdot (x \cdot y) + b_{14} \cdot (x \cdot z) + b_{15} \cdot (y \cdot z) + b_{16} \cdot (U \cdot Q \cdot x) + \\
 & + b_{17} \cdot (U \cdot Q \cdot y) + b_{18} \cdot (U \cdot Q \cdot z) + b_{19} \cdot (U \cdot x \cdot y) + b_{20} \cdot (U \cdot x \cdot z) + b_{21} \cdot (U \cdot y \cdot z) + b_{22} \cdot (Q \cdot x \cdot y) + \\
 & + b_{23} \cdot (Q \cdot x \cdot z) + b_{24} \cdot (Q \cdot y \cdot z) + b_{25} \cdot (x \cdot y \cdot z) + b_{26} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y) + b_{27} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot z) + b_{28} \cdot (U \cdot Q \cdot y \cdot z) + \\
 & + b_{29} \cdot (U \cdot x \cdot x \cdot z) + b_{30} \cdot (Q \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{31} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y \cdot z), \quad (1)
 \end{aligned}$$

де  $T$  – температура в заданій області печі, °C;  $b_i$  – коефіцієнти моделі,  $i = \overline{1,31}$ .

методику визначення оптимальних енергетичних параметрів у її камері за наявності просторового електричного поля та створити відповідну систему управління. Останні повинні бути актуальними для будь-якої газової суміші та для біогазової суміші зокрема.

Для створення зазначеної методики на першому етапі необхідно виконати експериментальні дослідження на конкретному об'єкті промислового підприємства щодо встановлення взаємозв'язку між параметрами пічної установки, такими як витрата газу, напруженість електричного поля в її камері та габаритні характеристики. Для досягнення максимальної точності прогнозування за мінімальної кількості виконаних операцій, а також збереження статистичної достовірності результатів експерименту необхідно здійснити його планування за загальновідомими методиками [11].

Для розробки матриці експерименту типу  $2^5$  було обрано кілька параметрів, які можуть впливати на розподіл температури всередині установки, а саме: витрату біогазової суміші ( $Q$ ), м<sup>3</sup>/год.; габарити заготовки ( $x, y, z$ ), м; напругу між заготовкою та пальником ( $U$ ), В.

Матрицю діапазону значень досліджуваних параметрів, що враховують у математичній моделі та є її відповідними обмеженнями, наведено у табл. 1.

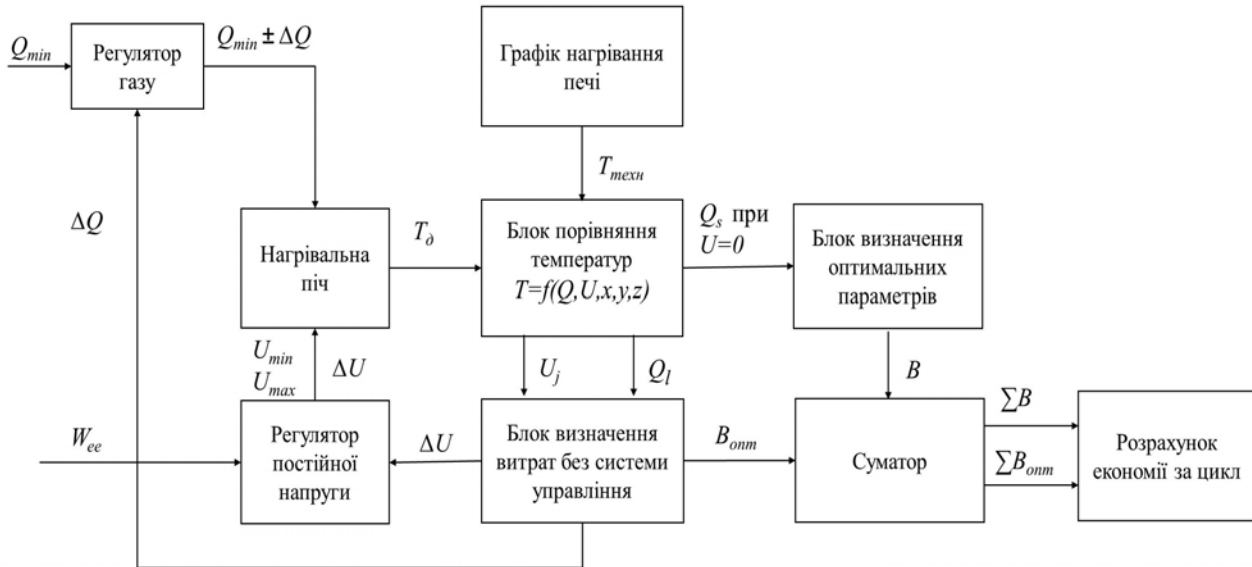
**Таблиця 1** - Діапазон значень параметрів, врахованих у математичній моделі

