

УДК 620.92

DOI:10.26661/2071-3789-2019-1-41-15

Коваленко Віктор Леонідович, доцент, кандидат технічних наук

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ З БІОГАЗОВИМ ОПАЛЕННЯМ ЗА НАЯВНОСТІ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЇЇ КАМЕРІ

Запорізька державна інженерна академія

Подано результати досліджень можливості використання біогазових технологій у промислових пічних установках. Запропоновано алгоритм визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері. Наведено розрахунок економічної ефективності запропонованого методу на прикладі обладнання прокатного цеху металургійного підприємства

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

Вступ. Останнім часом енергетичні ресурси, що споживають промислові підприємства, займають все більшу частку в структурі собівартості товарної продукції через стрімке їх дорожчання, та зокрема природного газу, як одного з головних видів палива. Тому використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії, особливо у промисловості, набуває все більшої актуальності. Впровадження біогазових технологій, в першу чергу, в металургійній галузі для енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей як найменш вимогливих з технологічної точки зору до агресивного хімічного складу біогазових сумішей [1-3], може стати шляхом підвищення конкурентоспроможності виробництва через більш низьку вартість біогазу як первинного палива для зазначеного обладнання.

Проблема ефективності нагрівальних установок і застосування низькокалорійних сумішей як палива залишається не менш актуальною [1]. Оскільки, паливні властивості біогазових сумішей є порівняними із природним газом [5-7], пічним агрегатам, що працюють на ньому, притаманні нерівномірний розподіл поля температури, наявність зон з різною щільністю теплової енергії та низька керованість теплового потоку в їх камері. В печах на біогазовій суміші слід враховувати подібні явища через схожість їх головного компонентного складу.

Використання електричного поля для управління процесом розподілу температури у нагрівальних камерах [8-9,10], де як енергоносії використовують природний газ, є незаперечним і проявляється вже за відносно низької напруженості. У моделі розподілу теплоти всередині пічної установки, що запропоновано у роботах [1-3], витрата газу є сталою величиною, що уне-

можливає використання її для оптимізаційних задач за економічним критерієм.

Для підвищення енергоефективності камерної нагрівальної печі у роботі [4] розроблено універсальну методику визначення оптимальних енергетичних параметрів у її камері за наявності просторового електричного поля та створено відповідну систему управління. Проте, для визначення кількісних показників роботи запропонованої системи необхідно створити відповідний математичний апарат, що реалізовано у вигляді програмного продукту, який дозволить на основі зазначеного підходу та за обраним критерієм розраховувати базові економічні показники.

Постановка завдання. Завданням роботи є розробка алгоритму визначення та управління оптимальними за економічним критерієм енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазі, за наявності електричного поля в її камері, а також розробка програмного комплексу на його базі для спрощення розрахунків.

Головна частина досліджень. Для вирішення поставленого завдання, згідно з методикою запропонованою в роботі [1] на першому етапі слід виконати експериментальні дослідження на конкретному об'єкті промислового підприємства задля встановлення взаємозв'язку між параметрами пічної установки, такими як: витрата біогазової суміші (Q), $\text{м}^3/\text{год.}$; напругою між заготовкою та пальником (U), В; габаритами заготовки (x, y, z), м. За результатами виконаного планування експерименту відповідно до складеної для цього матриці одержують потрібну математичну модель. На другому етапі здійснюють внесення необхідних вихідних даних таких як: графік нагрівання печі, поточна температура та температура, що задана технологією [1].