Параметр	Максимальне значення	Мінімальне значення
$Q$ , м <sup>3</sup> /год.	$Q_{\max}$	$Q_{\min}$
$U$ , В	$U_{\max}$	$U_{\min}$
$x$ , м	$x_{\max}$	$x_{\min}$
$y$ , м	$y_{\max}$	$y_{\min}$
$z$ , м	$z_{\max}$	$z_{\min}$

За результатами виконаного планування експерименту відповідно до складеної для цього матриці одержують потрібну математичну модель у вигляді:

На другому етапі здійснювали внесення необхідних вихідних даних у запропоновану систему управління оптимальними енергетичними параметрами пічної нагрівальної установки, що включає в себе такі основні блоки як графік нагрівання печі, що задають попередньо, блок по-

рівняння поточної температури та заданої технологією, блок визначення оптимальних значень витрати газу та величини напруги між горілочним пристроєм та заготовкою. Блок-схему зазначеної системи управління подано на рис. 1.



**Рисунок 1** – Блок-схема системи управління оптимальними енергетичними параметрами пічної нагрівальної установки

Тут:  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  – мінімальне та максимальне значення витрати газу, м<sup>3</sup>/год., відповідно;  $\Delta Q$  – крок подавання газу, м<sup>3</sup>/год.;  $Q_l$ ,  $Q_s$  – поточне значення витрати газу без та з системою управління, м<sup>3</sup>/год., відповідно;  $Q_l$ ,  $Q_s \in Q_{min} \dots Q_{max}$ , м<sup>3</sup>/год.;  $T_{\theta,i}$ ,  $T_{тех,i}$  – поточна температура нагрівання печі та температура технологічного її нагрівання у заданій точці, °С, відповідно;  $U_{min}$ ,  $U_{max}$  – мінімальне та максимальне значення напруги, В, відповідно;  $\Delta U$  – крок змінювання напруги, В;  $U_i$  – поточне значення напруги,  $U_j \in U_{min} \dots U_{max}$ , В;  $W_{ee}$  – кількість енергії, що споживано електричною частиною пічної установки [9] за цикл, кВт-год.;  $B$ ,  $B_{онт}$  – витрати на енергоресурси без системи управління та з системою управління за крок часу  $\Delta t$ , грн/крок, відповідно;  $\Sigma B$ ,  $\Sigma B_{онт}$  – сумарні витрати без системи управління та з нею, грн/цикл, відповідно;  $E$  – економія витрат на енергоресурси від впровадження системи управління, грн/цикл.

Функціонування запропонованої схеми управління відбувається наступним чином:

– визначають коефіцієнти моделі;

– задають технологічний графік нагрівання печі з певним кроком за часом  $\Delta t$ ;

– подають газову суміш з технічно мінімально можливою витратою  $Q_{min}$ ;

– у блоці порівняння поточну температуру за датчиком  $T_{\theta,i}$  порівнюють із значенням, заданим технологією на даному проміжку часу.

Якщо значення температури не відповідає потрібній величині, напругу автоматично збільшують на крок  $\Delta U$  до досягнення граничної величини  $U_{max}$  і, таким чином, знаходять усі можливі комбінації величини напруги та витрати газу для досягнення потрібної температури. Якщо після цього зростання є недостатнім, то система дає сигнал на підвищення кількості газу на крок подавання  $\Delta Q$ .