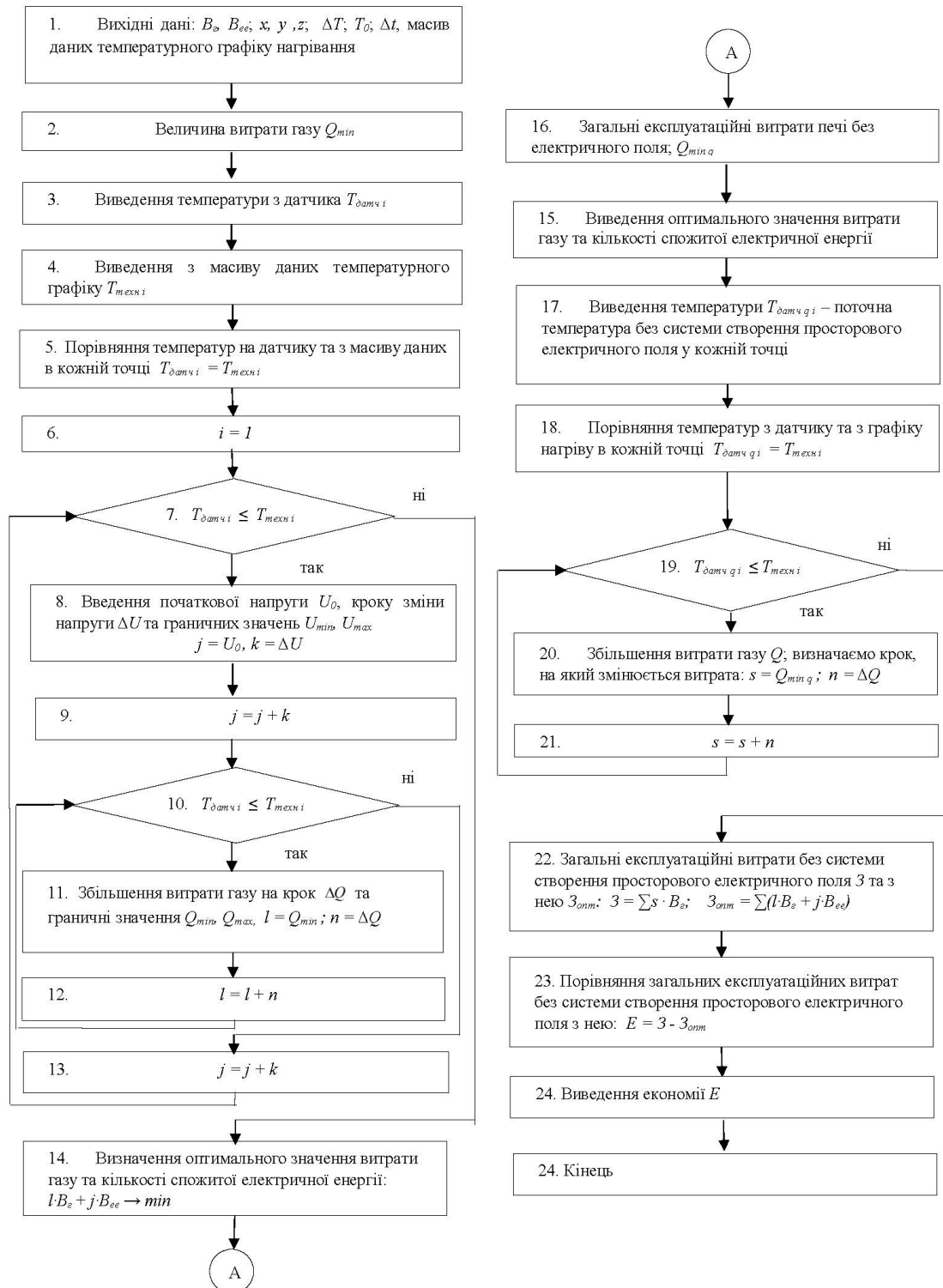


Рисунок 1 – Алгоритм визначення та управління оптимальними за економічним критерієм енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазі, за наявності електричного поля в її камері

На основі блок-схеми системи управління розроблено відповідний алгоритм визначення та управління оптимальними за економічним критерієм енергетичними параметрами пічної установки, що працює на біогазі, на кожному етапі процесу нагрівання металу за наявності електричного поля в її камері, що подано на рис. 1.

Структурно алгоритм складається з кількох функціонально відокремлених частин, таких як: визначення коефіцієнтів одержаної експериментально моделі; задавання масиву даних щодо технологічного графіку нагрівання печі; порівняння поточної температури за датчиком із температурою, що задано технологією; встановлення

оптимальних енергетичних параметрів; розрахунок передбачуваної економії від запропонованої системи.

Тут: B_e, B_{ee} – тариф на природний газ та електричну енергію; $Q_{\min}, Q_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення витрати газу, $\text{м}^3/\text{год.}$, відповідно; ΔQ – крок подавання газу, $\text{м}^3/\text{год.}$; Q_i, Q_s – поточне значення витрати газу без та з системою управління, $\text{м}^3/\text{год.}$, відповідно; $Q_i, Q_s \in Q_{\min} \dots Q_{\max}, \text{м}^3/\text{год.}$; $T_{a,i}, T_{a, \text{до}, i}$ – поточна температура нагрівання печі та температура технологічного її нагрівання у заданій точці, $^{\circ}\text{C}$, відповідно; $U_{\min}, U_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення напруги, В, відповідно; ΔU – крок змінювання напруги, В; U_i – поточне значення напруги, $U_i \in U_{\min} \dots U_{\max}, \text{В}$; W_{ee} – кількість енергії, що споживано електричною частиною пічної установки [9] за цикл, $\text{кВт}\cdot\text{год.}$; $\hat{A}$ – витрати на енергоресурси без системи управління за крок часу Δt , $\text{грн}/\text{крок}$; $\hat{A}_{\text{тдо}}$ – витрати на енергоресурси з системою управління за крок часу Δt , $\text{грн}/\text{крок}$; $\sum B, \sum B_{\text{тдо}}$ – сумарні витрати без системи управління та з нею, $\text{грн}/\text{цикл}$, відповідно; E – економія витрат на енергоресурси від впровадження системи управління, $\text{грн}/\text{цикл}$.

У блоках 1-4 вводять початкову інформацію для розрахунків. Порівняння поточної температури із температурою, заданою технологією, відбувається у блоці 5. Якщо вона є недостатньою, то подають додаткову напругу, де у блоці 8 задають її крок – ΔU та граничні її значення – $U_{\min}, U_{\max}$.

У блоках 10-13 циклічно здійснюють порівняння вищезазначених температур і за їх відмінності – збільшують подавання біогазової суміші на крок її змінювання ΔQ . Таким чином знаходять усі можливі комбінації величини напруги та витрати газу для досягнення потрібної температури. У блоці 14 з усіх можливих комбінацій знаходять найбільш економічно вигідну та виводять у 15 блоці.

У блоках 18-24 визначають економію підприємства на енергетичні ресурси для роботи нагрівальної печі шляхом розрахунків різниці між сумарними витратами на кожному кроці Δt температурного графіку нагрівання за цикл без системи управління та з нею.

Отже, запропонований математичний апарат дозволить визначати оптимальні значення вихідних енергетичних параметрів пічної установки та більш точно прогнозувати кількість газової суміші, в тому числі і біогазової, що можливо

економити за умов будь-якого промислового підприємства.

Для спрощення розрахунків на базі розробленого алгоритму в середовищі «Excel» реалізовано програмний комплекс, який зображено на рис. 2.

За допомогою розробленого програмного продукту можливо з мінімальною витратою часу визначити всі можливі комбінації значень витрати газової суміші та величини напруги в певному діапазоні з фіксованим кроком та встановити найбільш економічно вигідні з них, за яких досягають заданої графіком температури у кожній його точці.

Як приклад застосування запропонованого математичного апарату розраховано потенційно можливу економію енергетичних ресурсів для термічної печі в умовах прокатного цеху ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпрспецсталь».

За цикл роботи, що триває 16 год., піч споживає в середньому $83 \text{ м}^3/\text{год.}$ (Q_e) природного газу, або близько $16 \text{ м}^3/\text{год.}$ на пальник. Одночасно, для забезпечення технологічних вимог, два останні пальники використовують протягом перших двох годин, чотири пальники – наступні шість годин, три пальники – останні шість годин. Тоді, витрати газової суміші складають $Q_e = 800 \text{ м}^3/\text{цикл}$.