Отже, визначення оптимальних параметрів витрати газу  $Q$  та напруги  $U$  відбувається методом повного перебирання шляхом послідовного підставлення всіх можливих їх значень до отриманого полінома на кожному кроці змінювання температурного графіку з урахуванням відповідних обмежень. З масиву даних за економічним критерієм обирають найбільш економічно вигідну їх комбінацію, за якої витрати на енергоресурси будуть мінімальними.

Економію підприємства на енергетичні ресурси для роботи нагрівальної печі визначають різницею між сумарними витратами на кожному кроці  $\Delta t$  температурного графіку нагрівання за цикл без системи управління та з нею.

$$E = \sum B - \sum B_{opt} \quad (2)$$

Отже, запропонований математичний апарат дозволить визначати оптимальні значення вихідних енергетичних параметрів пічної установки та таким чином більш точно прогнозувати кількість будь-якої газової суміші, в тому числі і біогазової, яку можливо економити у межах економічної доцільності за умов будь-якого промислового підприємства.

*Висновки та перспективи подальших досліджень.* В Україні, за існуючих високих тарифів на природний газ, використання біогазової суміші, що є відносно низькою за собівартістю, як

альтернативу, є як ніколи актуальним, особливо для термічних та нагрівальних печей металургійної галузі промисловості. Для ефективного використання останніх запропоновано методику визначення та схему управління оптимальними енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері, виходячи з економічної доцільності та вимог до технології нагрівання. Наведені результати стануть основою для подальших досліджень щодо можливості застосування біогазової суміші за умов металургійних підприємств України та Запорізького регіону зокрема та етапом створення відповідного інструментарію підвищення енергоефективності установок, що працюють на зазначених низькокалорійних газах, та дозволять знизити кінцеву собівартість продукції, що випускають.

### Бібліографічний список

1. Качан, Ю. Г. Щодо доцільності та ефективності застосування біогазових технологій в умовах металургійних підприємств [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, Д. О. Аносов // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. – Вип. 2 (34). – С. 106-110. – Бібліогр.: с. 110.
2. Лучшие методы реализации биогазовых энергетических проектов ТБО [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/toolsres-lfg-ru.pdf>. – Загл. с экрана.
3. Сизоненко, О. А. Возможность и необходимость реализации стратегий экологического управления на промышленных предприятиях [Текст] / О. А. Сизоненко // Економіка : проблеми теорії та практики : збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 204, Т. 1. – С. 265-271. – Бібліогр.: с. 271.
4. Гавриш, В. І. Визначення економічно доцільного напрямку використання біогазу [Текст] / В. І. Гавриш // Економіка агропромислового виробництва. – 2014. – № 3. – С. 24-29. – Бібліогр.: с. 29.
5. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах [Текст]: Монография / А. Б. Бирюков, Ф. В. Недопекин, В. Н. Ткаченко. – Донецк : Ноулидж (Донецкое отделение), 2012. – 247 с. – Бібліогр.: с. 240-247. – 150 экз. – ISBN 978-617-579-372-5.
6. Биогазовые установки. Практическое пособие [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas\\_plants\\_Practics.pdf](http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf). – Загл. с экрана.
7. Качан, Ю. Г. Количественная оценка энергоэффективности камерных печей с выкатным подом [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, Ю. Б. Спекторова // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 66-68. – Бібліогр.: с. 68.
8. Качан, Ю. Г. Щодо можливості підвищення енергоефективності нагрівальних печей за рахунок формування теплових потоків просторовими електричними полями [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2013. – Вип. 1 (29). – С. 121-125. – Бібліогр.: с. 125.
9. Качан, Ю. Г. Моделирование температурного режима газовой нагривальной печи за наявності просторового електричного поля [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2013. – Вип. 2 (30). – С. 121-125. – Бібліогр.: с. 125.
10. Качан, Ю. Г. Моделирование температурного режима газовой нагривальной печи за наявності просторового електричного поля [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // Энергетика: экономика, технологии, экология. – Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – Вип. 2 (36). – С. 28-32. – Бібліогр.: с. 32.
11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с. – 200 экз. – ISBN 925-616-579-242.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2016 р.  
Рецензент, проф. О.В. Волков