Оскільки в цеху є п'ять однотипних пічних установок, то загальні витрати складають $Q_{e\Sigma} = 4000 \text{ м}^3/\text{цикл}$.

Встановлено, що середня кількість циклів на рік відповідає кількості робочих днів і дорівнює $C = 200$, а вартість природного газу для підприємства на момент розрахунків $B_{n.e} = 9 \text{ грн}/\text{м}^3$, а електричної енергії $B_{ee} = 1,8 \text{ грн} / \text{кВт}\cdot\text{год.}$

Тоді, загальні експлуатаційні витрати складуть:

$$З = Q_{e\Sigma} \cdot C \cdot B_{n.e} = 7,2 \text{ млн. грн}/\text{рік.}$$

Як результат розрахунків з використанням запропонованого інструментарію для об'єкту дослідження та враховуючи результати попереднього виконаного експерименту, де за рахунок застосування просторового електричного поля економія природного газу складає $\sim 11 \%$, значення економії буде дорівнювати:

$$E = 0,11 \cdot З = 0,8 \text{ млн. грн}/\text{рік.}$$

Загальні капітальні вкладення вміщують вартість регуляторів газу та напруги, а також витрати на споживання електричної енергії, тобто

$$K = Z_{e.e.} + Z_{\text{рег.}Q} + Z_{\text{рег.}U}; \quad (1)$$

Вхідні данні			№	ti	Tтехн	Tдатч	Tдатч г	№	Ui	Qi	ΣZ _{опт}	ΣZ	E
t	год	10	1	0				0	0	0			
Δt	хв	5	2	5				1	10	1			
Q min	м³	0	3	10				2	20	2			
Q max	м³	800	4	15				3	30	3			
ΔQ	м³	1	5	20				4	40	4			
Br	грн/м³	9	6	25				5	50	5			
U min	В	0	7	30				6	60	6			
U max	В	1000	8	35				7	70	7			
ΔU	В	10	9	40				8	80	8			
Вее	грн/кВт·ч	1,8	10	45				9	90	9			
x	см		11	50				10	100	10			
y	см		12	55				11	110	11			
z	см		13	60				12	120	12			
Коефіцієнти моделі нагрівальної установки за наявності просторового електричного поля			14	65				13	130	13			
			15	70				14	140	14			
			16	75				15	150	15			
			17	80				16	160	16			
			18	85				17	170	17			
			19	90				18	180	18			
			20	95				19	190	19			
			21	100				20	200	20			
			22	105				21	210	21			
			23	110				22	220	22			
			24	115				23	230	23			
			25	120				24	240	24			
			26	125				25	250	25			
			27	130				26	260	26			
			28	135				27	270	27			
№	b		29	140				28	280	28			
0			30	145				29	290	29			
1			31	150				30	300	30			
2			32	155				31	310	31			
3			33	160				32	320	32			
4			34	165				33	330	33			
5			...	...				...	...	...			
6			120	600				100	1000	100			

Рисунок 2 – Програмний комплекс системи визначення та управління енергетичними параметрами в камері печі за наявності просторового електричного поля

де $Z_{e.e.}$ – витрати на електричну енергію за тарифом, грн./рік; $Z_{рег.Q}$, $Z_{рег.U}$ – витрати на регулятори газу та напруги, грн/рік $Z_{рег.Q} = 120 \cdot 10^3$ грн; $Z_{рег.U} = 7,5 \cdot 10^3$ грн.

За потужності системи створення електричного поля $P = 1,0$ кВт, обмеженні за напругою 1000 В та за роботи печі 16 год/цикл та встановленій кількості робочих днів, максимальне значення витрат на електроенергію складе:

$$Z_{e.e.} = 1600 \cdot 1,8 = 2880 \text{ грн./рік.}$$

Тоді $K = 130,4 \cdot 10^3$ грн./рік.

Термін окупності системи $T_{ок}$ обчислюють як

$$\dot{O}_{ie} = \frac{\dot{E}}{A} \quad (2)$$

$$T_{ок} = 0,16 \text{ року.}$$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання біогазових сумішей для

енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей металургійної галузі промисловості України є особливо актуальним через стрімке зростання вартості традиційних видів палива та необхідність пошуку їм альтернативи. Для підвищення ефективності застосування біогазу в зазначеному обладнанні запропоновано алгоритм визначення та управління оптимальними енергетичними параметрами пічної установки за наявності електричного поля в її камері з урахуванням вимог до технології нагрівання.

Наведені результати є основою для подальших досліджень щодо можливості застосування низькокалорійних сумішей в умовах металургійних підприємств України та етапом створення відповідного базису електрофізичних методів підвищення енергоефективності біогазових технологій.

Бібліографічний перелік

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.
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.
4. **Качан, Ю. Г.** Методика визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазовій суміші, за умови наявності в її камері просторового електричного поля [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії, – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. – Вип. 2 (34). – С. 106-110.
5. **Гавриш, В. І.** Визначення економічно доцільного напрямку використання біогазу [Текст] / В. І. Гавриш // Економіка агропромислового виробництва. – 2014. – № 3. – С. 24-29.
6. **Бирюков, А. Б.** Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах [Текст] / А. Б. Бирюков, Ф. В. Недопекин, В. Н. Ткаченко; монография. – Донецк : Ноулидж (Донецкое отделение), 2012. – 247 с. – ISBN 978-617-579-372-5.
7. **Биогазовые установки. Практическое пособие** [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf - Загл. с экрана.
8. **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.
9. **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.
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 // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – Вип. 2 (36). – С. 28-32.

Коваленко Виктор Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергоэффективности, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С БИОГАЗОВЫМ ОТОПЛЕНИЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЕЕ КАМЕРЕ

Представлены результаты исследований возможности использования биогазовых технологий в промышленных печных установках. Предложен алгоритм определения оптимальных энергетических параметров термической печи, работающей на биогазовой смеси, при наличии электрического поля в ее камере. Приведен расчет экономической эффективности предложенного метода на примере оборудования прокатного цеха металлургического предприятия

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

Kovalenko Victor, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com

ALGORITHM OF DETERMINATION OF OPTIMAL POWER PARAMETERS OF THERMAL FURNACE WITH BIOGAS HEATING AT PRESENCE OF SPATIAL ELECTRIC PAUL IN ITS CHAMBER

Lately power resources, consumed by industrial plants, occupy all greater part in the structure of cost of price through their swift rise in prices, and in particular natural gas, as one of main types of fuel. Therefore the use of alternative and refurbishable energy sources, especially in industry, acquires all greater actuality. Introduction of biogas technologies, first of all, in metallurgical industry for energy-supply of thermal and heater furnaces as the least demanding from the technological point of view to aggressive chemical composition of biogas mixtures, can become by the increase of competitiveness of production through more subzero cost of biogas as a primary fuel for the mentioned equipment. On the first stage there are executed experimental researches on the concrete object of industrial enterprise for the sake of establishment of intercommunication between the parameters of the furnace setting, such as: expense of biogas mixture (Q); by voltage between a purveyance and gas-ring (U); by the sizes of purveyance (x, y, z), On results the executed planning of experiment in accordance with the matrix made for this purpose a necessary mathematical model get. On the

second stage there are carried out bringing of necessary weekend of data such as: chart of heating of furnace, current temperature and temperature, which is set by technology. For simplification of calculations on the base of the worked out algorithm in the environment of "Excel" a programmatic complex by means of which possibly with the minimum expense of time to define all possible combinations of values of expense of gas mixture and size of voltage in a certain range with the fixed step and to set most economic advantageous from them is realized, for which arrive at the temperature set by a chart in every his point. The algorithm of determination of optimal power parameters of thermal furnace, working on biogas mixture, at presence of electric-field in its chamber is offered. Executed Calculation of economy efficiency of the offered method on the example of equipment of rental workshop of metallurgical plant is carried out.

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

Стаття надійшла до редакції 27.03.2019 р.
Рецензент, проф. Ю.Г. Качан